

Identifikacija oštećenja u kompozitima ojačanim staklenim vlaknima primjenom ex-situ mikro tomografskog ispitivanja

Bilobrk, Juro

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:622088>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Juro Bilobrk

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Zvonimir Tomičević

Student:

Juro Bilobrk

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Zvonimiru Tomičeviću na izuzetnom vodstvu, strpljivosti, stručnim savjetima, izdvojenom vremenu te stalnoj dostupnosti.

Nadalje, najveću zahvalu upućujem svojoj obitelji na pruženoj podršci tijekom preddiplomskog studija. Svojim roditeljima, Niki i Suzani, zahvaljujem na pruženoj prilici i brojnim odricanjima kako bi mi omogućili studiranje.

Juro Bilobrk



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Juro Bilobrk

Mat. br.: 0035205272

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Identifikacija oštećenja u kompozitima ojačanim staklenim vlaknima primjenom ex-situ μ -tomografskog ispitivanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Damage detection in glass fiber reinforced epoxy resin via ex-situ μ -tomography**

Opis zadatka:

Određivanje ponašanja materijala korištenjem laboratorijskog CT skenera i odgovarajućeg ispitnog uređaja otvorilo je mogućnosti promatranja fenomena oštećenja koji se javljaju uslijed opterećenja unutar materijala. Rekonstrukcijom registriranih projekcija dobivaju se 3D skenovi koje je moguće analizirati različitim metodama obrade digitalne slike. Osim toga, odziv materijala moguće je odrediti metodom korelacije digitalnih volumena (eng. *DVC – Digital Volume Correlation*).

U ovom radu je potrebno izmjeriti 3D polja pomaka i deformacija primjenom globalnog C8 Correlli[®] DVC algoritma na jednoosnom ispitnom uzorku izrađenom od epoksidne smole ojačane stohastički raspoređenim staklenim vlaknima. Budući da globalni korelacijski princip određuje polje pomaka na mreži konačnih elemenata, potrebno je analizirati provedeno *ex-situ* mehaničko ispitivanje koristeći različite diskretizacije mreže konačnih elemenata. Iz mapa korelacijskih reziduala i glavnih deformacija potrebno je odrediti mjesta nastanka oštećenja unutar materijala.

Tijekom rada potrebno je:

1. Upoznati se s *ex-situ* eksperimentalnim protokolom primjenom CT skenera i klasičnog jednoosnog ispitnog uređaja, te globalnim DVC algoritmom C8 Correlli[®].
2. Izmjeriti polja pomaka i deformacija uzimajući u obzir različite veličine heksaedarskih 3D elemenata.
3. Otkriti oštećenja unutar promatranog područja interesa jednoosnog ispitnog uzorka.
4. Preklapanjem mapa korelacijskih reziduala i odgovarajuće mikrostrukture odrediti mehanički mehanizam oštećenja predloženog materijala.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Datum predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. – 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Zvonimir Tomičević

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS SKRAĆENICA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. KOMPOZITI.....	3
2.1. Kompoziti ojačani vlaknima.....	6
2.2. Epoksidna smola ojačana staklenim vlaknima	8
3. NERAZORNA ISPITIVANJA	13
4. RADIOGRAFIJA.....	15
4.1. Računalna tomografija.....	15
4.2. Podjela industrijskih CT skenera	18
4.3. Primjena CT-a.....	19
4.4. Mehanička ispitivanja.....	20
4.4.1. Ex–situ ispitivanja	20
4.4.2. In–situ ispitivanja	21
4.4.3. Isprekidano i kontinuirano ispitivanje.....	22
5. KORELACIJA DIGITALNIH VOLUMENA	24
5.1. Lokalni pristup.....	24
5.2. Globalni pristup	25
6. EKSPERIMENT	28
6.1. Jednoosno monotono i cikličko mehaničko ispitivanje	28
6.2. Ex – situ μ – tomografski eksperiment.....	29

6.3. Standardna rezolucija pomaka i deformacija.....	31
7. REZULTATI EKSPERIMENTA	35
7.1. Izmjerena polja pomaka.....	35
7.2. Izračunata polja deformacija.....	38
7.2.1. 3D polja deformacija za veličinu elementa 16 voxela	38
7.2.2. 3D polja deformacija za veličinu elementa 96 voxela	42
7.2.3. 2D polja deformacija	45
7.3. Mape korelacijskih reziduala	47
7.3.1. Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 16 voxela	48
7.3.2. Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 96 voxela	51
7.4. Mehanizam oštećenja	53
8. ZAKLJUČAK	55
LITERATURA.....	57
PRILOZI.....	59

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prototip CT skenera [3].....	1
Slika 2.	Prvi komercijalni CT skener [3].....	2
Slika 3.	Kompoziti s česticama	3
Slika 4.	Kompoziti s vlaknima	4
Slika 5.	Strukturni kompoziti	4
Slika 6.	Porast udjela kompozita u autoindustriji [6].....	5
Slika 7.	Povećanje udjela kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji [7].....	5
Slika 8.	Udio kompozitnih materijala u zrakoplovu tvrtke Airbus, model A350 [8].....	6
Slika 9.	Usporedba debljine vlasi kose i ugljičnog vlakna [10].....	7
Slika 10.	Osnovni načini rasporeda vlakana [9].....	7
Slika 11.	Shematski prikaz dodirnog polaganja [11]	10
Slika 12.	Kompozitna ploča	10
Slika 13.	Mikrostruktura ispitnog uzorka [12].....	11
Slika 14.	Mikrostruktura po ravninama a) x-y, b) x-z i c) y-z [12].....	12
Slika 15.	Shematski prikaz postava CT skenera [16].....	16
Slika 16.	Shematski prikaz postava 2D CT skenera [17].....	17
Slika 17.	Postav 3D CT skenera sa spiralnim principom skeniranja	18
Slika 18.	Prikaz ovisnosti rezolucije o rasponu mjerenja za industrijske CT skenere [18] ..	19
Slika 19.	Karakteristični eksperimentalni protokol ex-situ mehaničkog ispitivanja [22]	21
Slika 20.	Karakteristični eksperimentalni protokol in-situ mehaničkog ispitivanja [22]	22
Slika 21.	Karakteristični eksperimentalni protokol isprekidanog in-situ mehaničkog ispitivanja [22].....	23
Slika 22.	Karakteristični eksperimentalni protokol kontinuiranog in-situ mehaničkog ispitivanja [22].....	23
Slika 23.	Jednoosni ispitni uzorak.....	28
Slika 24.	Krivulja cikličkog opterećenja jednoosnog ispitnog uzorka.....	29
Slika 25.	$\sigma - \epsilon$ dijagram za provedeni monotoni i ciklički test	29
Slika 26.	Industrijski tomograf X50+ (North Star Imaging).....	30
Slika 27.	Provedeno ex-situ mehaničko ispitivanje s karakterističnim vremenom zabilježavanja 3D volumena	31
Slika 28.	Korelacijski reziduali dobiveni na mreži konačnih elementa veličine 96 voxela..	32
Slika 29.	Standardna rezolucija pomaka [12].....	33

Slika 30.	Standardna rezolucija glavne najveće deformacije [12]	34
Slika 31.	Izmjereno polje pomaka u x smjeru za sken 04	36
Slika 32.	Izmjereno polje pomaka u y smjeru za sken 04	37
Slika 33.	Izmjereno polje pomaka u z smjeru za sken 04	38
Slika 34.	Polje deformacija za veličinu elementa 16 voxela za sken 01	39
Slika 35.	Polje deformacija za veličinu elementa 16 voxela za sken 02	40
Slika 36.	Polje deformacija za veličinu elementa 16 voxela za sken 03	41
Slika 37.	Polje deformacija za veličinu elementa 16 voxela za sken 04	41
Slika 38.	Polje deformacija za veličinu elementa 96 voxela za sken 01	42
Slika 39.	Polje deformacija za veličinu elementa 96 voxela za sken 02	43
Slika 40.	Polje deformacija za veličinu elementa 96 voxela za sken 03	44
Slika 41.	Polje deformacija za veličinu elementa 96 voxela za sken 04	45
Slika 42.	2D polje deformacija za sken 01	46
Slika 43.	2D polje deformacija za sken 02	46
Slika 44.	2D polje deformacija za sken 03	47
Slika 45.	2D polje deformacija za sken 04	47
Slika 46.	Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 16 voxela za sken 01	48
Slika 47.	Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 16 voxela za sken 02	49
Slika 48.	Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 16 voxela za sken 03	50
Slika 49.	Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 16 voxela za sken 04	51
Slika 50.	Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 96 voxela za sken 01 (lijevo) i sken 02 (desno)	52
Slika 51.	Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 96 voxela za sken 03 (lijevo) i sken 04 (desno)	52
Slika 52.	Prikaz mape korelacijskih reziduala preklapljene odgovarajućom mikrostrukturom u y-z ravnini za sken 01 (lijevo) i sken 02 (desno)	53
Slika 53.	Prikaz mape korelacijskih reziduala preklapljene odgovarajućom mikrostrukturom u y-z ravnini za sken 03 (lijevo) i sken 04 (desno)	54

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Usporedna tablica svojstava i primjene ojačala [5].....	8
Tablica 2.	Podjela vlakana prema kemijskom sastavu i svojstvima [9].....	9
Tablica 3.	Volumni udio konstituenata [12].....	12
Tablica 4.	Podjela nerazornih metoda ispitivanja [13].....	13

POPIS SKRAĆENICA

Oznaka	Značenje
CT	Computed Tomography
NDT	Non-destructive testing
DVC	Digital Volume Correlation
VOI	Volume of Interest
DIC	Digital Image Correlation
ZOI	Zone of Interest

SAŽETAK

Zastupljenost kompozitnih materijala u izradi zahtjevnih inženjerskih konstrukcija i komponenti tijekom godina je u konstantnom porastu. Zahvaljujući svojim specifičnim mehaničkim svojstvima suvremena industrija stavlja poseban naglasak na modifikaciju postojećih i razvoj novih kompozitnih materijala. Međutim, zbog heterogenosti njihove mikrostrukture i anizotropnih mehaničkih svojstava opisivanje odziva kompozitnih materijala uslijed opterećenja je još uvijek izazov brojnim znanstvenicima. Kako bi se pouzdano opisalo ponašanje kompozitnih materijala te odredila mehanička svojstva kompozitnih materijala koriste se suvremene metode nerazornog ispitivanja materijala. Jedna od najzastupljenijih beskontaktnih metoda nerazornog ispitivanja materijala je računalna tomografija koja pruža uvid kako u vanjsko tako i unutarnje stanje ozračenog materijala. Rekonstruiranjem registriranih projekcija dobivaju se 3D digitalne slike promatranog volumena interesa. Promatranjem rekonstruiranih 3D volumena te primjenom različitih tehnika analize slika (npr. segmentacija, binarizacija) moguće je odrediti promjene u registriranim volumenima. Međutim klasične metode analize digitalnih slika ne mogu na učinkovit i automatiziran način odrediti pozadinu ponašanja materijala iz 3D skenova. Iz tog razloga, primjenjuju se korelacijske metode za mjerenje cijelog polja pomaka kojima je moguće odrediti odziv materijala i odgovarajuće mehanizme unutar materijala koji se javljaju uslijed mehaničkog opterećenja.

U ovom radu provedeno je *ex-situ* mehaničko ispitivanje s ciljem identifikacije oštećenja i određivanja mehaničkih mehanizama koji dovode do gubitka krutosti kod epoksidne smole ojačane stohastički raspoređenim mat staklenim vlaknima. Uparivanjem laboratorijskog CT skenera i klasičnog jednoosnog ispitnog uređaja provedeno je predloženo ispitivanje na heterogenom materijalu. Tijekom cikličkog opterećenja ispitni uzorak je skeniran u neopterećenom stanju, tj. pri unaprijed definiranim iznosima mehaničkog opterećenja ispitni uzorak se rasteretio te skenirao primjenom laboratorijskog CT skenera. Dobivene 3D slike analizirane se primjenom globalnog DVC algoritma Correlli C8 koji se temelji na metodi konačnih elemenata. Promatrani volumen interesa diskretiziran je različitim veličinama mreža konačnih elemenata. Iz dobivenih 3D polja pomaka i deformacija promatran je odziv kompozitnog materijala uslijed narinutog mehaničkog opterećenja. Osim toga, promatrane su odgovarajuće 3D mape korelacijskih reziduala kako bi se odredila mjesta nastanka oštećenja, odnosno mikropukotina unutar predloženog materijala. Preklapanjem polja korelacijskih reziduala s odgovarajućim presjekom mikrostrukture promatranog volumena interesa određen je uzrok nastanka mehanizma oštećenja uslijed predloženog režima mehaničkog opterećenja.

Ključne riječi: kompoziti, nerazorna ispitivanja, računala tomografija, korelacija digitalnih volumena, *ex-situ* mehaničko ispitivanje, 3D polja pomaka i deformacija, korelacijski reziduali

SUMMARY

The application of composite materials in the production of demanding engineering constructions and components is constantly increasing over the years. Due to their specific mechanical properties, the modern industry gives emphasis on the modification of existing and development of new composite materials. However, because of their heterogenous microstructure and anisotropic mechanical properties, characterization of the material response of composite structures subjected under mechanical loading is still a great challenge for many scientists. Hence, modern non-destructive testing methods are used to reliably describe the behavior of composite materials and determine corresponding mechanical properties. One of the most commonly used non-contact non-destructive testing methods is computed tomography which gives full insight into external and internal state of the irradiated material. Reconstruction of the registered projections provides 3D digital images of the observed volume of interest. Observing the reconstructed 3D volumes and applying different image analysis techniques (*e.g.* segmentation, binarization), it is possible to determine changes in the registered volumes. However, classical methods for digital images analysis cannot determine the background of the material behavior from 3D scans adequately and automatically. Thus, the full-field measurements are conducted with application of correlation methods. Latter, enable the identification of material response and the corresponding mechanisms within the material that occur due to the imposed mechanical loading.

Within this thesis an ex-situ mechanical test was conducted to identify damage occurrence and to determine the underlying mechanical mechanisms that origins the decrease of stiffness in mat fiberglass reinforced epoxy resin composite. The proposed investigation of the heterogenous material was conducted coupling the laboratory CT scanner and a classical uniaxial testing machine. The testing sample is scanned in unloaded state during the cyclic loading history, *i.e.* at predefined loading regimes the test sample was unloaded and scanned using the laboratory CT scanner. The obtained 3D images were analyzed using the global DVC algorithm Correli C8 which is based on the finite element method. The observed volume of interest is discretized by the different sizes of finite element meshes. The response of the investigated composite material subjected to the cyclic loading was observed from the obtained 3D displacement and strain fields. In addition, the corresponding 3D correlation residuals maps were monitored in order to determine the damage location, *i.e.* microcracks within the proposed material. The origin of the damage mechanisms, inducted by the imposed mechanical loading

regime, is detected by overlaying the correlation residuals maps on the top of the corresponding cross-section of the microstructure of the observed volume of interest.

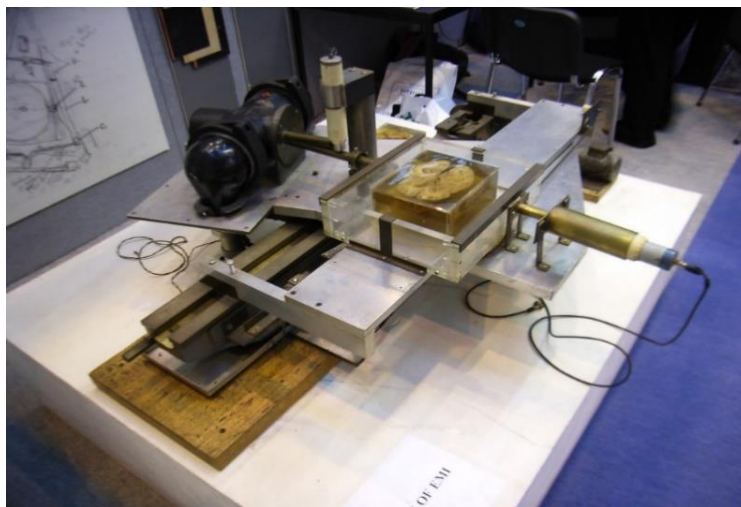
Keywords: composites, non-destructive testing, computed tomography, digital volume correlation, ex-situ mechanical testing, 3D displacement and strain fields, correlation residuals

1. UVOD

Kompozitni materijali predstavljaju skupinu materijala čija svojstva je moguće jednostavno modificirati. Zahvaljujući tome njihova primjena je u stalnom porastu. Mehanička i kemijska svojstva kompozitnih materijala kontinuirano se poboljšavaju budući da se u područjima zrakoplovne industrije, autoindustrije, te zbog vojnih potreba zahtijeva daljnji napredak kompozitnih materijala, čije mogućnosti sežu izuzetno daleko [1]. S obzirom na heterogenost mikrostrukture i nepoznavanje ponašanja kompozita njihova karakterizacija je složena.

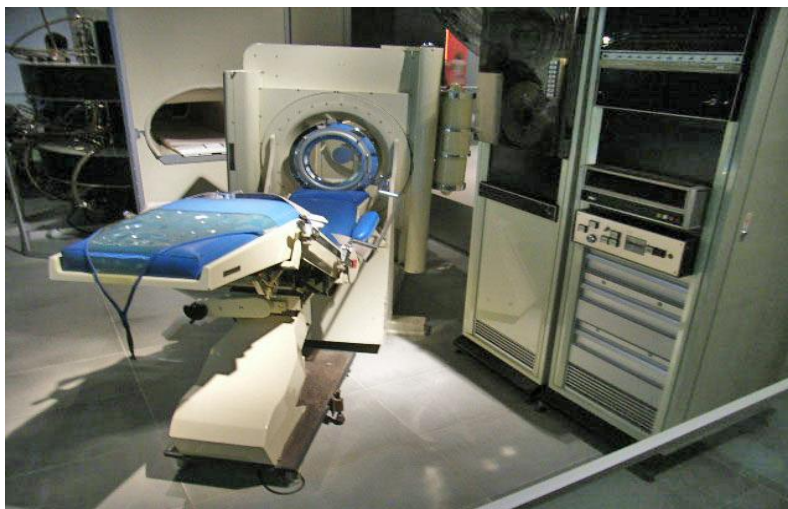
Primjena nerazornih ispitivanja (eng. *Non-destructive Testing* – NDT) također je u konstantnom porastu. NDT metode koriste se u mnogim područjima, a jedno od najznačajnijih je upravo područje ispitivanja kompozitnih materijala. Korištenjem NDT metoda moguće je karakterizirati kompozite, identificirati oštećenja unutar materijala bez promjene prvotnih karakteristika i oštećivanja ispitnog uzorka. Različite NDT metode omogućavaju navedeno, to su ultrazvučno ispitivanje, termografsko ispitivanje, radiografsko ispitivanje, vizualna inspekcija i druge NDT metode. U ovom radu korišteno je radiografsko ispitivanje, točnije računalna tomografija.

Teorijsku osnovu računalne tomografije postavio je austrijski matematičar Johan Radon tijekom 1917. godine. On je dokazao da se višedimenzijски objekti mogu rekonstruirati na temelju vlastitih projekcija. Međutim, tek tijekom 1960-ih godina Allan M. Cormack objavio je radove na temu rekonstrukcije CT skenova. Slika 1. prikazuje prototip CT skenera kojega je izumio Godfrey N. Hounsfield tijekom 1970-ih godine. Počeci primjene računalne tomografije ostvareni su u području medicine, a izumi su bili toliko utjecajni na tadašnje stanje ispitivanja da su izumiteljima dodijeljene Nobelove nagrade [2].



Slika 1. Prototip CT skenera [3]

Slika 2. prikazuje prvi komercijalni CT skener koji je konstruirano Godfrey N. Hounsfiel 1972. godine u laboratoriju EMI-a u Londonu. Proces prikupljanja podataka trajao je satima, a za rekonstrukciju slike bili su potrebni dan.



Slika 2. Prvi komercijalni CT skener [3]

Nedugo nakon izuma i prvih primjena CT skenera, računalna tomografija proširila se i na područje nerazornih ispitivanja u znanosti o materijalima. Budući da računalna tomografija omogućava trodimenzijski prikaz kako vanjskog tako i unutarnjeg stanja skeniranog objekta, pritom ne oštećujući sami objekt, mnogo je mogućih područja primjene. Ključna područja primjene su detekcija pukotina, analiza lomova, analiza mehaničkih sklopova te reverzibilno inženjerstvo. Primjenom računalne tomografije u znanosti o materijalima omogućena je precizna registracija veličine i položaja poroznosti u materijalu, identifikacija neželjenih uključina te određivanje prostornih informacija o inicijaciji i propagaciji pukotina. Osim toga znatno je olakšana analiza mehaničkih sklopova budući da je moguće vizualno pregledati komponente u njihovom funkcionalnom položaju bez prethodnog rastavljanja sklopova [4].

Cilj ovog rada je određivanje ponašanja materijala promatranjem fenomena oštećenja koja se javljaju uslijed opterećenja unutar materijala. 3D skenove, rekonstruirane registriranim projekcijama, moguće je analizirati različitim metodama obrade digitalne slike. U ovom radu će primjenom C8 Correlli DVC algoritma biti izmjerena cijela 3D polja pomaka, te izračunata polja deformacija na jednoosnom ispitnom uzorku izrađenom od epoksidne smole ojačane stohastički raspoređenim staklenim vlaknima. Izmjerena polja pomaka analizirati će se korištenjem različite diskretizacije mreže konačnih elemenata. 3D volumeni zabilježeni su tijekom provedbe *ex-situ* mehaničkog ispitivanja. Na temelju polja glavnih deformacija i mapa reziduala biti će određeni mehanizmi oštećenja kod predloženog kompozitnog materijala uslijed jednoosnog opterećenja.

2. KOMPOZITI

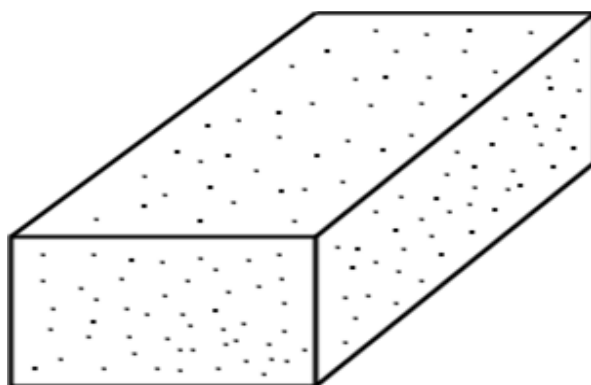
Kompoziti su skupina materijala dobivena spajanjem dvaju ili više konstituenata značajno različitih svojstava. Rezultat spajanja različitih konstituenata je materijal specifičnih svojstava koja ne karakteriziraju niti jedan od konstituenata. Prednost kompozita očitava se u vrlo neuobičajenim kombinacijama svojstava u odnosu na konvencionalne materijale s karakterističnim izotropnim ponašanjem materijala. Proizvodnim postupcima moguće je dobiti kompozitni materijal koji je krući, čvršći, lakši i jeftiniji u usporedbi s klasičnim inženjerskim materijalima.

Osnova podjela kompozita s obzirom na tip matrice je na:

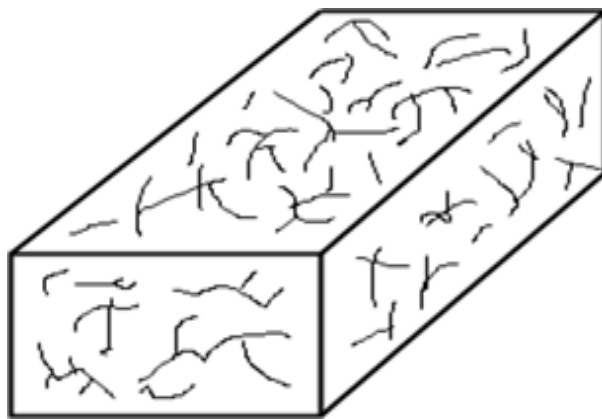
- metalne kompozite,
- keramičke kompozite i
- polimerne kompozite.

Kompozite s metalnom matricom moguće je dalje podijeliti na: metalno-metalne, metalno-keramičke, metalno-polimerne. Kompoziti s keramičkom matricom dijele se na: keramičko-polimerne, keramičko-keramičke, a kompozite s polimernom matricom moguće je podijeliti na polimerno-polimerne te polimerno-metalne. Na temelju navedenog zaključuje se da su kompoziti višefazni materijali, umjetno proizvedeni. Uobičajeno prvu fazu predstavlja kontinuirana matrica koja okružuje ostale (disperzirane) faze. Stoga je daljnja podjela kompozita, prema [5], na:

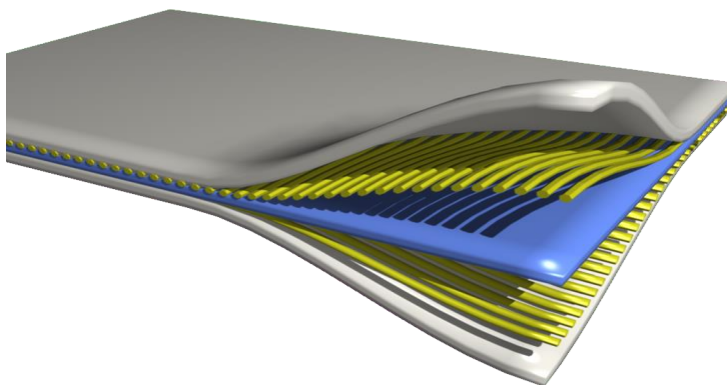
- kompozite s česticama (Slika 3.),
- kompozite s vlaknima (Slika 4.) i
- strukturne kompozite (Slika 5.).



Slika 3. Kompoziti s česticama

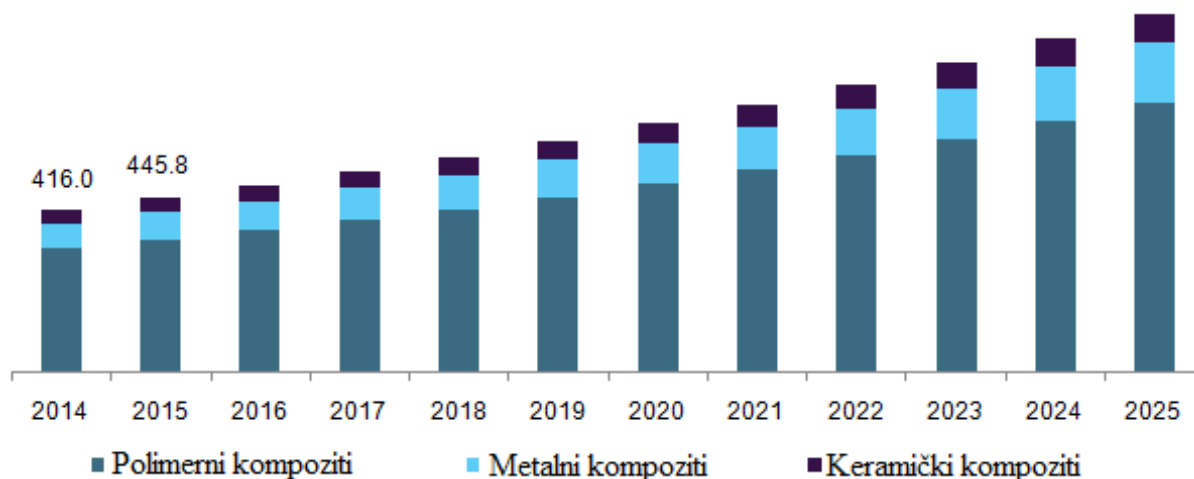


Slika 4. Kompoziti s vlaknima



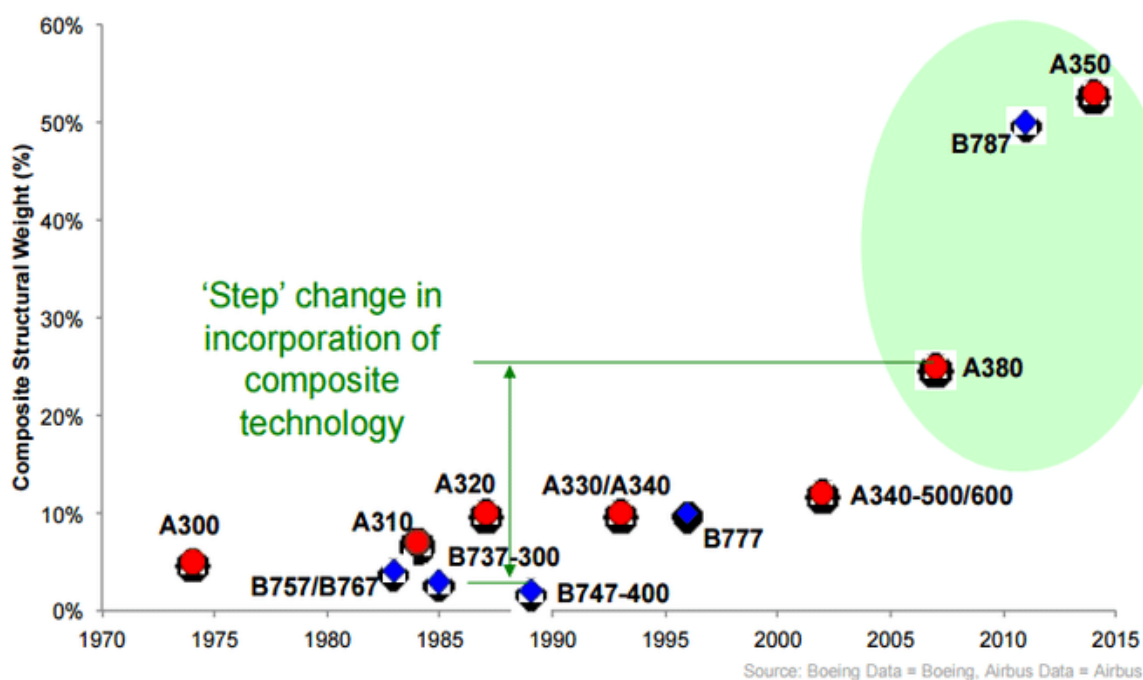
Slika 5. Strukturni kompoziti

Otpornost kompozitnih materijala na koroziju, visoka specifična čvrstoća i krutost, duži vijek trajanja, jeftino održavanje i mogućnost kombiniranja različitih svojstava ono su što ih izdvaja od ostalih materijala. Prednosti kompozita u odnosu na konvencionalne materijale rezultiraju širenjem primjene kompozita. Suvremena industrija postavlja stroge zahtjeve s obzirom na svojstva materijala što doprinosi primjeni kompozita. Industrije u kojima kompoziti prednjače su zrakoplovna, svemirska, autoindustrija, ali isto tako primjenu nalaze u medicini te sportu. Na Slika 6. prikazan je porast udjela kompozita u autoindustriji. Razlog uporabe kompozita u autoindustriji je konstantna tendencija za smanjenjem potrošnje goriva te smanjenja mase automobila.

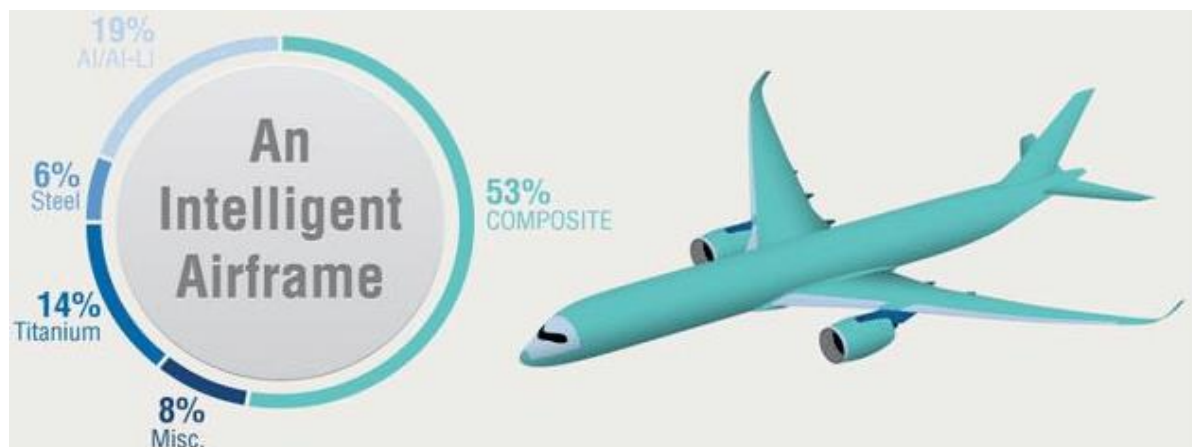


Slika 6. Porast udjela kompozita u autoindustriji [6]

Još jedan primjer rasta primjene kompozitnih materijala javlja se u zrakoplovnoj industriji. Prema Slika 7. vidljiv je porast udjela kompozita u konstrukciji zrakoplova sa svega 5% 1970-ih godina na preko 50% u posljednjih 10-ak godina. Također na Slika 8. prikazan je točan postotni udio kompozitnih materijala u zrakoplovu tvrtke Airbus, na modelu zrakoplova A350.



Slika 7. Povećanje udjela kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji [7]



Slika 8. Udio kompozitnih materijala u zrakoplovu tvrtke Airbus, model A350 [8]

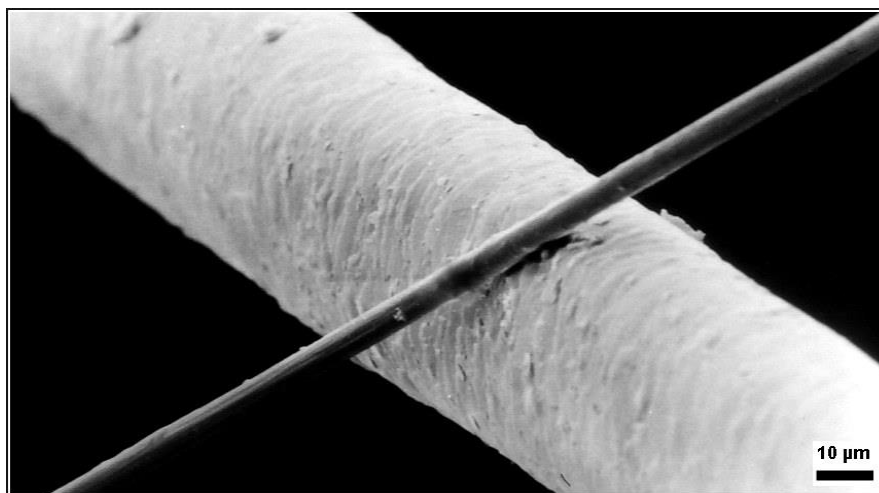
2.1. Kompoziti ojačani vlaknima

Vlaknima ojačani kompoziti su najraširenija skupina kompozita u primjeni. Sastoje se od vlakana, koja su čvrsta i kruta, te polimerne matrice, koja je duktilna, žilava i lagana. Glavne prednosti vlaknima ojačanih kompozita su visoka specifična krutost i čvrstoća, dobra dinamička izdržljivost, mogućnost prigušenja vibracija te kemijska postojanost. Nedostaci vlaknima ojačanih kompozita su osjetljivost na povišene temperature, zaostala naprezanja, anizotropna mehanička svojstva, cijena vlakana i slaba duktilnost.

Uloge matrica u vlaknima ojačanim kompozitima su povezivanje vlakana, prijenos opterećenja na vlakna, definiranje vanjskog oblika, zaštita od vanjskih utjecaja te zaustavljanje naglog širenja pukotine. S obzirom na osnovnu zadaću matrice, a to je prijenos opterećenja na vlakna i zaustavljanje širenja pukotina, materijali matrice moraju biti žilavi i duktilni. Ovisno o ponašanju pri višim temperaturama materijali matrica dijele se na plastomerne i duromerne. Epoksidne smole najčešće se koriste u zrakoplovstvu zbog svoje otpornosti prema vlazi, ali i boljim mehaničkim svojstvima u odnosu na druge vrste matrica. Budući da ponekad postoji potreba za primjenom kompozita pri povišenim temperaturama, razvijaju se i matrice koje su temperaturno postojane (tj. neovisne). Tako su na primjer poliimidne (PI) i polietereterketone (PEEK) matrice postojane na temperaturama od 250 do 300 °C [9].

Osnovna uloga vlakana u kompozitima ojačanim vlaknima je povećanje čvrstoće i krutosti. Stoga se kao materijal vlakana odabiru materijali visoke specifične čvrstoće i krutosti, ali i niske gustoće kako bi imali manju masu. Omjer duljine i promjera l/d definira radi li se o kontinuiranim ili diskontinuiranim (kratkim) vlaknima. Poželjno je da vlakana imaju čim manji promjer budući da to povećava čvrstoću kompozitnog materijala. Međutim, važno je napomenuti kako vlakna manjeg promjera imaju veću cijenu. Na Slika 9. prikazana je

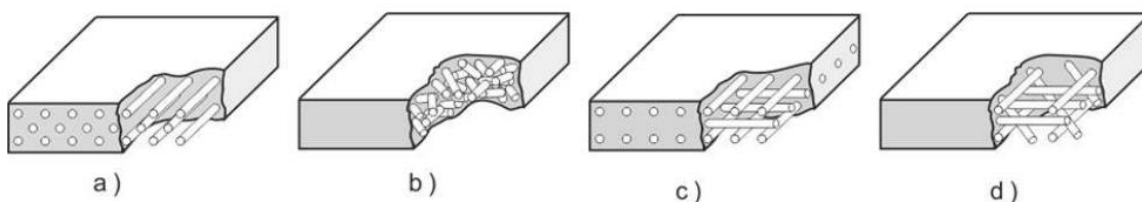
usporedba debljine vlasi kose i ugljičnog vlakna, promjer vlasi kose nekoliko je puta veći od promjera ugljičnog vlakna.



Slika 9. Usporedba debljine vlasi kose i ugljičnog vlakna [10]

Na Sliku 10. prikazani su različiti načini rasporeda vlakana. S obzirom na željena materijalna svojstva, vlakna u matrici mogu imati različitu distribuciju. Stoga razlikujemo:

- kontinuirana jednosmjerna vlakna (Slika 10 a)),
- slučajno usmjerena (mat) diskontinuirana vlakna (Slika 10 b)),
- ortogonalno raspoređena vlakna (Slika 10 c)) i
- višesmjerno položena vlakna (Slika 10 d)).



Slika 10. Osnovni načini rasporeda vlakana [9]

Ovisno o vrsti ojačala moguće je napraviti podjelu:

- polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima,
- polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima,
- polimerni kompoziti ojačani aramidnim vlaknima i
- polimerni kompoziti ojačani ostalim vlaknastim materijalima.

U Tablica 1. usporedno su prikazane prednosti i nedostaci pojedinih vrsta vlaknima ojačanih polimernih kompozita.

Tablica 1. Usporedna tablica svojstava i primjene ojačala [5]

Vlakna	Svojstva	Primjena
Staklena	1. Jednostavno izvlačenje iz rastaljenog stanja u oblik visoko čvrstih vlakana 2. Dobavljiv, brojne tehnike ekonomične proizvodnje 3. Vlakna su čvrsta što rezultira kompozitima vrlo visoke specifične čvrstoće 4. Pravilnim izborom polimera moguće je postići kemijsku inertnost kompozita koji su onda primjenjivi u korozivnim sredinama	Kućišta vozila, trupovi plovila, cijevi, spremnici, industrijski podovi
Ugljična	1. Najviši specifični modul i najviša specifična čvrstoća 2. Pri povišenim temperaturama zadržavaju visok vlačni modul i visoku čvrstoću 3. Pri sobnoj temperaturi su otporni na vlagu, otapala, kiseline i lužine 4. Relativno jeftina proizvodnja	Sportska i rekreacijska oprema, kućišta raketnih motora, spremnici pod tlakom
Aramidna	1. Izuzetan omjer čvrstoća – gustoća 2. Otpornost na udar i otpornost na puzanje 3. Otporni su na zapaljenje i stabilni pri relativno visokim temperaturama	Neprobojni prsluci, gume, užad, projektili, tlačne posude
Ostala ojačala	1. Vlakna bora 2. Vlakna silicijeva karbida SiC 3. Vlakna aluminijska oksida Al_2O_3	

Napomena: ostala ojačala rijetko se koriste, stoga nisu navedeni primjeri primjene, međutim vlakna bora koriste se za komponente vojnih letjelica i krila helikopterskih rotora.

2.2. Epoksidna smola ojačana staklenim vlaknima

U ovom radu mjerenje 3D polja pomaka i deformacija izvršeno je na jednoosnom ispitnom uzorku izrađenom od epoksidne smole ojačane stohastički raspoređenim staklenim vlaknima. Kod kompozita ojačanih vlaknima najčešće se primjenjuju staklena vlaka zbog svoje dostupnosti i ekonomičnosti. Svojstva staklenih vlakana navedena su u Tablica 1. Oblici u kojima se staklena vlaka najčešće koriste su roving, mat, runa, ali i drugi oblici. Njihov promjer

najčešće se kreće u rasponu 10 – 15 μ m. Vlakna su bijele boje ili prozirna, visoke vlačne čvrstoće. Ograničavajući faktori u primjeni staklenih vlakana su niža krutost, ali i temperaturno područje primjene koje je ograničeno gornjom temperaturnom granicom od oko 200°C. Podjelu staklenih vlakana moguće je napraviti prema kemijskom sastavu i svojstvima [9].

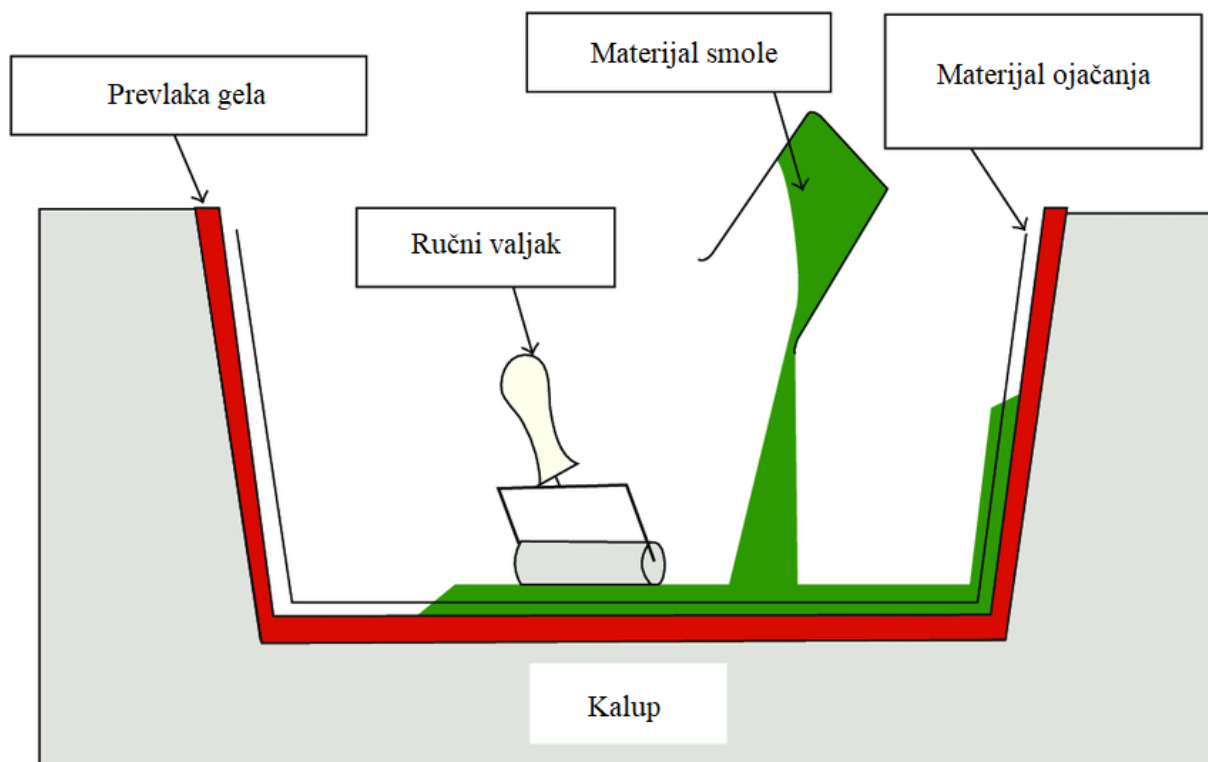
Tablica 2. Podjela vlakana prema kemijskom sastavu i svojstvima [9]

A	Vlakna opće namjene; visoke žilavosti s primjenom u izolaciji topline i zvuka
E	Vlakna otporna na vlagu i blaže oblike agresivnih medija; niska električna vodljivost; relativno loša udarna žilavost; čine 90% ukupne mase staklenih vlakana; povoljne cijene
C	Vlakna kemijski postojana; primjena u proizvodnji cijevi i spremnika
R, S, T	Vlakna povišenih mehaničkih svojstava koja su rezultat manjih promjera vlakana

Materijal matrice korištenog kompozita je epoksidna smola koja pripada skupini duromera. Epoksidna smola kao matrica kompozita dobro prijanja uz ojačalo. Njene prednosti su dobra kemijska otpornost, mogućnost kontrole žilavosti, jednostavna prerada zbog male količine štetnih stvari, dobra dimenzijska i toplinska stabilnost. Nedostaci koji se javljaju su krhkost, osjetljivost na pogreške i pojavu napuklina te viša cijena, ali i relativno niska temperatura primjene [9].

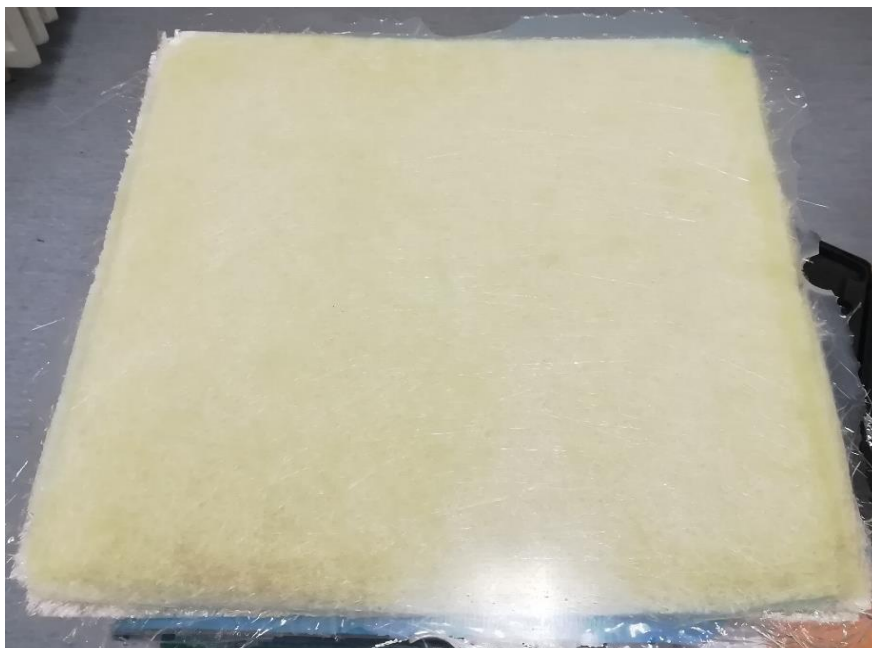
Promatrani kompozit dobiven je dodirnim postupkom laminiranja – ručnim polaganjem. Dodirni postupak laminiranja (eng. *Hand Lay-up*) predstavlja najstariji način mokrog laminiranja. Ručno se nanose slojevi smole i vlakana na površinu otvorenog kalupa prema Slika 11. Postupak se može opisati u 5 koraka, prema [9]:

1. čišćenje,
2. nanošenje gelne prevlake,
3. nanošenje slojeva smole i vlakana,
4. umrežavanje i
5. skidanje komada s kalupa.



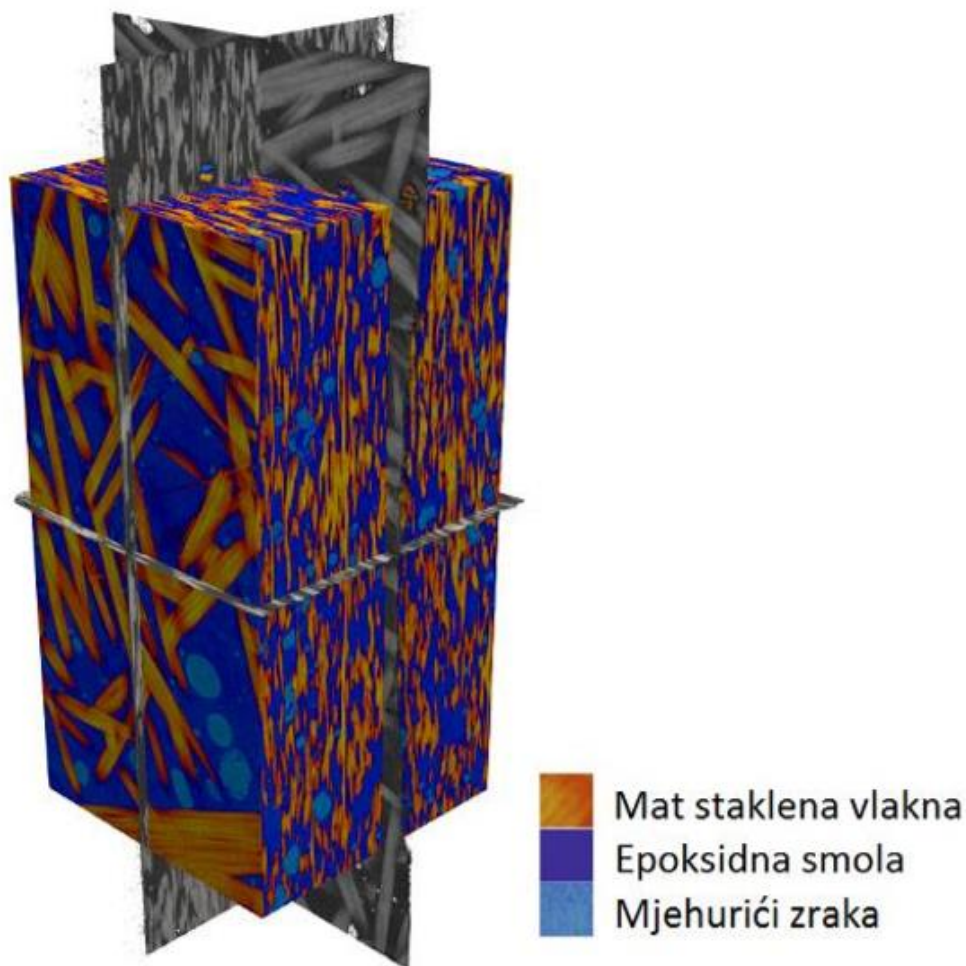
Slika 11. Shematski prikaz dodirnog polaganja [11]

Predloženi kompozit izrađen je od mat R-staklenih vlakana koja imaju površinsku gustoću od 300 g/m^2 i duljinu staklenih vlakana od 50 mm. Za matricu kompozita korištena je smjesa epoksidne smole koja je nanošena kistom i valjkom. Potom je ostavljena pod tlakom 24 h te nakon toga 3 h na temperaturi od 100°C . Tim postupkom dobivena je ploča dimenzija $300 \times 300 \times 5,6 \text{ mm}$ koja je prikazana na Slika 12.



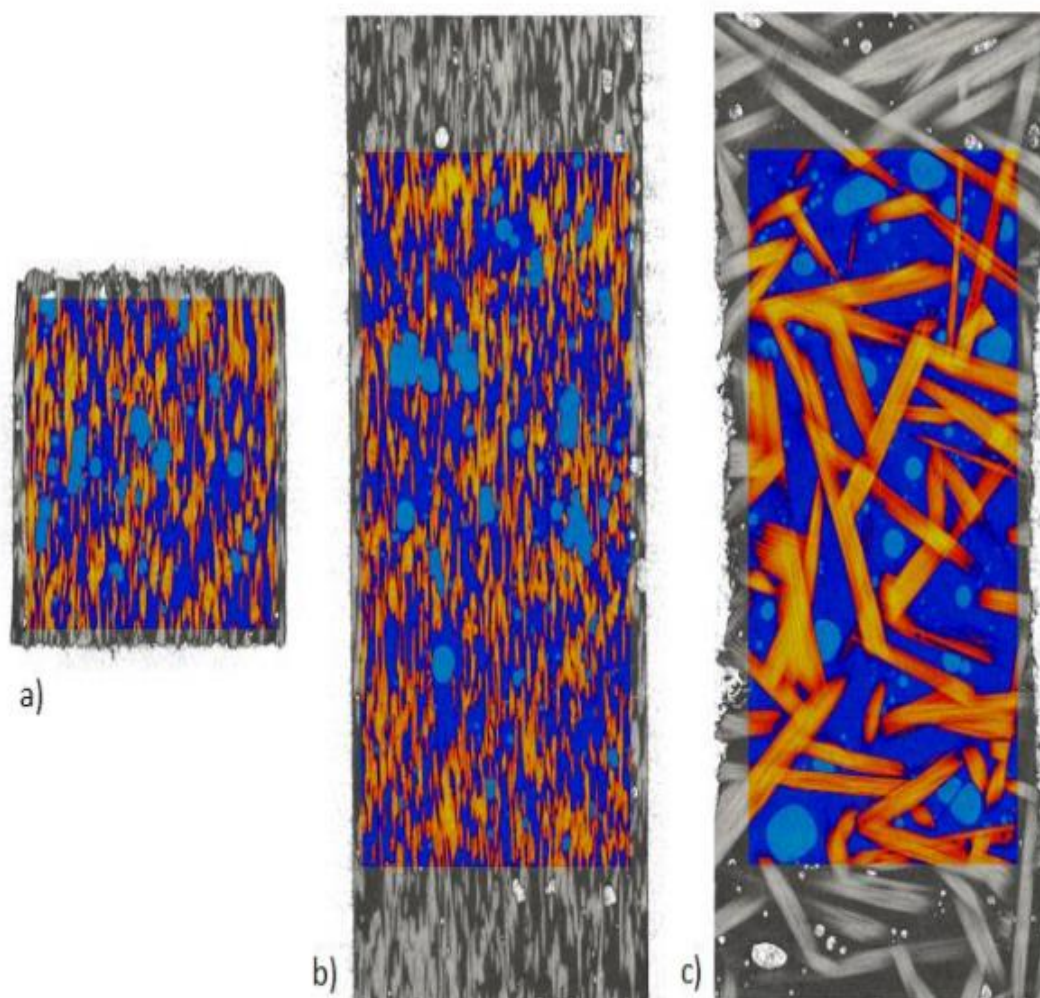
Slika 12. Kompozitna ploča

Na Sliku 13. prikazana je mikrostruktura promatrane zone interesa. U zoni interesa vidljivi su udjeli stohastički raspoređenih mat staklenih vlakana kojima je ojačana epoksidna smola. Osim toga može se vidjeti i poroznost unutar ispitnog uzorka. Budući da proizvodni postupak nije izveden pod vakuumom javili su se nepoželjni, nepravilno raspodijeljeni, mjehurići zraka (poroznost) različitih veličina.



Slika 13. Mikrostruktura ispitnog uzorka [12]

Osim prikaza 3D mikrostrukture ispitnog uzorka prikazana je i mikrostruktura po ravninama na Sliku 14 te je dobiven volumni udio pojedinih konstituenata unutar kompozita, prema Tablica 3[12].



Slika 14. Mikrostruktura po ravninama a) x-y, b) x-z i c) y-z [12]

Tablica 3. Volumni udio konstituenata [12]

Konstituent	Udio (%)
Mat staklena vlakna	41,77
Epoksidna smola	51,03
Mjehurići zraka	7,2

3. NERAZORNA ISPITIVANJA

Nerazorna ispitivanja (eng. *Non-destructive Testing* – NDT) predstavljaju široku skupinu tehnika, korištenih u znanosti i tehnologiji, utvrđivanja svojstava materijala, komponenti i sustava bez uzrokovanja oštećenja. Budući da nije potrebno oštetiti ispitni uzorak kako bi se odredila cjelovitost inženjerske komponente, NDT predstavlja visoko vrijednu tehniku koja smanjuje troškove i vrijeme trajanja ispitivanja. Različite NDT metode predstavljaju bitan čimbenik u određivanju svojstava i proizvodnji kompozita. Osnovna podjela NDT metoda prikazana je u Tablica 4. Kontaktne metode zahtijevaju kvalitetan dodir između odgovarajućeg senzora i površine kompozita na kojemu se provodi ispitivanje kako bi prikupile zadovoljavajuće podatke. Primjeri kontaktnih metoda prikazani su u Tablica 4. Beskontaktne metode skraćuju vrijeme ispitivanja jer kod njih ne postoji potreba za dodiranjem između senzora i ispitnog uzorka.

Tablica 4. Podjela nerazornih metoda ispitivanja [13]

Nerazorne metode ispitivanja	
Kontaktne	Beskontaktne
Ultrazvučno ispitivanje	Radiografija
Eddy current ispitivanje	Termografija
Magnetsko ispitivanje	Infracrveno ispitivanje
Elektromagnetsko ispitivanje	Holografija
Ispitivanje penetratima	Lasersko ispitivanje
Ispitivanje tekućim penetratima	Vizualni pregled

U nastavku su ukratko opisane metode ispitivanja te su navedene njihove osnovne prednosti i nedostaci [13].

- **Vizualno ispitivanje** predstavlja najjednostavniji oblik ispitivanja. Njena najveća prednost je u tome što ne zahtjeva nikakvu opremu, ispitivanje se brzo provodi i štedi novac. Nedostatak je nepouzdanost.
- **Ultrazvučno ispitivanje** provodi se putem signala koji u sebi sadrže informacije kao što su mjesto loma, veličina pukotine i orijentacija. Sustav se sadrži od odašiljača, kruga prijemnika, pretvornika i zaslona. Prednosti su brzina ispitivanja, visoka rezolucija i mogućnost detektiranja pukotina. Nedostaci su složen ispitni postav, potrebno znanje

kako bi se ispitivanje kvalitetno provelo (tj. kvaliteta dobivenih rezultata ovisi o ispitivaču).

- **Termografija** se zasniva na pretpostavci će doći do promjene toplinske vodljivosti unutar materijala ukoliko su prisutni defekti unutar materijala. Koristi se za tanke dijelove jer defekti koji su udaljeni od površine stvaraju manje promjene toplinske vodljivosti. Prednosti termografije su mogućnost ispitivanja velikih površina te provođenje ispitivanja na dijelovima gdje je samo jedna strana dostupna za ispitivanje. Nedostatak termografije je u skupoj opremi te kao i kod ultrazvučnog ispitivanja rezultati ovise o osobi koja provodi ispitivanje.
- **Radiografija** je najkorištenija metoda nerazornog ispitivanja. Različite vrste radiografije omogućavaju provođenje ispitivanja na širokom spektru uzoraka. Budući da je radiografijom provedeno ispitivanje ovog rada ona će se detaljnije prikazati u slijedećem poglavlju.
- **Elektromagnetska ispitivanja** kao što sam naziv kaže koriste magnetizam i elektricitet kako bi identificirali i mjerili lomove, greške, koroziju ili ostala stanja materijala. Tijekom ispitivanja inducira se električno polje, magnetsko polje ili oboje te se promatra elektromagnetski odziv materijala. U elektromagnetske metode spadaju Eddy Current (EC) i Magnetic Flux Leakage (MFL).
- **Akustična ispitivanja** detektiraju defekte u materijalu temeljene na mehaničkim vibracijama koje ti defekti stvaraju. Valovi, generirani defektima, šire se koncentrično, a otkriva ih visoko osjetljivi niz piezoelektrika. Samo neke od prednosti su visoka osjetljivost, brza ispitivanja, trajni postav za ispitivanje te mogućnost otkrivanja različitih oštećenja. Međutim, nedostatak je izuzetno složen proces povezivanja emitiranih zvučnih podataka s vrstom oštećenja.
- **Lasersko ispitivanje (eng. *Shearography Testing*)** je optička metoda. Prednost laserskog ispitivanja je manja osjetljivost na vanjske utjecaje. Najveći nedostatak predstavljaju velike poteškoće pri otkrivanju oštećenja koja nisu raslojavanje.

4. RADIOGRAFIJA

Radiografija je tehnika snimanja koja koristi ionizirajuća zračenja (npr. X- ili γ -zrake) i neionizirajuća zračenja za dobivanje uvida u unutrašnje stanje promatranog objekta. Primjena radiografije uključuje medicinske i industrijske svrhe. Postupak dobivanja slike započinje generiranjem zraka i usmjeravanjem istih prema objektu. Ovisno o gustoći i strukturi objekta dio zračenja apsorbira objekt. Ostatak zraka, koje su prošle kroz objekt, sakuplja detektor. Ovisno o korištenoj metodi radiografije moguće je dobiti dvodimenzijske slike ili trodimenzijske prikaze objekata [14]. Budući da je moguće promatrati unutrašnjost mjernog objekta, radiografija postaje najkorišteniji oblik nerazornog ispitivanja. Postoje različite vrste radiografskih ispitivanja, a svaka od njih posjeduje određene specifičnosti. Radiografiju je moguće podijeliti na:

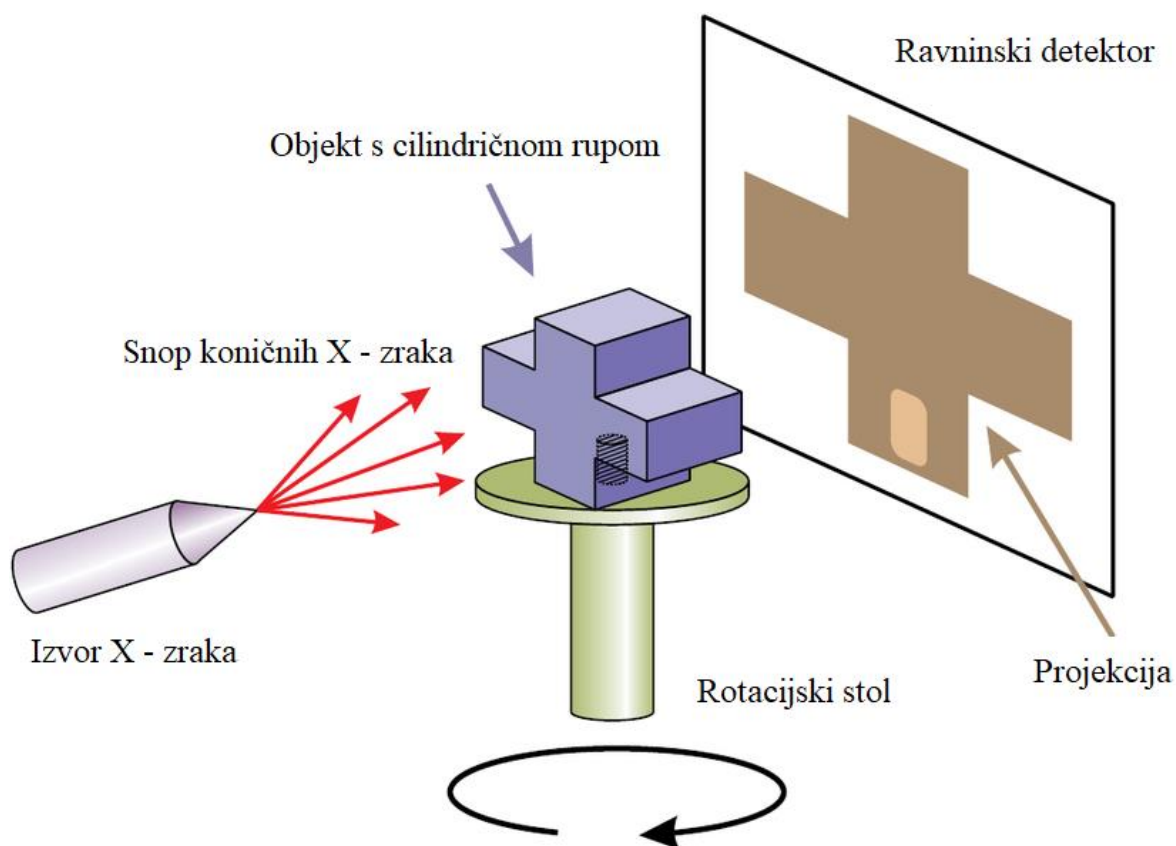
- filmsku radiografiju,
- računalnu radiografiju,
- digitalnu radiografiju i
- računalnu tomografiju.

Radiografski film sastoji se od prozirne baze, čije su obje strane premazane emulzijom. Emulzija sadrži kristale srebra osjetljive na zračenje, kao što su srebrovi bromidi ili srebrovi kloridi. Prolaskom zrake dolazi do reakcije među ionima te stvaranja latentne (skrivena) slike. Proces razvijanja filma strogo je kontroliran uvjetima kao što su temperatura, vrijeme, kemijska koncentracija, te zbog toga zahtjeva visok stupanj kontrole kvalitete. Računalna radiografija koristi kazete, u kojima se nalazi foto osjetljivi fosfor. Foto osjetljivi fosfor apsorbira emitiranu energiju te također stvara latentnu sliku. Čitač prihvata cijelu kazetu te ju skenira u kratkom vremenskom periodu, obično 45 do 60 sekundi te stvara digitalnu sliku. Prednost ove metode je ponovna upotreba kazeta. Digitalna radiografija, putem detektora, skuplja podatke tijekom ispitivanja i automatski ih šalje u računalno bez posrednika [15]. Računalna tomografija (eng. *Computed Tomography* – CT) korištena je tijekom identifikacije oštećenja u ovom radu te će biti prikazana u slijedećem podpoglavlju.

4.1. Računalna tomografija

Prva industrijska primjena CT skenera dogodila se tijekom 1980-ih na području nerazornih ispitivanja. Zahvaljujući velikim napredcima software-a i hardware-a, današnji CT predstavlja

moćnu i široko korištenu metodu neraznogog ispitivanja, a koja je sposobna ispitivati kako vanjsku tako i unutarnju strukturu uzorka. CT skener sastoji se od izvora X-zraka, rotacijskog stola, detektora X-zraka i računalne jedinice koja procesira, vizualizira te analizira podatke (Slika 15.). Kako bi dobio digitalnu sliku objekta CT bilježi projekcije promatranih presjeka emitiranjem fotona kroz ravninu objekta pod određenim kutom. Prolaskom X-zraka, odnosno emitiranih fotona kroz objekt dio zraka je apsorbiran, dio reflektiran, a dio prolazi kroz sami objekt. Budući da se dio emitiranih zraka reflektira, a dio apsorbira dolazi do reduciranja intenziteta emitiranog zračenja, taj proces naziva se atenuacija (slabljenje). Zrake koje su oslabljene, zbog interakcije s objektom, ne dolaze do detektora. Zračenje (fotoni) koje prođe kroz objekt, pod različitim kutovima, sakuplja detektor. Odgovarajuće računalo vizualizira zračenje skupljeno na detektoru te pomoću različitih matematičkih modela rekonstruira skenirani objekt.



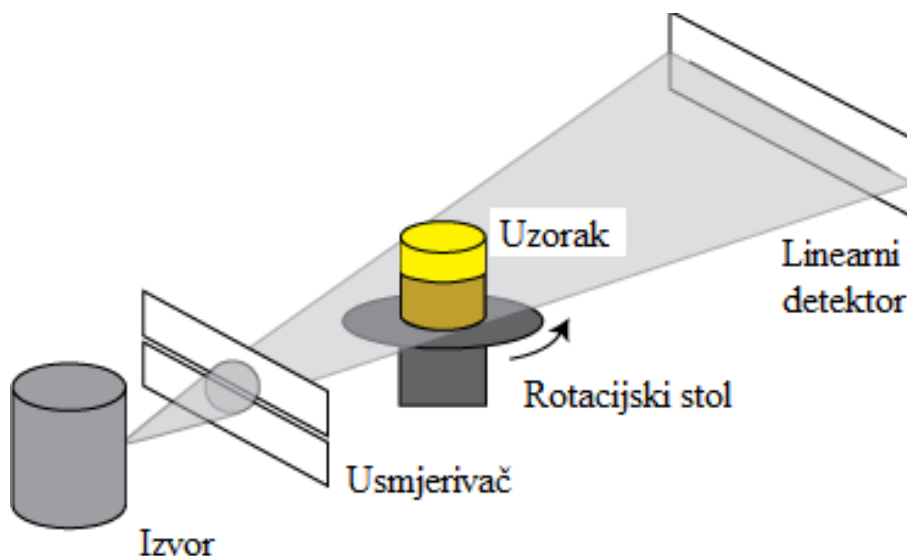
Slika 15. Shematski prikaz postava CT skenera [16]

Generalizirani proces skeniranja nekog objekta može se podijeliti u šest koraka:

1. Prvi korak predstavlja skeniranje objekta. Prije samog skeniranja potrebno je podesiti glavne parametre, kao što su orijentacija objekta, energija izvora, pojačanje, integracijsko djelovanje detektora.

2. Nakon skeniranja i prikupljanja 2D projekcija, rekonstruira se volumen. Volumen se modelira kao 3D matrica voxela (tj. volumetrički pixeli), gdje svaka vrijednost voxela predstavlja odgovarajući koeficijent lokalne atenuacije (slabljenja). Odnosno, svakom voxelu dodijeljena je vrijednost sive skale ovisno o gustoći apsorpcije X-zraka.
3. Pretvaranje vrijednosti sive skale boja u binarne kako bi se razlikovala crna površina i granica objekta. Određena je rekonstruirana geometrija.
4. Generiranje površinskih i volumenskih podataka.
5. Provođenje mjerenja dimenzija na površini ili volumenu.
6. Dobivanje rezultata mjerenja.

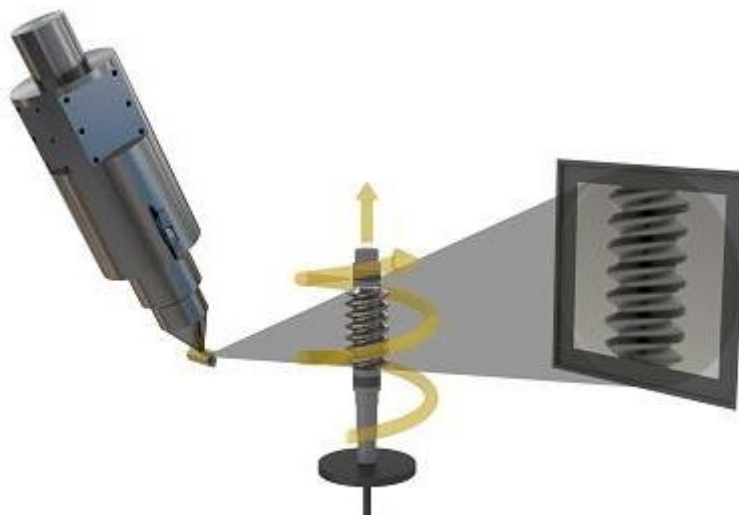
U industrijskoj primjeni susreću se dvije glavne vrste CT skenera. To su 2D i 3D CT skeneri. 2D skener, Slika 16., karakterizira linijski detektor i ravninski izvor zračenja. Prilikom skeniranja uzorka, primjenom 2D CT skenera, on se istovremeno rotira i translacija te snima jedan presjek. Ovisno o broju potrebnih presjeka proces se ponavlja. Negativna posljedica ovakvog pristupa je dugotrajnost postupka skeniranja. Problem dugotrajnih snimanja kod 2D CT skenera riješen je primjenom 3D CT skenera.



Slika 16. Shematski prikaz postava 2D CT skenera [17]

3D CT skeneri sastoje se od ravninskog detektora i konusnog izvora zračenja. Slika 15. predstavlja shematski prikaz postava 3D CT skenera. Primjenom 3D CT skenera izbjegava se potreba za translacijom objekta skeniranja. Najveća prednost 3D CT skenera u odnosu na 2D je vrijeme trajanja snimanja, koje je značajno skraćeno budući da se kompletna slika objekta dobiva jednim okretom rotacijskog stola. Međutim, zbog konusnog izvora zračenja dolazi do nesavršenosti rekonstruiranog 3D volumena. Primjenom konusnog izvora zračenja dolazi do

rasipanja zračenja u blizini rubova što rezultira smanjenom kvalitetom rekonstruirane geometrije. Kvaliteta rekonstruirane geometrije opada što je veća udaljenost promatranog dijela objekta od centra tog istog objekta. Posljednja inovacija na području 3D skeniranja je spiralno skeniranje, Slika 17. Tijekom ovog skeniranja uz rotaciju objekta istovremeno se vrši i translacija objekta duž rotacijske osi. Prednosti koje se posljedično javljaju su veća dužina skeniranog objekta, ali i smanjeno rasipanje zračenja čime dolazi do izjednačavanja rezolucije u rubnim i središnjim dijelovima promatranog objekta [18].



Slika 17. Postav 3D CT skenera sa spiralnim principom skeniranja

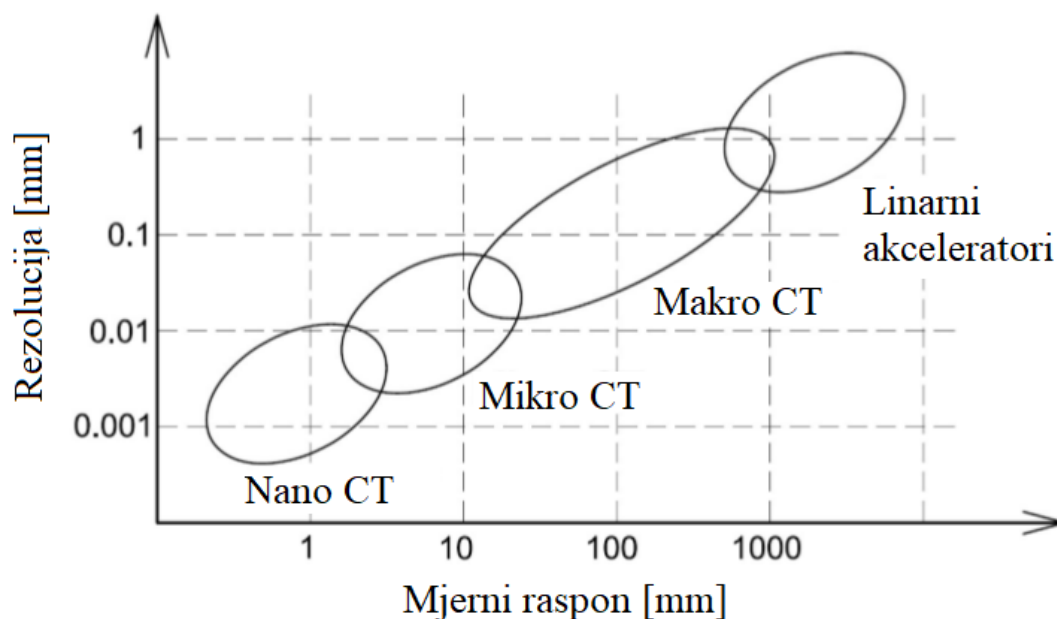
4.2. Podjela industrijskih CT skenera

Industrijske CT skenere moguće je podijeliti u slijedeće četiri grupe:

- linearne akceleratora,
- makro CT,
- mikro CT i
- nano CT.

Podjela CT skenera temeljena je na rezoluciji koju je moguće postići, mjernim rasponom i veličini fokusne točke. Prema Slika 18. vidljivo je kako se nano i mikro CT uređaji upotrebljavaju za mjerenje manjih objekata, veličine ispod 1 mm pa sve do veličine iznad 10 mm. Rezolucije kod ovih uređaja kreću se u rasponu od 0,001 do 0,1 mm. Makro CT uređaji koriste se za veće objekte, čije dimenzije se kreću u rasponu od 10 do 1000 mm. Rezolucija makro CT uređaja kreće se u rasponu od 0,01 do 1 mm. Kod mikro CT uređaja, ispitni uzorci

se postavljaju u blizini fokusa budući da ti uređaji mogu imati izvor zračenja s malim veličinama fokusnih točaka [18].



Slika 18. Prikaz ovisnosti rezolucije o rasponu mjerenja za industrijske CT skenere [18]

4.3. Primjena CT-a

Primarnu industrijsku primjenu CT-a predstavljaju nerazorna ispitivanja i ispitivanja strukture materijala. Slijedeći primjer primjene CT uređaja je automobilska industrija, gdje se koristi za inspekciju postupka lijevanja kao i za kontrolu kvalitete komponenata kao što su blokovi motora, mjenjači i ostali. Taj postupak omogućava detektiranje vrlo malih odstupanja u gustoći materijala. Osim što omogućava otkrivanje oštećenja današnji CT skeneri pružaju informacije o veličini i rasporedu tih oštećenja. Primjenom CT skenera u ranim fazama proizvodnje mogu se otkriti nedostaci određenog proizvoda, što kasnije rezultira povećanjem produktivnosti i kvalitete. Budući da podaci dobiveni CT-om sadrže kompletnu sliku volumena promatranog objekta na istom je moguće provesti i dimenzijska mjerenja [18].

U nastavku su navedena različita industrijska područja u kojima se primjenjuje CT nerazorna metoda ispitivanja:

- znanost o materijalima,
- elektronika,
- vojna industrija,
- medicina,
- arheologija,

- zrakoplovstvo,
- automobilska industrija.

Primjena CT-a zasigurno pruža mnogo prednosti u odnosu na druge metode ispitivanja. Kao što je više puta navedeno, najbitnija prednost ove metode je ta što omogućava nerazorno ispitivanje objekata. Pruža uvid u unutarnju i vanjsku strukturu objekta bez oštećivanja istog. U vrlo kratkom vremenu donosi mnogo informacija. Međutim, javljaju se nedostaci ove metode koji utječu na kvalitetu rekonstruiranog 3D skena (npr. kompleksni i brojni faktori snimanja) kod kojeg su registrirane mjerne nesigurnosti koje se vrlo teško mogu pratiti. Osim toga, nemoguće je idealno podesiti parametre skeniranja ispitnog uzorka izrađenog iz više različitih materijala. Problemi se javljaju i prilikom snimanja objekata iz više različitih materijala.

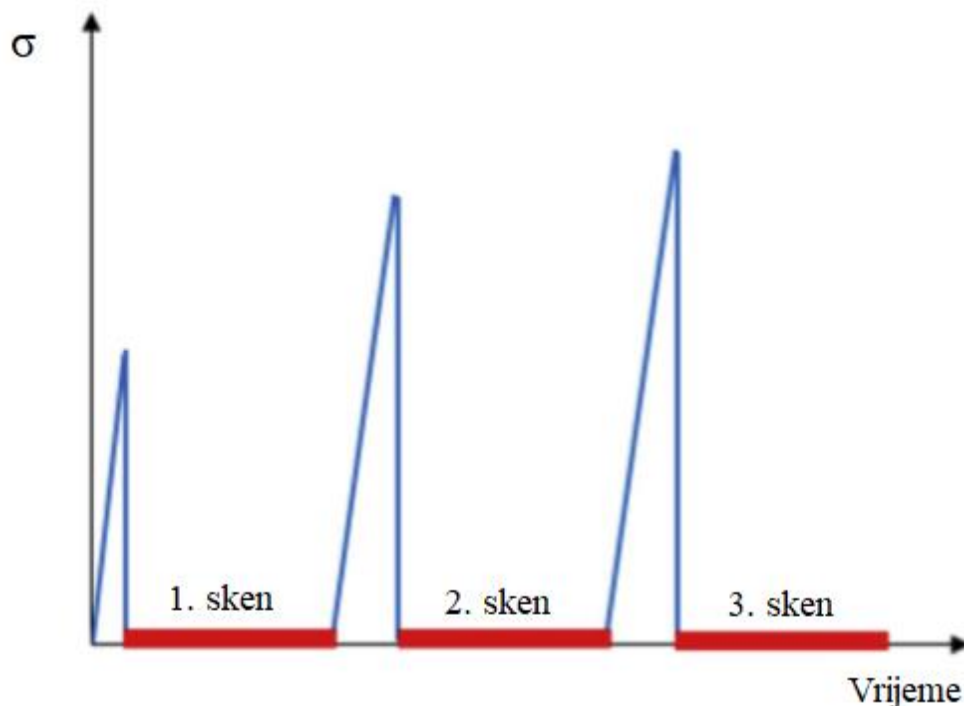
4.4. Mehanička ispitivanja

Budući da je moguće zabilježiti vanjske i unutrašnje karakteristike materijala registriranjem 3D skenova, CT metode pronalaze primjenu i u području eksperimentalne mehanike. Povezivanjem mehaničkih ispitivanja i CT nerazorne metode omogućilo je dobivanje potpunog odziva materijala uslijed narinutnog opterećenja. Ovisno o očekivanom ponašanju materijala dolazi do razvoja različitih eksperimentalnih protokola koji se primjenjuju kod sprega mehaničkih ispitivanja i CT skeniranja ispitnog uzorka. Budući da se određeni fenomeni u materijalu javljaju u ovisnosti o režimu i vremenu opterećenja, te broju ponavljanja tih opterećenja, moguće je pouzdano definirati uvjete koji simuliraju nastanak specifičnih mehanizama u materijalu. U sljedećem poglavlju su prezentirani karakteristični ex- i in-situ protokoli mehaničkih ispitivanja primjenom laboratorijskog CT skenera.

4.4.1. Ex-situ ispitivanja

Ex-situ ispitivanja predstavljaju najprimjereniji i najjednostavniji način provođenja mehaničkih ispitivanja uz pomoć CT skenera. Navedena nerazorna ispitivanja provode se u neopterećenom stanju ispitnog uzorka. Slika 19. prikazuje karakteristični eksperimentalni protokol ex-situ mehaničkog ispitivanja. Režim opterećenja odgovara cikličkoj krivulji kod koje je mehaničko opterećenje najčešće narinutno na vanjskom (tj. eksternom) ispitnom uređaju (tj. van CT skenera). Nakon dosezanja zadanog nivoa opterećenja, ispitni uzorak je rasterećen te je provedena registracija 3D volumena u za to predviđenom CT uređaju. Skeniranje ispitnog uzorka u rasterećenom stanju može uzrokovati zanemarivanje određenih promjena (tj. fenomena) koji se javljaju tijekom ispitivanja, primjerice zatvaranja mikropukotina uslijed

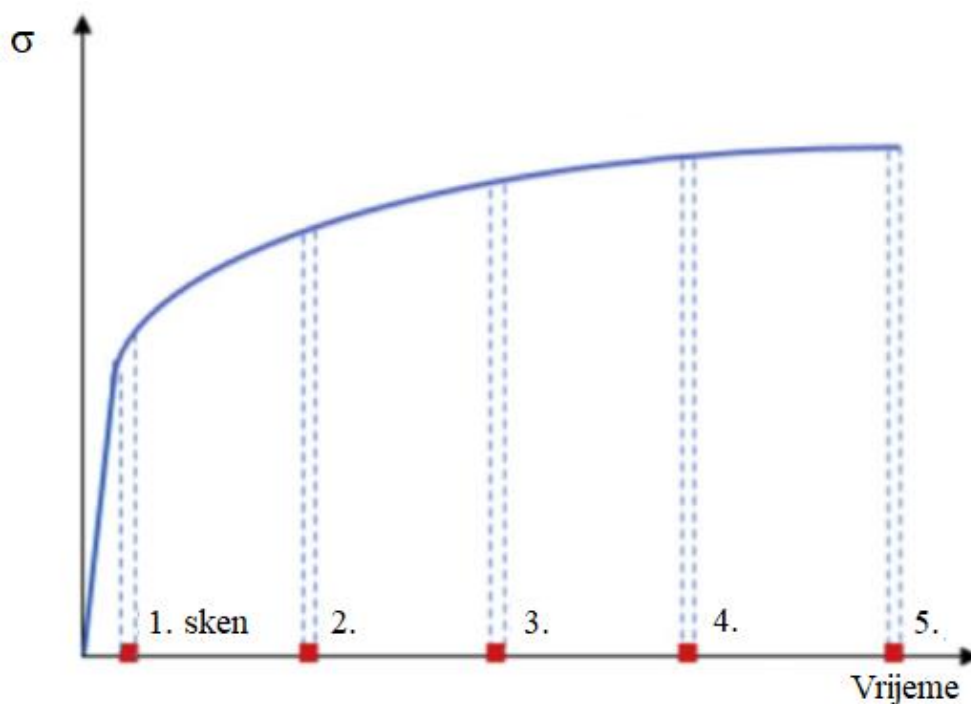
rasterećenja. Međutim, trajne promjene ispitnog uzorka izrađenog iz konvencionalnih inženjerskih materijala, kao što su plastičnost (tj. nelinearnost odziva) ne doživljavaju značajnije promjene prilikom rasterećenja uzorka. Kod ex – situ ispitivanja opterećenje ne mora nužno biti mehaničko, već se mogu ispitivanja provoditi i uslijed drugih vrsta opterećenja [19].



Slika 19. Karakteristični eksperimentalni protokol ex–situ mehaničkog ispitivanja [22]

4.4.2. In–situ ispitivanja

Za razliku od ex–situ ispitivanja prilikom in–situ ispitivanja uzorak je skeniran dok je na njega narinuto opterećenje (Slika 20.), skeniranje se obavlja u nekoliko vremenskih intervala, pri određenim razinama mehaničkog opterećenja, unutar ciklusa mehaničkog ispitivanja. Predloženi eksperimentalni protokol zahtjeva dizajniranje odgovarajućih ispitnih uređaja (tj. kidalica) koji su smješteni unutar CT skenera. S obzirom na način provođenja ispitivanja jedan od ključnih zahtjeva je da ispitni uređaj na zaklanja niti jednu projekciju X–zraka. In–situ ispitivanja posjeduju određene prednosti, ali u slučaju dugotrajnih ispitivanja ili kompleksnijih režima opterećivanja, ex–situ ispitivanja ipak imaju prednost [19].

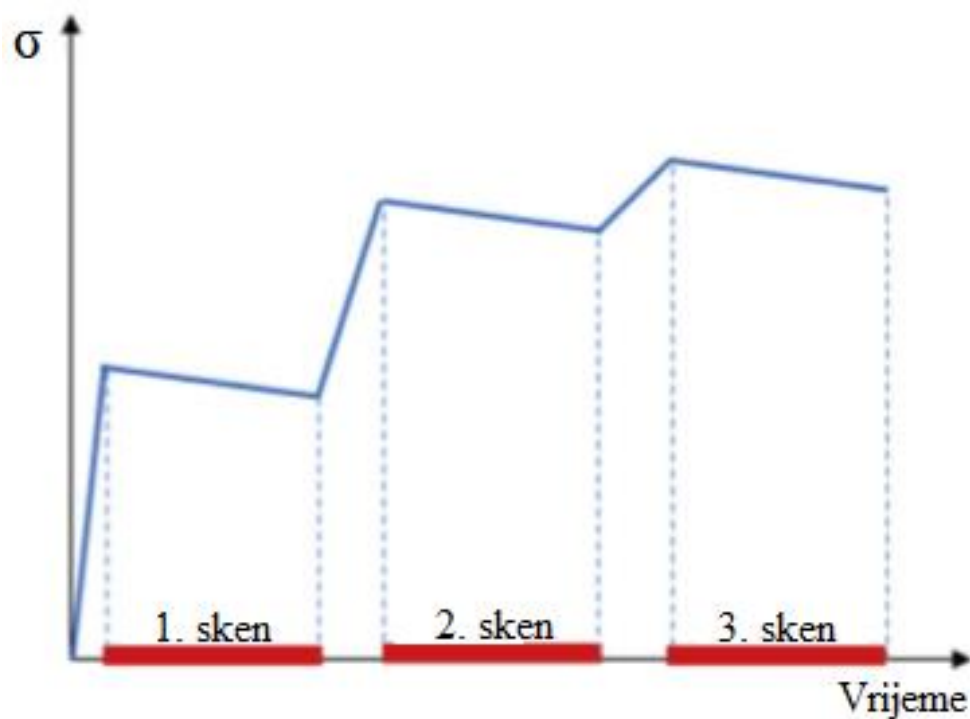


Slika 20. Karakteristični eksperimentalni protokol in-situ mehaničkog ispitivanja [22]

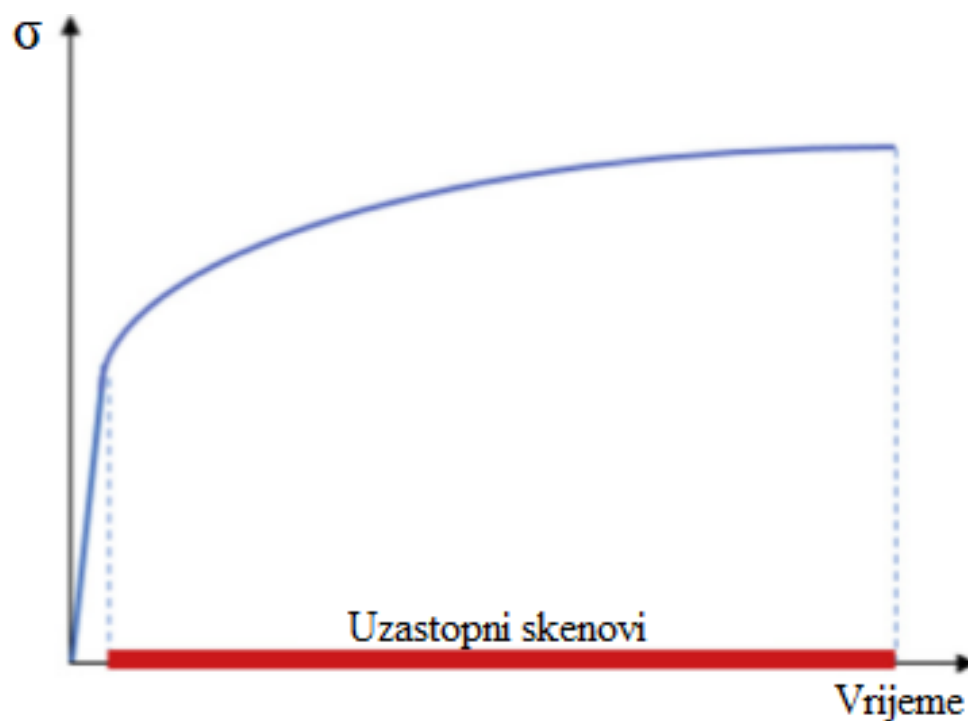
4.4.3. Isprekidano i kontinuirano ispitivanje

Kod većine mehaničkih ispitivanja promatranih CT skenerom dolazi do prekidanja režima opterećivanja što može rezultirati relaksacijom materijala. Navedena pojava može se izbjeći korištenjem kidalica povišene krutosti. Prilikom promatranja određenih fenomena unutar strukture materijala, koji zavise o vremenu, potrebno je prekinuti ispitivanje kako bi se taj fenomen mogao opisati. Dijagram isprekidanog ex-situ ispitivanja prikazan je na Slika 19., a dijagramski prikaz isprekidanog in-situ ispitivanja prikazan je na Slika 21. Tijekom provođenja isprekidanog in-situ mehaničkog ispitivanja dolazi do zaustavljanja narinutog mehaničkog opterećenja pri određenim iznosima kako bi se obavilo skeniranje ispitnog uzorka. Budući da se skeniranje ispitnog uzorka obavlja unutar CT skenera, ispitni uzorak se ne skida s ispitnog uređaja (tj. kidalice) te ne dolazi do relaksacije materijala što je slučaj kod ex-situ mehaničkog ispitivanja. Za razliku od isprekidanih mehaničkih ispitivanja postoje i kontinuirana mehanička ispitivanja. Slika 22. prikazuje karakteristični eksperimentalni protokol kontinuiranog in-situ mehaničkog ispitivanja. Tijekom kontinuiranih mehaničkih ispitivanja ne dolazi do prekidanja ispitivanja, točnije skeniranje ispitnog uzorka odvija se tijekom cijelog ciklusa primjene mehaničkog opterećenja. Razlika u odnosu na karakteristično in-situ mehaničko ispitivanje, opisano u podpoglavlju 4.4.2, je u tome što se tijekom kontinuiranog ispitivanja skeniranje ispitnog uzorka obavlja tijekom cijelog ciklusa ispitivanja dok se kod karakterističnog in-situ mehaničkog ispitivanja skeniranje ispitnog uzorka obavlja samo u određenim vremenskim

intervalima ciklusa ispitivanja (tj. samo u određenim trenucima). Kontinuirano mehaničko ispitivanje skraćuje ukupno vrijeme trajanja mehaničkog ispitivanja.



Slika 21. Karakteristični eksperimentalni protokol isprekidanog in-situ mehaničkog ispitivanja [22]



Slika 22. Karakteristični eksperimentalni protokol kontinuiranog in-situ mehaničkog ispitivanja [22]

5. KORELACIJA DIGITALNIH VOLUMENA

Korelacija digitalnih volumena (eng. *Digital Volume Correlation* – DVC) je beskontaktna optička metoda koja omogućava određivanje cijelog polja pomaka, uslijed narinutog mehaničkog opterećenja, na promatranom volumenu interesa. Nakon određivanja polja pomaka na volumenu interesa moguće je izračunati polje deformacija i mape korelacijskih reziduala. DVC metoda nadovezuje se na metodu korelacije digitalne slike (eng. *Digital Image Correlation* – DIC) koja predstavlja jednu od najprimjenjivanijih optičkih metoda mjerenja u području eksperimentalne mehanike. Prednost DVC metode u odnosu na DIC metodu je u tome što ona pruža mogućnost mjerenja cijelog polja pomaka na 3D prostoru. Princip rada DVC metode jednak je principu rada DIC metode, razlika je u tome što DVC metoda može mjeriti prostorne pomake dok je DIC metoda ograničena na ravninske pomake. Prije nego što se primjeni mehaničko opterećenje na ispitni uzorak snima se referentna slika promatranog volumena. Tijekom i nakon primjenjivanja mehaničkog opterećenja također se snimaju slike, koje su sada deformirane slike promatranog volumena. Primjenom složenih korelacijskih algoritama, koji uspoređuju referentnu i deformiranu sliku promatranog volumen, određuju se pomaci koji su nastali tijekom opterećivanja ispitnog uzorka. Mjerenjem ukupne kinematike tijekom mehaničkih ispitivanja dobivaju se korisne informacije o ponašanju materijala što uključuje analizu lokalizacijskih fenomena tijekom narinutog opterećenja. Za mjerenje 3D pomaka potrebni su optički sustavi koji su mnogo složenijih od sustava koji se koriste primjenom DIC metode. Eksperimentalna metoda DVC-a konstantno se razvija te optimizira u vidu brzine i pouzdanosti. Prvi prijedlog ove metode dali su autori Bay *et. al.*, 1999.godine [20]. DVC metodi moguće je pristupiti na dva načina, lokalno i globalno.

5.1. Lokalni pristup

Nakon što je određen volumen interesa koji će se promatrati i snimljena njegova referentna slika, volumen interesa je potrebno podijeliti. Volumen interesa dijeli se na manja polja voxela, koja se nazivaju podvolumenima, te se nad njima provodi metoda korelacije digitalnih volumena. Princip DVC-a temelji se na očuvanju intenziteta sive skale na oba volumena:

$$f(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})) , \quad (1)$$

gdje f predstavlja raspodjelu vrijednosti sive skale na referentom, a g raspodjelu vrijednosti sive skale na deformiranom volumenu. U jednadžbi (1) $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ predstavlja nepoznato polje pomaka. Razlika između raspodjele vrijednosti sive skale na referentnoj i deformiranoj slici naziva se rezidual. Kako bi pronašli nepoznato polje pomaka potrebno je minimizirati sumu kvadrata razlike φ_c^2 :

$$\varphi_c(\mathbf{x}) = |g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})) - f(\mathbf{x})|, \quad (2)$$

gdje $\varphi_c(\mathbf{x})$ definira polje korelacijskih reziduala. Lokalni pristup promatra podvolumene (tj. podskupove voxela) neovisno jedan o drugome što dovodi do zaključka da nije zadovoljen kontinuitet pomaka. Integracijom nad podvolumenima interesa (tj. zonama interesa, eng. *Zone of Interest* – ZOI), korelacijski reziduali ϕ_c^2 su:

$$\phi_c^2 = \int_{ZOI} [g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})) - f(\mathbf{x})]^2 d\mathbf{x}, \quad (3)$$

u kojem se polje pomaka prikazuje u slaboj formi, zbog nezadovoljenja kontinuiranosti pomaka, kao:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_n u_n \boldsymbol{\psi}_n(\mathbf{x}), \quad (4)$$

gdje $\boldsymbol{\psi}_n$ predstavlja funkcije oblika, a u_n pripadne stupnjeve slobode. Lokalni pristup zbog svoje efikasnosti, jednostavne implementacije i relativno visoke preciznosti vrlo često je u primjeni.

5.2. Globalni pristup

Globalnim pristupom DVC metodi također se provodi diskretizacija volumena interesa na podskupove voxela. Međutim, globalnim pristupom diskretizirani podskupovi voxela promatraju se zavisno jedan o drugome te je zadovoljen kontinuitet polja pomaka. Mjerne točke nalaze se u vrhovima elemenata. Globalni pristup temelji se, kao i lokalni, na zakonu konzervacije optičkog toka, prema izrazu (1). U idealnom slučaju razlika intenziteta raspodjele sive skale na referentnoj i deformiranoj slici bila bi jednaka nuli. Međutim u realnim inženjerskim problemima nikada se ne dobiva potpuno preklapanje između referentne i

deformirane slike. Zbog toga se provodi minimizacija dobivenih reziduala, izraz (2), kako bi se dobivena greška svela na minimalan iznos. Globalnim pristupom DVC-u, korelacijski reziduali Φ_c^2 računaju se na cijelom volumenom interesa (eng. *Volume of Interest* – VOI):

$$\Phi_c^2 = \int_{VOI} [g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})) - f(\mathbf{x})]^2 d\mathbf{x}, \quad (5)$$

u kojem je polje pomaka kontinuirano, jednake formulacije kao i kod lokalnog pristupa, prema izrazu (4). Funkcije oblika $\Psi_n(\mathbf{x})$ povezuju mjerenje pomaka s numeričkim modelima. U ovom radu korišteni su C8 konačni elementi s prostornim funkcijama oblika. Newtonovim iterativnim postupkom zaobilaze se nelinearnosti ovog problema. Pomak pri svakoj iteraciji označen je s $\mathbf{u}^i$, a vektor koji sadrži sve nepoznate stupnjeve slobode s $\{\mathbf{u}\}^i$. Pretpostavljeni su mali inkrementi:

$$d\mathbf{u} = \mathbf{u}^{i+1} - \mathbf{u}^i. \quad (6)$$

Parcijalna derivacija izraza (5) po traženim pomacima dovodi do izraza (7), čije iterativno rješavanje rezultira traženim poljem pomaka:

$$\frac{\delta \Phi_c^2}{\delta \{\mathbf{u}\}^i} = [\mathbf{M}]\{d\mathbf{u}\} - \{\mathbf{b}\}^i = \{\mathbf{0}\}. \quad (7)$$

Gdje za izraz (7) vrijedi:

$$M_{mn}^i = \int_{VOI} [\nabla f(\mathbf{x}) \cdot \Psi_m(\mathbf{x})][\nabla f(\mathbf{x}) \cdot \Psi_n(\mathbf{x})] d\mathbf{x}, i \quad (8)$$

$$b_m^i = \int_{VOI} \nabla f(\mathbf{x}) \cdot \Psi_m(\mathbf{x}) \left(f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x} + \mathbf{u}^i(\mathbf{x})) \right) d\mathbf{x}. \quad (9)$$

DVC matrica $[\mathbf{M}]$ sastoji se od gradijenata sive skale i funkcija oblika, što je vidljivo u izrazu (8). Vektor $\{\mathbf{b}\}^i$ u sebi sadrži razliku između referentne slike i korigirane deformirane slike nad kojom se vrši korekcija u ovisnosti o iznosu pomaka $\mathbf{u}$, prema izrazu (9).

S obzirom da globalni pristup DVC metodi promatra podskupove voxela zavisno jedne o drugima, zadovoljen je uvjet kontinuiteta pomaka. Stoga, rezultati dobiveni globalnim pristupom DVC-u pouzdaniji su od rezultata dobivenih lokalnim pristupom DVC-u. Međutim, složeniji su za implementaciju i zahtijevaju duže vrijeme za izračun. Lokalni pristup DVC metodi češće je u primjeni i zbog toga što je poznat desetak godina duže od globalnog pristupa.

6. EKSPERIMENT

U ovom radu proveden je eksperiment čiji je zadatak bio identifikacija oštećenja u kompozitima ojačanim staklenim vlaknima. Pravokutna kompozitna ploča debljine 5 mm iz koje je izrađen ispitni uzorak prikazana je na Slika 12. Ispitni uzorak koji je korišten pri ispitivanju prikazan je na Slika 23. Radijus zaobljenja mjernog područja ispitnog uzorka iznosi 48 mm dok širina ligamenta iznosi 6 mm. Kako bi utvrdili globalne parametre korištenog kompozitnog materijala provedeno je jednoosno monotono te cikličko mehaničko ispitivanje.

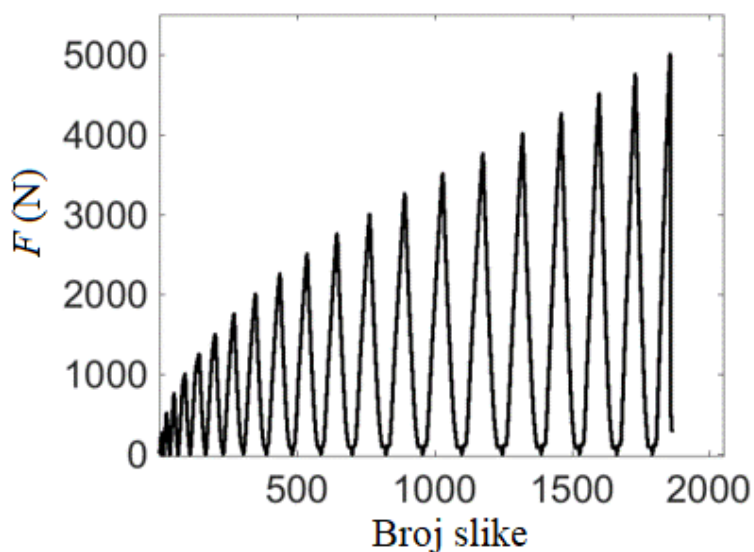


Slika 23. Jednoosni ispitni uzorak

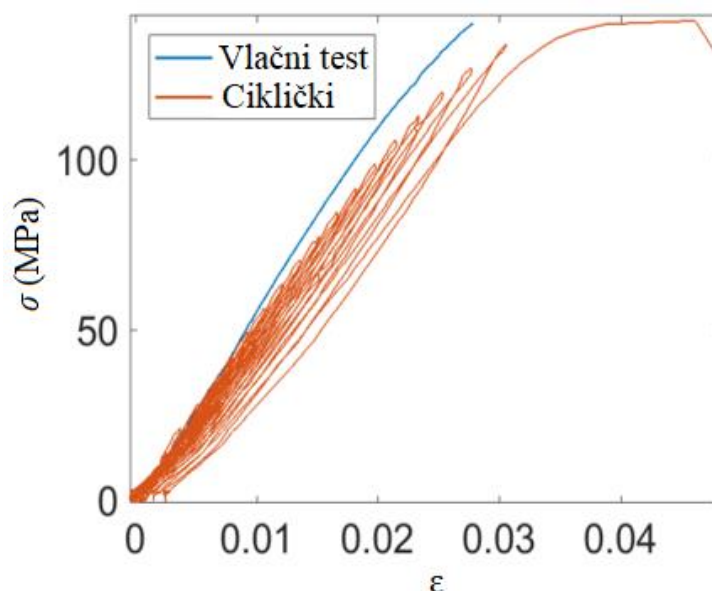
6.1. Jednoosno monotono i cikličko mehaničko ispitivanje

Jednoosni monotoni i ciklički eksperiment provedeni su na elektromehaničkoj kitalici. Ispitivanje je provedeno u kontroli pomaka s brzinom opterećivanja od 1 mm/s. Za mjerenje pomaka korišten je klasični optički postav za mjerenje cijelog polja pomaka kod kojeg je korištena telecentrična leća s povećanjem $\times 4$. Slike su bilježene brzinom od 1 fps. Veličina jednog piksela odgovara fizikalnoj veličini od 12.9 μm , dok je veličina područja interesa dimenzija 18 $\times$ 13.5 mm. Ciklički eksperiment proveden je s istim parametrima, a s ciljem kako bi se kvantificirao rast oštećenja. Svakim ciklusom opterećenje se povećavalo za iznos od 250 N. Ukupno je provedeno 20 ciklusa. Krivulja opterećenja tijekom cikličkog ispitivanja ispitnog uzorka prikazana je na Slika 24. Prema globalnom odzivu materijala (Slika 25), izmjenom primjenom DIC metode na odabranom području interesa, određeni su globalni parametri kompozitnog materijala:

- Youngov modul $E = 5,6 \text{ GPa}$,
- Vlačna čvrstoća $\sigma_m = 140 \text{ MPa}$.



Slika 24. Krivulja cikličkog opterećenja jednoosnog ispitnog uzorka



Slika 25. $\sigma - \epsilon$ dijagram za provedeni monotoni i ciklički test

6.2. Ex – situ μ – tomografski eksperiment

Nakon utvrđivanja globalnih parametara materijala, provedeno je ex-situ eksperimentalno ispitivanje predloženog materijala primjenom laboratorijskog CT skenera. Protokol karakterističnog ex-situ eksperimentalnog ispitivanja prikazan je na **Pogreška! Izvor reference nije pronađen..** Naime, predloženo mehaničko ispitivanje se sastoji od klasičnog jednoosnog

cikličkog eksperimenta i tomografskog skeniranja. Tomografsko skeniranje provedeno je na industrijskom tomografu X50+ (North Star Imaging), prema Slika 26., s parametrima:

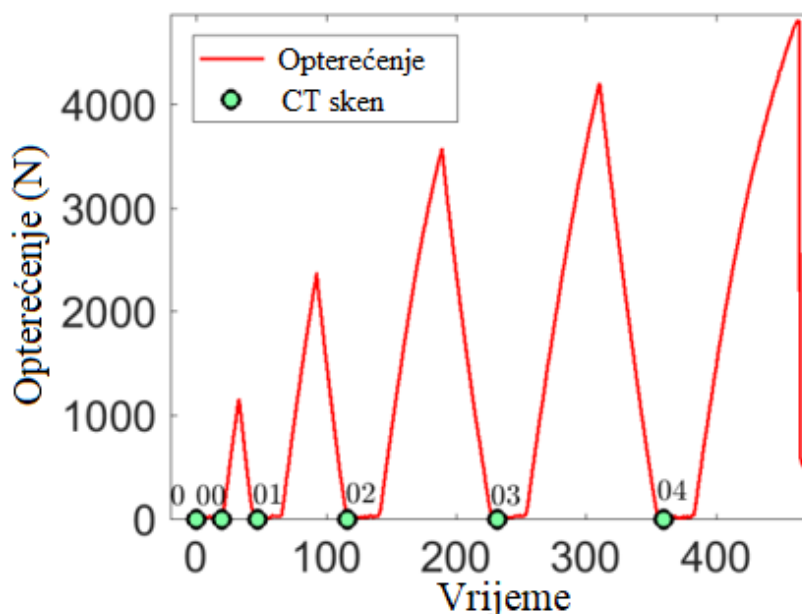
- napon zračenja = 120 kV i
- jakost struje = 100 μ A.



Slika 26. Industrijski tomograf X50+ (North Star Imaging)

Tijekom skeniranja, ispitni uzorak izvrši rotaciju od 360° . Ukupno vrijeme trajanja ozračivanja ispitnog uzorka iznosilo je 40 min, te je za rekonstrukciju jednog 3D volumena zabilježeno 800 radiografa. Rekonstruirani volumen imao je dimenzije $1447 \times 1446 \times 1789$ voxela, s fizikalnom veličinom jednog voxela od $10,9 \mu\text{m}$. Iz analize prethodno navedenog, cikličkog jednoosnog eksperimenta, odlučeno je kako će se provesti 5 skeniranja u neopterećenom stanju nakon što je na uzorak narinuto opterećenje koje odgovara 0%, 25%, 50%, 75% i 90% prethodno određene vlačne čvrstoće. Naime, kada bi iznos opterećenja postigao zadanu vrijednost, ispitni uzorak bi se rasteretio i skinuo s kidalice te postavio u CT skener kako bi se provelo skeniranje.

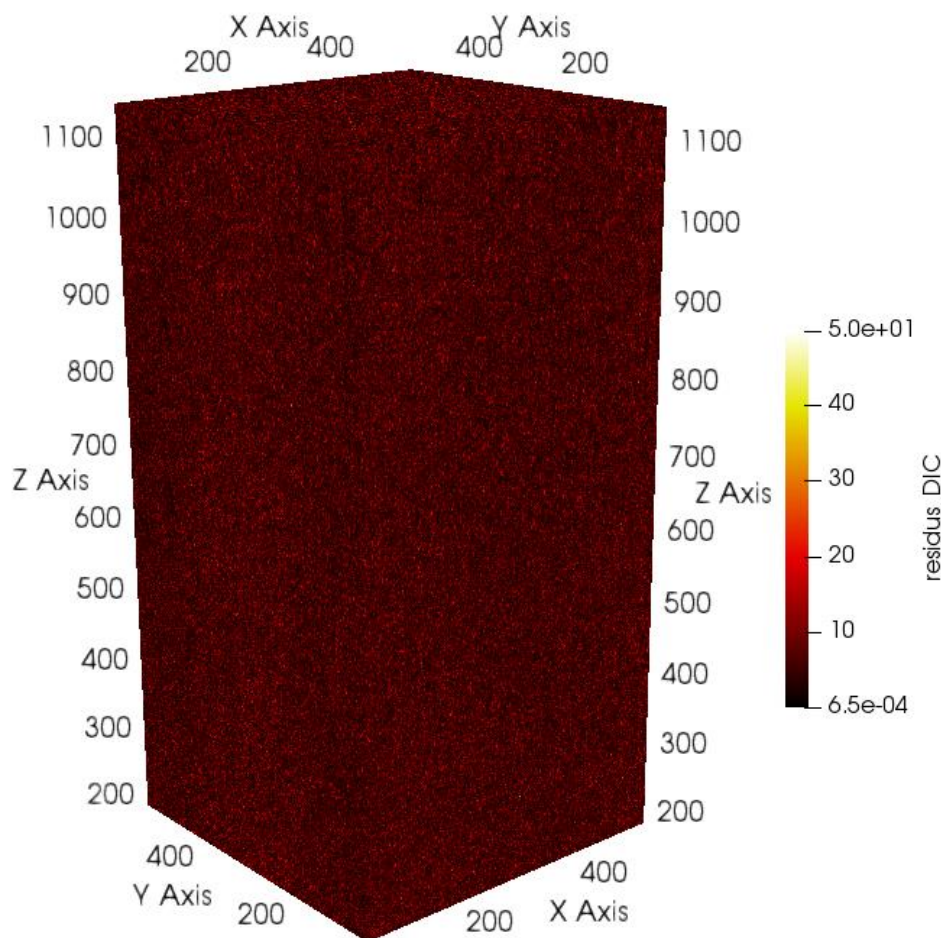
Na Slika 27. prikazan je dijagram provedenog ex-situ mehaničkog ispitivanja. Dijagram prikazuje kako su provedena dva inicijalna skeniranja ispitnog uzorka prije nego što je na isti narinutno mehaničko opterećenje. Skeniranje 0 i 00 provedeni su s ciljem određivanja standardne rezolucije pomaka i standardne rezolucije deformacija.



Slika 27. Provedeno ex-situ mehaničko ispitivanje s karakterističnim vremenom zabilježavanja 3D volumena

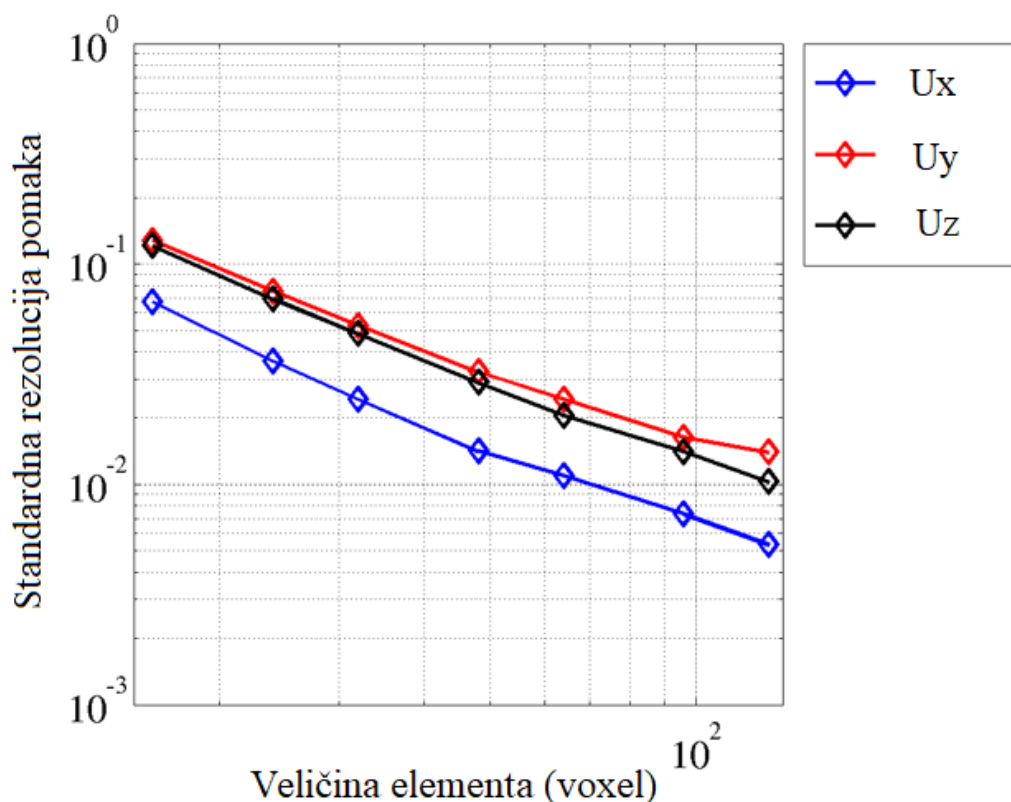
6.3. Standardna rezolucija pomaka i deformacija

Standardna rezolucija mjernog sustava je najmanja promjena mjerene veličine koju mjerni sustav može registrirati. Budući da je zadatak završnog rada bilo mjerenje polja pomaka i deformacija potrebno je odrediti standardne rezolucije pomaka i deformacije. Standardne rezolucije pomaka i deformacija omogućavaju definiranje pomaka i deformacija koji su posljedica narinutnog mehaničkog opterećenja (tj. definiranje mjerne nesigurnosti). Ispitni uzorak skeniran je dva puta prije nego je primijenjeno mehaničko opterećenje (Slika 27. skenovi 0 i 00). Mjerenjem polja pomaka i deformacija između navedenih skenova zabilježenih u neopterećenom stanju, te računanjem standardne devijacije određene su standardne rezolucije pomaka i deformacija. Na Slika 28. prikazani su dobiveni korelacijski reziduali na mreži elemenata veličine 96 voxela. Vrijednosti korelacijskih reziduala približno su jednake na cijelom promatranom volumenu. Budući da se radi o rezidualima koji su dobiveni u neopterećenom stanju može se zaključiti kako su oni posljedica šumova i mjernih nesigurnosti. To dovodi do zaključka da će reziduali koji su posljedica mehaničkog opterećenja i pojave mikropukotina biti većeg iznosa od reziduala uslijed šumova i mjernih nesigurnosti.



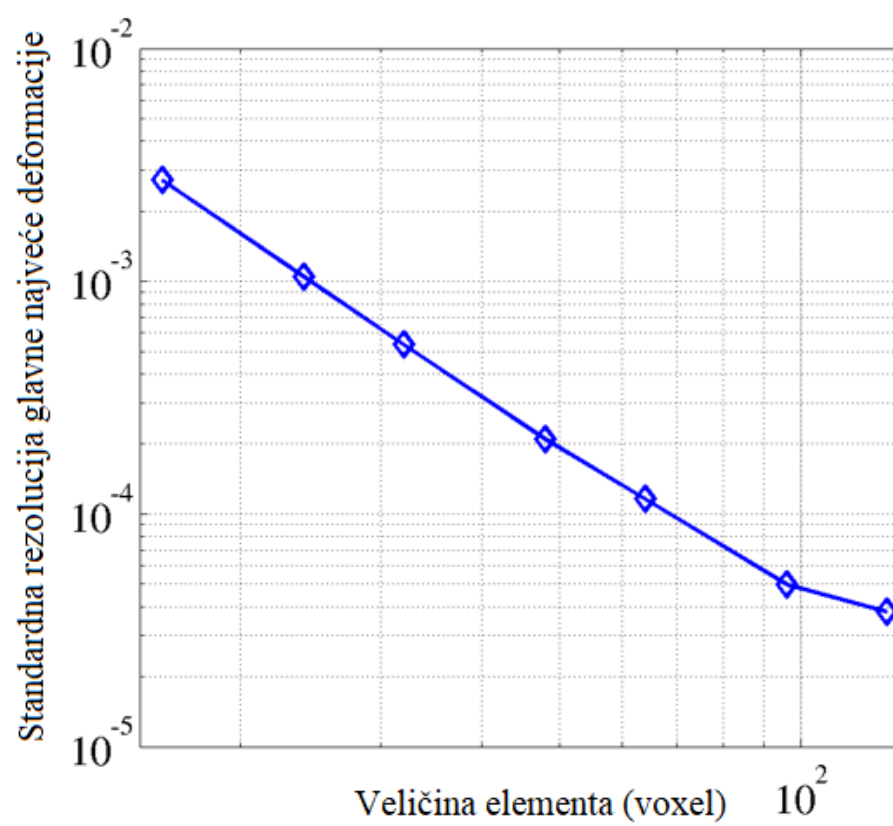
Slika 28. Korelacijski reziduali dobiveni na mreži konačnih elementa veličine 96 voxela.

Slika 29. prikazuje dobivene dijagrame standardne rezolucije pomaka u x , y i z smjeru promatranog volumena. Promjena standardne rezolucije prikazana je u ovisnosti o veličini konačnog elementa. Vidljivo je kako je vrijednost standardne rezolucije pomaka najmanja u smjeru osi x . Standardna rezolucija pomaka u smjeru osi y poprima najveće vrijednosti dok je vrijednost standardne rezolucije pomaka u smjeru osi z približno jednaka vrijednosti standardne rezolucije pomaka u smjeru osi y . Na temelju dobivenih dijagrama standardnih rezolucija pomaka moguće je zaključiti kako se korištenjem većih konačnih elemenata dobivaju manje standardne rezolucije. Naime, kod većih elemenata manji je utjecaji šumova i mjernih nesigurnosti, (tj. moguće je mjeriti manje priraste pomaka [12]).



Slika 29. Standardna rezolucija pomaka [12]

Nakon standardne rezolucija pomaka dobivena je i standardna rezolucija glavne najveće deformacije. Promjena iznosa standardne rezolucije glave najveće deformacije također je prikazana u ovisnosti o veličini konačnog elementa (Slika 30.). Usporedba dijagrama standardne rezolucije pomaka i standardne rezolucije glavne najveće deformacije dovodi do zaključka da su vrijednosti dobivene kod standardne rezolucije glavne najveće deformacije znatno manje nego kod standardne rezolucije pomaka. Kao i kod standardne rezolucije pomaka jasno je kako je utjecaj šumova i mjernih nesigurnosti manji kod većih elemenata. Primjenom većih konačnih elemenata dolazi do smanjenja standardne rezolucije te mogućnosti mjerenja manjih prirasta deformacija [12].



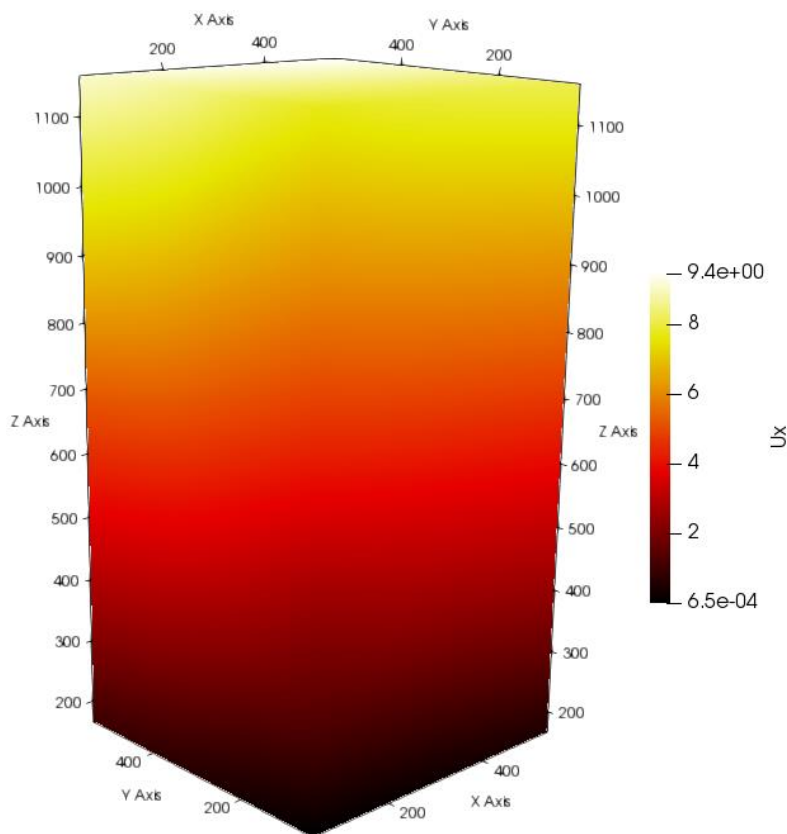
Slika 30. Standardna rezolucija glavne najveće deformacije [12]

7. REZULTATI EKSPERIMENTA

Nakon provedenog eksperimentalnog ispitivanja iz 2D projekcija rekonstruirani su 3D volumeni koji su potom analizirani primjenom globalnog DVC algoritma C8 Correlli. Korištenje navedenog algoritma rezultiralo je izmjerenim 3D poljima pomaka čvorova korištene mreže konačnih elemenata. Osim toga, na temelju izmjerenih polja pomaka izračunate su deformacije. Navedena 3D polja pomaka i deformacija prikazana su u nastavku. Budući da je tijekom mehaničkog opterećenja korišten i klasični DIC postav prikazana su 2D polja deformacija. Osim polja pomaka i deformacija prikazane su odgovarajuće 3D mape korelacijskih reziduala za mreže konačnih elemenata različitih veličina. Na Slika 13. i Slika 14. prikazana je prva značajna prednost korištenja μ -tomografije, a to je mogućnost 3D prikaza mikrostrukture ispitnog uzorka. Preklapanjem dobivene mikrostrukture i odgovarajućih mapa korelacijskih reziduala definiran je mehanizam oštećenja ispitnog uzorka, odnosno epoksidne smole ojačane stohastički raspoređenim staklenim vlaknima.

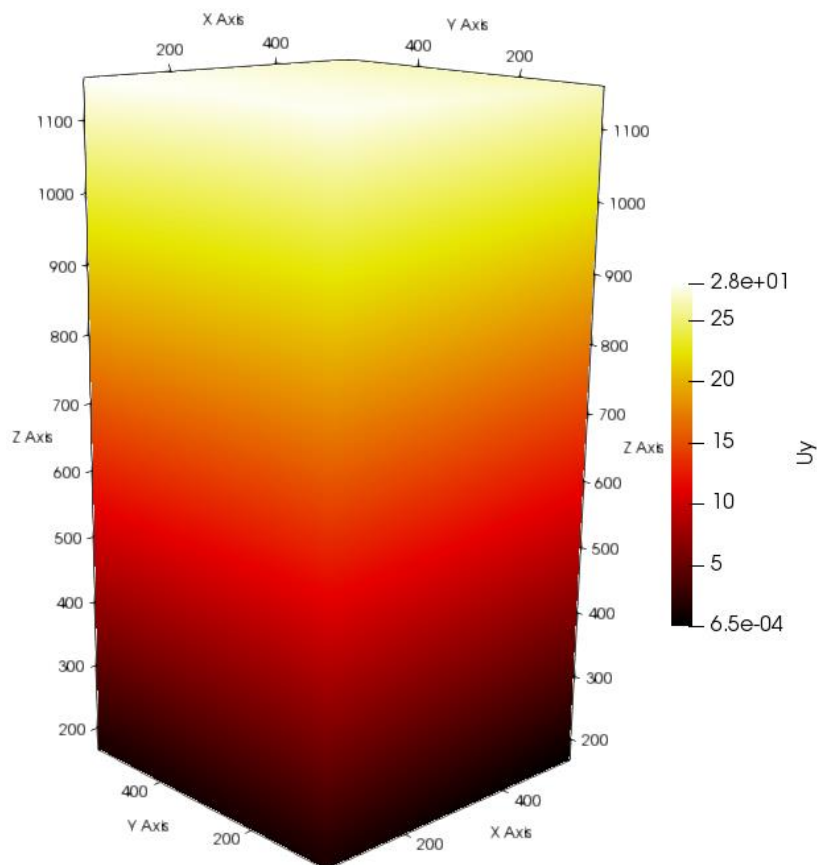
7.1. Izmjerena polja pomaka

Slika 31. prikazuje izmjereno polje pomaka u x smjeru za sken 04. Polje pomaka nije ovisilo o veličini korištenih konačnih elemenata, odnosno pomaci su bili jednaki za sve veličine elemenata. Kako je skeniranje ispitnog uzorka provedeno u rasterećenom stanju, što prikazuje Slika 27., pomaci bi trebali biti približno jednaki nuli. Međutim, na Slika 31. može se primijetiti kako je zabilježen relativno značajan signal pomaka. Izmjereni pomaci po poprečnom presjeku promatranog volumena približno su jednaki. Budući da se radi o rasterećenom stanju ispitnog uzorka koji je prethodno bio uklonjen iz CT skenera, može se zaključiti kako zabilježeni pomaci nisu rezultat mehaničkog opterećenja, već odgovaraju pomaku (tj. rotaciji) krutog tijela. Pomaci krutog tijela rezultat su načina provođenja ispitivanja, odnosno uneseni su uslijed isprekidanog opterećivanja ispitnog uzorka na vanjskom ispitnom uređaju (tj. kidalica nije smještena unutar CT skenera). Kako u stvarnosti nije moguće ostvariti identičan položaj ispitnog uzorka u CT skeneru, u izmjerenim pomacima dominiraju pomaci koji odgovaraju pomacima krutog tijela.



Slika 31. Izmjereno polje pomaka u x smjeru za sken 04

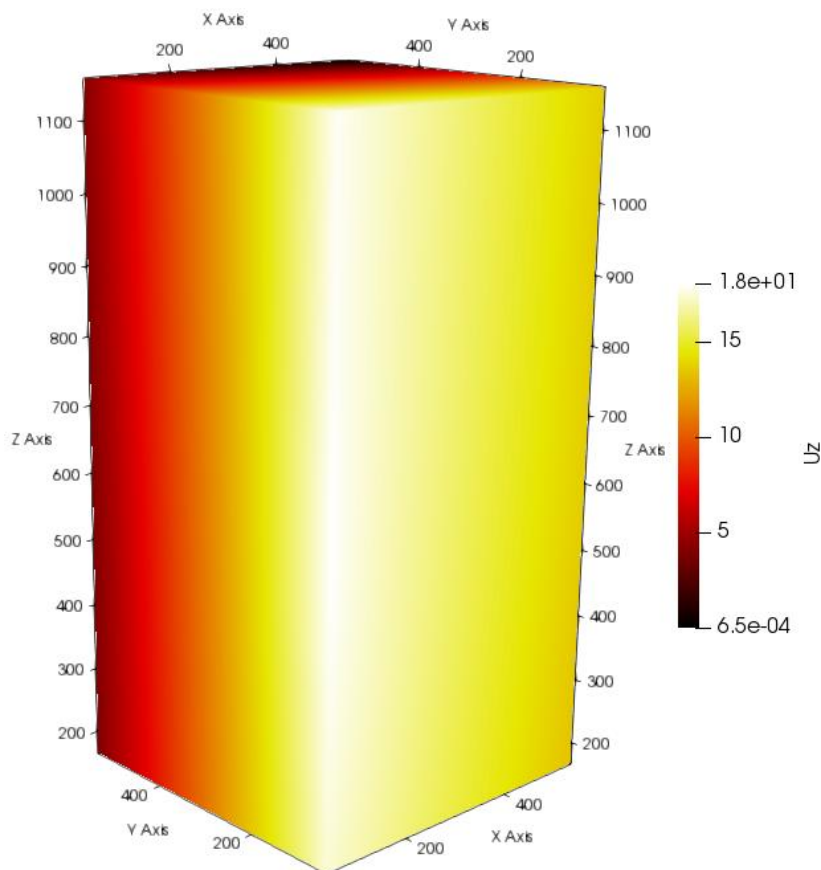
Izmjereni pomaci po osi y (Slika 32.) također detektiraju pomak krutog tijeka (tj. rotaciju oko x osi). Iznos pomaka u smjeru osi x povećava se jednoliko po presjeku ispitnog uzorka od donjeg dijela promatranog volumena interesa, u kojemu pomaci imaju zanemarivo mali iznos, prema vrhu promatranog volumena gdje postaju značajniji. Usporedbom polja pomaka u x smjeru i polja pomaka u y smjeru vidimo da postoji razlika u iznosima dobivenih pomaka, odnosno dobiveni pomaci po osi y gotovo su tri puta veći od pomaka koji su dobiveni za x smjer.



Slika 32. Izmjereno polje pomaka u y smjeru za sken 04

Kao i u prethodna dva slučaja pretpostavljeno je da će dobiveni pomaci biti jednaki nuli, ali vidimo prema Slika 33. da je pretpostavka kriva te da su dobiveni određeni iznosi pomaka. Uzroka pomaka je jednak kao i u prethodnim slučajevima, za osi x i y , rotacija krutog tijela. Naime, maksimalni iznosi pomaka izmjereni su duž prednjeg brida u smjeru osi z , dok su najmanji zabilježeni na dijagonalnom rubu. Usporedbom maksimalnih iznosa pomaka u pojedinim smjerovima zaključuje se da su pomaci dobiveni u z smjeru približno dva puta veći od pomaka dobivenih u x smjeru. Konačno može se zaključiti kako su najveći pomaci izmjereni u y smjeru, dok su najmanji zabilježeni u smjeru osi x .

Kako su svi izmjereni pomaci posljedica pomaka krutog tijela, odnosno nejednolikog pozicioniranja ispitnog uzorka u CT skener, može se zaključiti kako nije moguće detektirati diskontinuitete (tj. oštećenja) iz dobivenih polja pomaka u neopterećenom stanju. U slijedećem podpoglavlju biti će izračunata polja zaostalih deformacija koja nisu pod utjecajem pomaka krutog tijela.



Slika 33. Izmjereno polje pomaka u z smjeru za sken 04

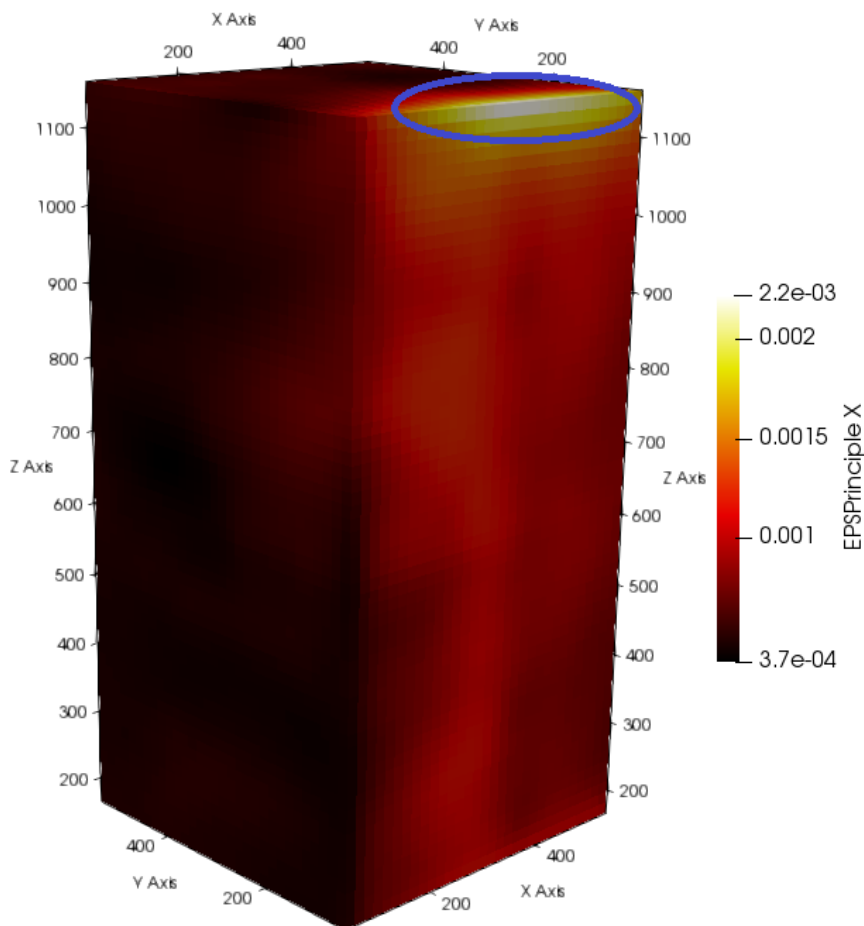
7.2. Izračunata polja deformacija

Nakon što su izmjerena polja pomaka pojedinih koordinatnih osi, izračunata su polja glavne najveće deformacije ε_1 iz izmjerenih polja pomaka. Za razliku od polja pomaka, polja deformacija ovise o veličini korištenih konačnih elemenata. Naime, korištenje manjih elemenata omogućava bolje opisivanje lokalizacijskih fenomena. Stoga su u nastavku prikazana izračunata polja glavne najveće deformacije za mreže konačnih elemenata veličine elementa 16 i 96 voxela. Osim toga, 3D polja deformacija će biti uspoređena s 2D poljima deformacija dobivenim DIC metodom.

7.2.1. 3D polja deformacija za veličinu elementa 16 voxela

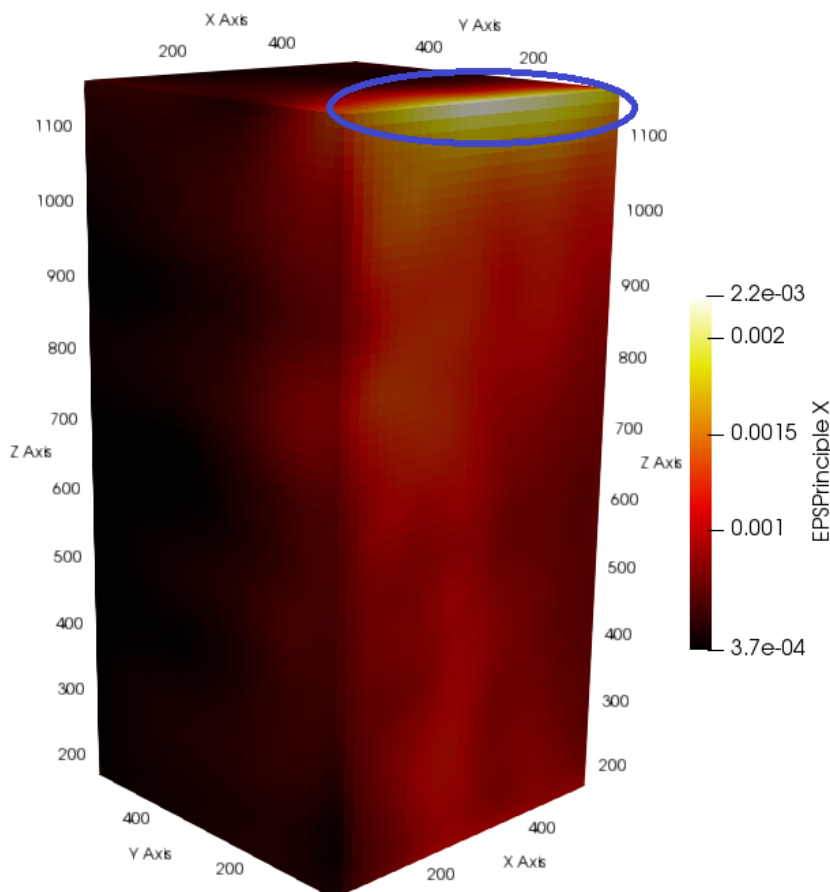
Razina mehanizma oštećenja u korelaciji je s narinutim mehaničkim opterećenjem. Rezolucija detekcije pretpostavljenih lokalizacijskih fenomena u kompozitima ojačanim vlaknima ovisiti će o veličini primijenjenih konačnih elemenata. Stoga su u nastavku prikazana izračunata polja deformacija za rekonstruirane skenove (Slika 27). Slika 34. prikazuje 3D polje deformacija koje je dobiveno nakon prvog ciklusa opterećenja koja je posljedica narinutnog

jednoosnog mehaničkog opterećenja koje izaziva naprezanje od 25% prethodno određene vlačne čvrstoće predloženog materijala. Na slici se vidi kako postoji lokalno područje povećanih deformacija na gornjem desnom bridu (plavi eliptični oblik). Promatranjem cijelog volumena interesa moguće je zaključiti kako su iznosi glavne najveće deformacije relativno malog iznosa.



Slika 34. Polje deformacija za veličinu elementa 16 voxela za sken 01

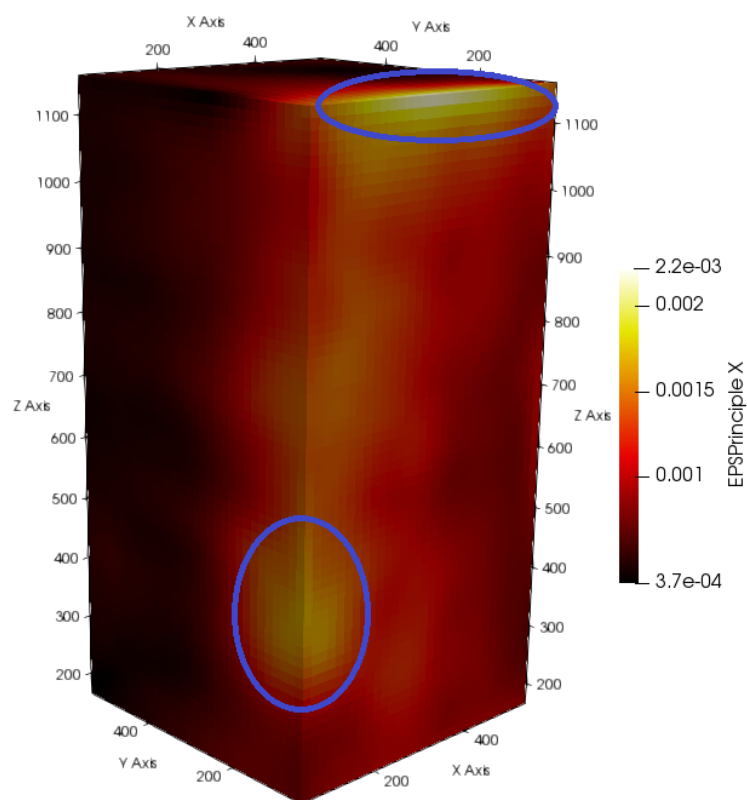
Nakon provođenja prvog skeniranja, ispitni uzorak je vraćen na klasičnu jednoosnu kidalicu te ponovno opterećen. Mehaničko opterećenje dovedeno je do iznosa koji izaziva naprezanje 50% vlačne čvrstoće predloženog materijala. Potom je ispitni uzorak rasterećen i ponovno skeniran CT-om. Slika 35. prikazuje stanje deformacija koje je zabilježeno skenom 02. Na slici se može vidjeti da je uslijed povećanja mehaničkog opterećenja došlo do neznatnog povećanja deformacija u odnosu na prethodno zabilježeno polje deformacija. Iz navedenih mapa deformacija može se primijeniti povećanje područja lokalnih deformacija u gornjem desnom kutu.



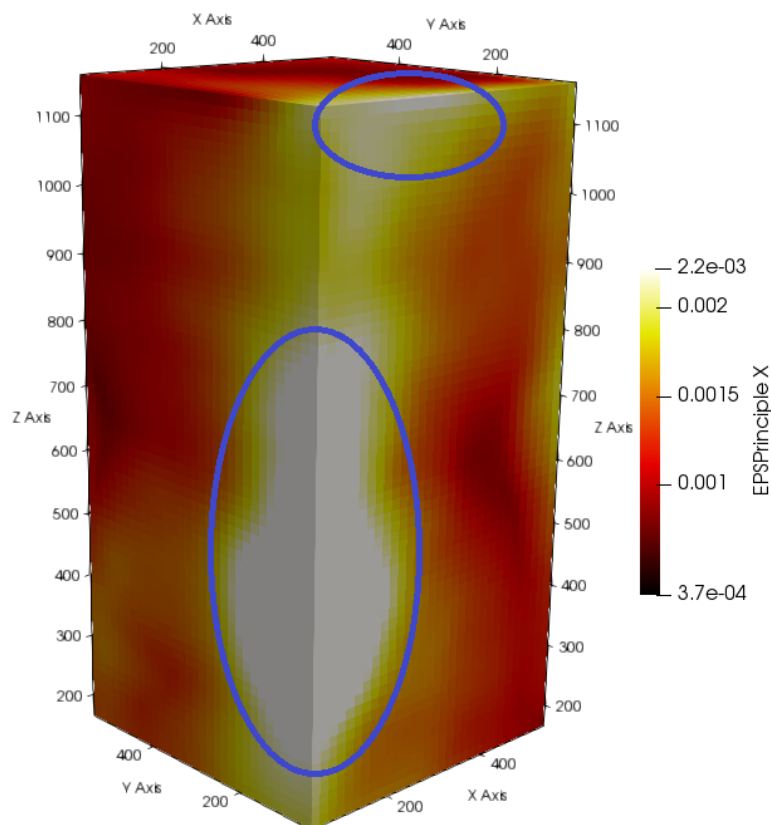
Slika 35. Polje deformacija za veličinu elementa 16 voxela za sken 02

Sken 03 registriran je u rasterećenom stanju nakon mehaničkog opterećenja koje je odgovaralo naprezanju od 75% vlačne čvrstoće predloženog materijala. Prikaz 3D polja deformacija u tom slučaju nalazi se na Slika 36. Prema slici se vidi kako u ovom slučaju dolazi do pojave još jednog lokalnog područja povišenih deformacija. Do pojave sekundarne zone trajnih deformacija dolazi duž prednjeg vertikalnog brida (plavi eliptični oblik) analiziranog 3D volumena. U odnosu na polje deformacija koje je izračunato na skenu 02 vidi se kako je na cijelom volumenu došlo do znatnijeg povećanja iznosa trajnih deformacija uslijed povećanja mehaničkog opterećenja.

Polje deformacija koje je izračunato na posljednjem skenu 04 prezentirano je na Slika 37. Iz predložene mape glavne najveće deformacije mogu se uočiti dva lokalna područja s izrazito povišenim iznosima deformacija. Dobivene deformacije posljedica su opterećenja koje uzrokuje naprezanje od 90% vlačne čvrstoće predloženog kompozitnog materijala. Također se jasno vidi kako je na cijelom promatranom volumenu došlo do značajnijeg porasta iznosa deformacija u odnosu na prethodno promatrane 3D volumene. Razlog tomu je i iznos mehaničkog opterećenja koji je samo nešto manji od opterećenja koje bi izazvalo pucanje ispitnog uzorka od predloženog materijala.



Slika 36. Polje deformacija za veličinu elementa 16 voxela za sken 03

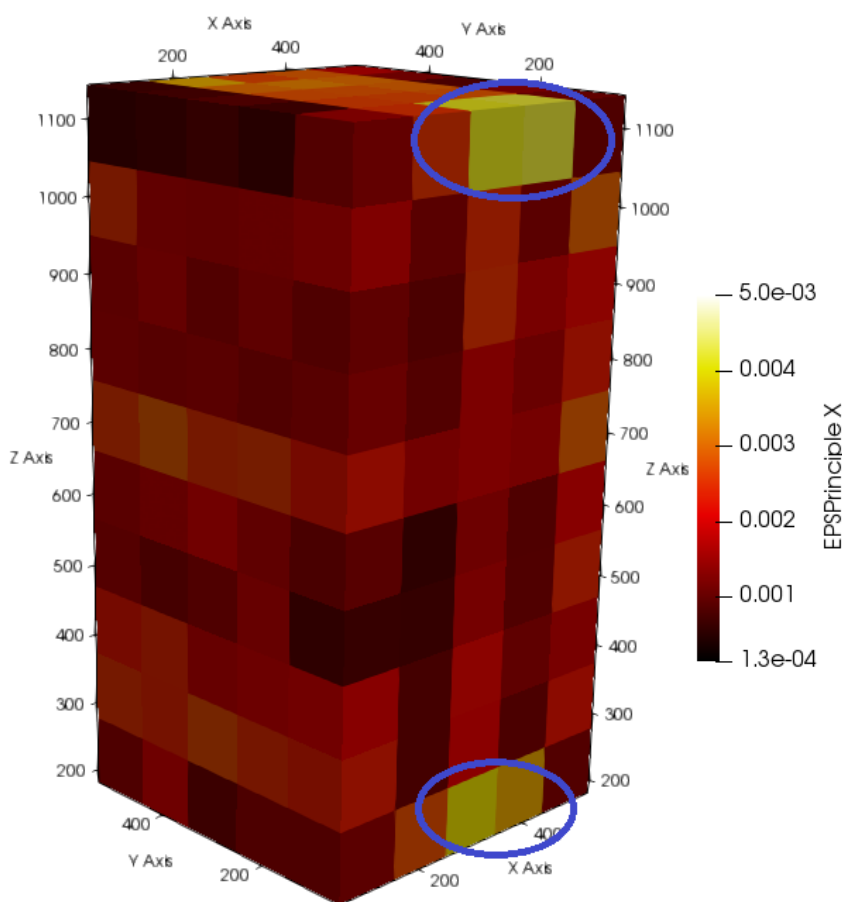


Slika 37. Polje deformacija za veličinu elementa 16 voxela za sken 04

7.2.2. 3D polja deformacija za veličinu elementa 96 voxela

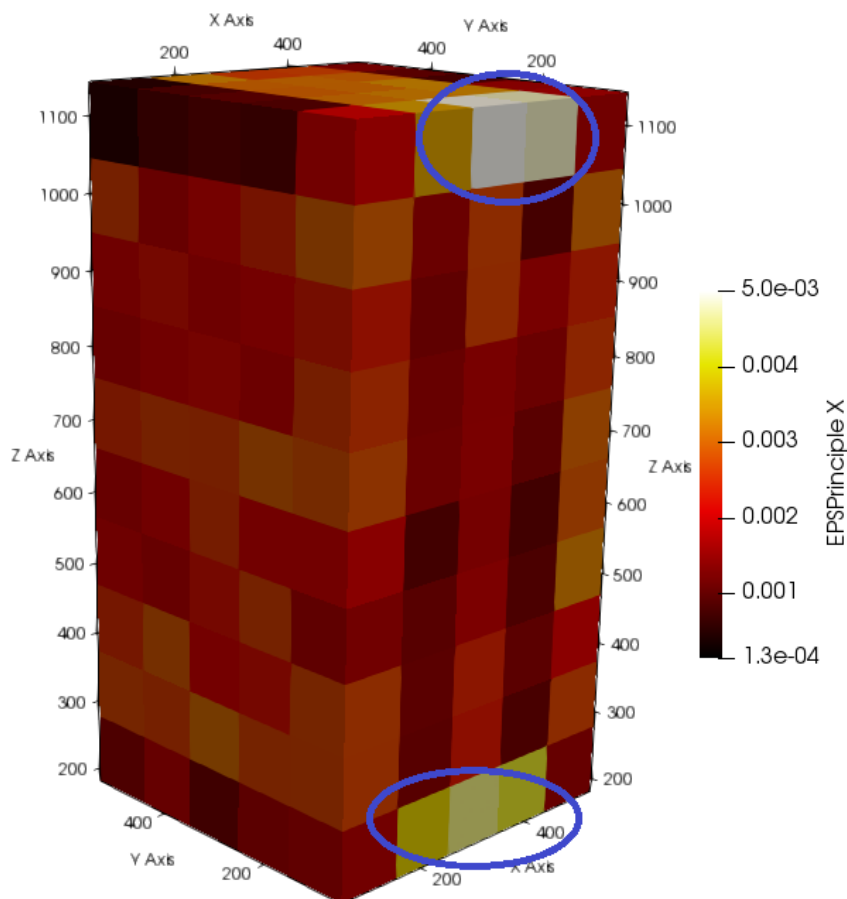
Nakon što su prikazana polja deformacija za svaki sken za veličinu konačnih elemenata od 16 voxela u prethodnom podpoglavlju, u nastavku su dane 3D mape deformacija za veličinu konačnih elemenata od 96 voxela. Prema Slika 30. jasno je kako je standardna rezolucija deformacija većih konačnih elemenata manje u odnosu na standardnu rezolucija manjih konačnih elemenata te je primjenom većih konačnih elemenata moguće mjeriti manje priraste deformacija. Međutim, za očekivati je kako detalji kinematike uslijed mehaničkog opterećenja (tj. lokalizacijski fenomeni) ne mogu biti detaljno opisani.

Slika 38. prikazuje polje deformacija koje je dobiveno za sken 01. Deformacije su rezultat mehaničkog opterećenja koje izaziva naprezanje od 25% vlačne čvrstoće. Na slici su istaknuta dva lokalna područja (plavi eliptični oblici) na kojima su povišeni iznosi deformacija. Područja lokalno povišenih deformacija nalaze se na gornjem i donjem bridu promatranog volumena u smjeru osi x. Ukoliko se uspoređi dobiveno polje deformacija s poljem deformacija koje je dobiveno za manje konačne elemente (Slika 34.) može se primijetiti kako su identificirana dva lokalna područja povišenih deformacija. Za pretpostaviti je kako predložena mreža konačnih elemenata ne može pouzdano opisati pomake uslijed narinutog opterećenja.



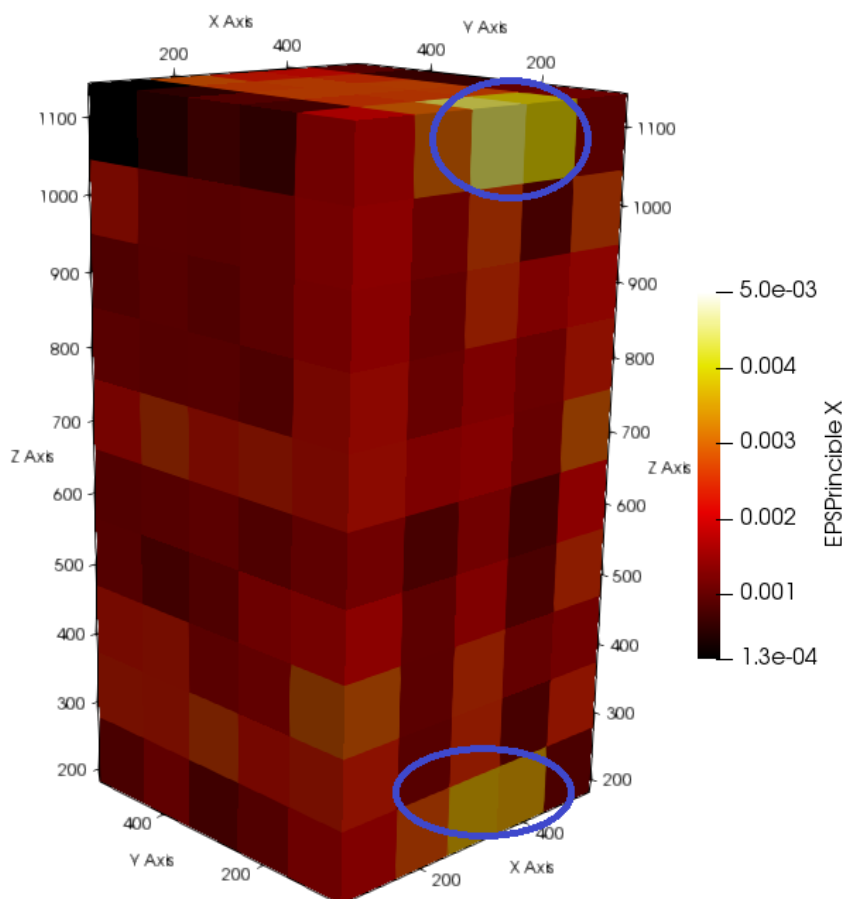
Slika 38. Polje deformacija za veličinu elementa 96 voxela za sken 01

Sken 02 snimljen je nakon što je naprezanje dostiglo iznos polovine vlačne čvrstoće. Dobiveno polje deformacija u tome slučaju prikazano je na Slika 39. Usporedbom s prethodno prikazanim poljem deformacija vidljivo je kako dolazi do povećanja deformacija na cijelom promatranom volumenu. Uslijed povećanja narinutnog mehaničkog opterećenja primjećujemo kako je došlo do širenja lokalnih područja povišenih deformacija.



Slika 39. Polje deformacija za veličinu elementa 96 voxela za sken 02

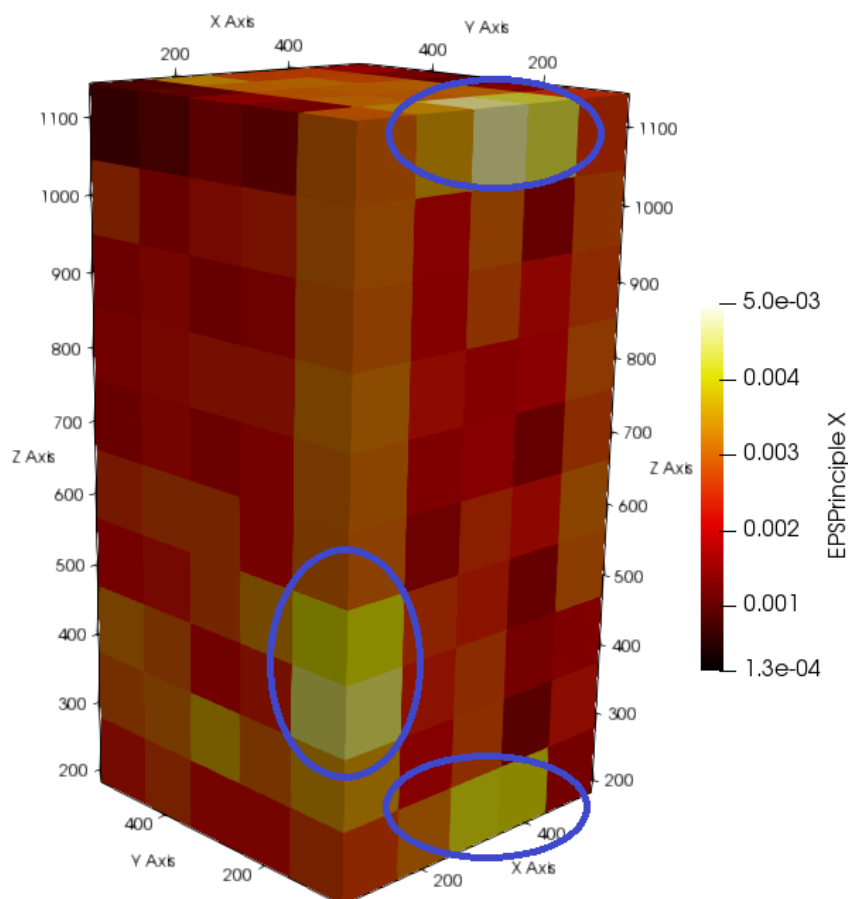
Slika 40. prikazuje polje deformacija koje je dobiveno za sken 03. Naprezanje u tom slučaju iznosi 75% vlačne čvrstoće predloženog materijala. Iz 3D mapa deformacija za navedeni slučaj opterećenja nisu zabilježena daljnja povećanja deformacija. I dalje postoje dva lokalna područja povišenih deformacija kao i u prethodna dva slučaja, međutim njihovi iznosi su se smanjili kao i veličina područja na kojima su izraženiji iznosi deformacija. Zabilježene mape deformacija nisu očekivane budući da je na ispitni uzorak narinuto veće opterećenje.



Slika 40. Polje deformacija za veličinu elementa 96 voxela za sken 03

Polje deformacija nakon snimanja posljednjeg skena 04 prikazano je na Slika 41. Dobiveno polje deformacija posljedica je povećanja mehaničkog opterećenja. Naprezanje je u tom slučaju iznosilo 90% vlačne čvrstoće. Na cijelom polju deformacija promatranog volumena interesa došlo je do povećanja iznosa deformacija. Također, osim dva lokalna područja povišenih deformacija koja su se proširila i čiji su iznosi porasli, došlo je do lokalizacije povišenih iznosa deformacija i na prednjem bridu odabranog volumena.

Nakon prikazivanja i opisivanja polja deformacija za svaki provedeni sken, te s obzirom na dvije veličine elemenata može se zaključiti da iako je standardna rezolucija deformacija za veće konačne elemente manja, odnosno moguće je detektirati manje priraste deformacija, polje deformacija dobiveno za manje konačne elemente bolje opisuje raspodjelu deformacija. Također, iz predloženih rezultata zabilježeno je kako ne postoje kontinuirani prirasti iznosa deformacija s obzirom na povećanje mehaničkog opterećenja. Stoga se može zaključiti kako mreža konačnih elemenata s većom diskretizacijom ne može kvantitativno opisati pojavu lokalnih zaostalih deformacija nakon narinutog opterećenja.

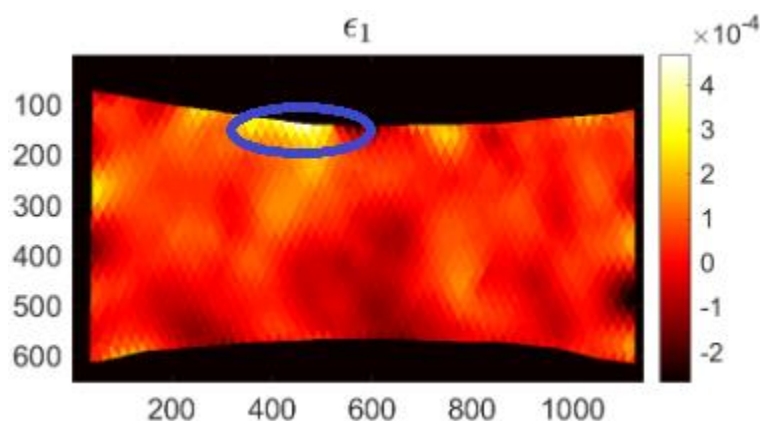


Slika 41. Polje deformacija za veličinu elementa 96 voxela za sken 04

7.2.3. 2D polja deformacija

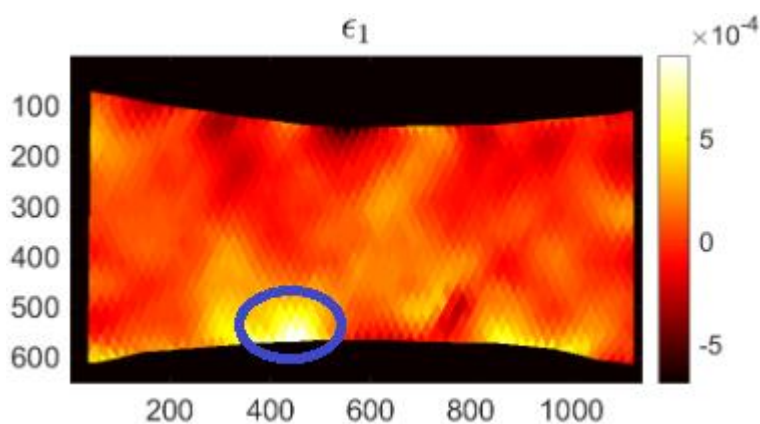
Budući da je tijekom provedbe ex-situ (tj. cikličkog) eksperimenta ispit uzorak promatran pomoću DIC metode, u nastavku su prikazana 2D polja deformacija za mehanička opterećenja koja odgovaraju, prethodno analiziranim 3D skenovima.

Raspodjela 2D polja deformacija, zabilježenog DIC metodom, koji se podudara sa skenom 01, nalazi se na Slika 42. Iz mapa najvećih glavnih deformacija može se primijetiti kako je na rubovima ispitnog uzorka detektirano nekoliko područja povišenih deformacija. Područje najvećeg iznosa promatranih deformacija nalazi se na gornjem rubu i zaokruženo je plavim eliptičnim oblikom. Usporedbom iznosa deformacija snimljenih u istom trenutku dobivenih DIC metodom i DVC metodom primjećuje se da su iznosi dobiveni DIC-om znatno manji. Iznosi deformacija dobivenih DIC-om su reda veličine 10^{-4} dok su iznosi deformacija dobivenih DVC-om reda veličine 10^{-3} .



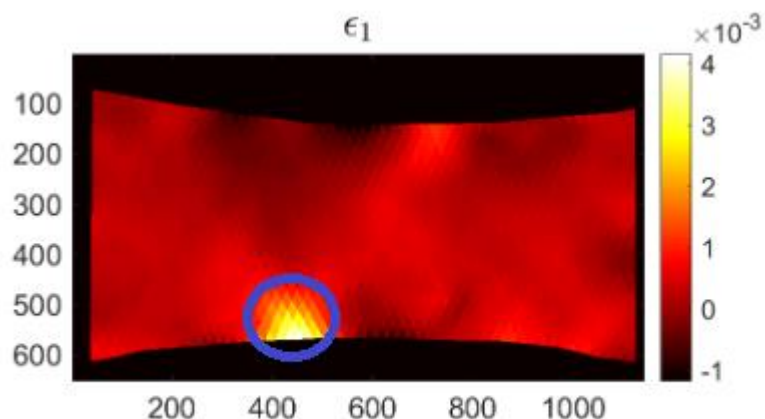
Slika 42. 2D polje deformacija za sken 01

Povećanjem mehaničkog opterećenja dolazi do povećanja iznosa glavne najveće deformacije na cijelom promatranom području. Prema Slika 43. zabilježeno je povećanje iznosa deformacija na cijelom promatranom području. Osim toga registrirano je lokalno povećanje deformacija na donjem rubu (plavi eliptični oblik). Lokalna zona povišenih deformacija identificirana kod prethodnog opterećenja (Slika 42) se značajno smanjila. Budući da je uslijed povećanja opterećenja došlo do iščezavanja zabilježenih deformacija može se zaključiti kako ona nisu bila uzrokovana mehaničkim opterećenjem. Pretpostavlja se da je lokalizacijska zona zabilježena nakon prvog ciklusa opterećenja uzrokovana nesavršenošću eksperimentalnog postava.



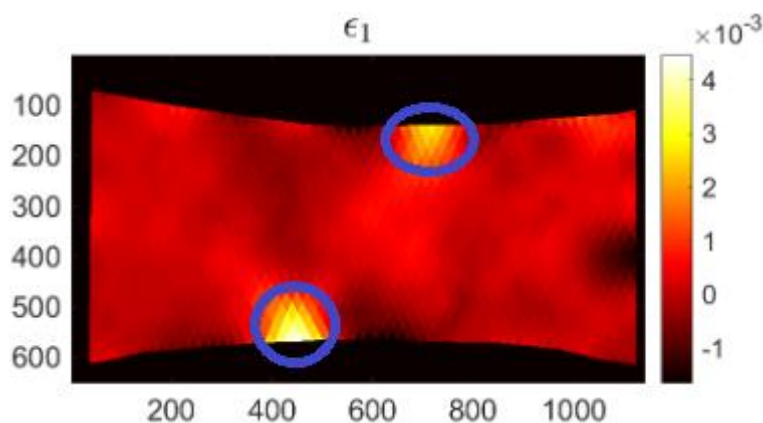
Slika 43. 2D polje deformacija za sken 02

Daljnjim povećanje mehaničkog opterećenja uzrokovalo je povećanja iznosa deformacija na cijelom području (Slika 44.). Također se može primijetiti, prema mjernoj skali, kako je došlo do povećanja iznosa deformacija za red veličine s obzirom na prethodne mape najvećih glavnih deformacija. Prethodno uočene zone lokalno povišenih deformacija dodatno su se proširile (plavi eliptični oblici). Osim toga, u identificiranim područjima lokalnih zona značajno su povećani iznosi najvećih glavnih deformacija.



Slika 44. 2D polje deformacija za sken 03

2D polje deformacija koje je dobiveno za posljednji sken 04 prikazano je na Slika 45. Usporedbom s poljem deformacija u trenutku prethodnog skena primjećuje se kako je došlo samo do blagog porasta deformacija. Međutim značajnija je pojava još jednog područja lokalno povišenih deformacija na gornjem rubu promatranog područja (plavi eliptični oblik). Lokalno područje prethodno uočeno gotovo da nije doživjelo promjene.



Slika 45. 2D polje deformacija za sken 04

7.3. Mape korelacijskih reziduala

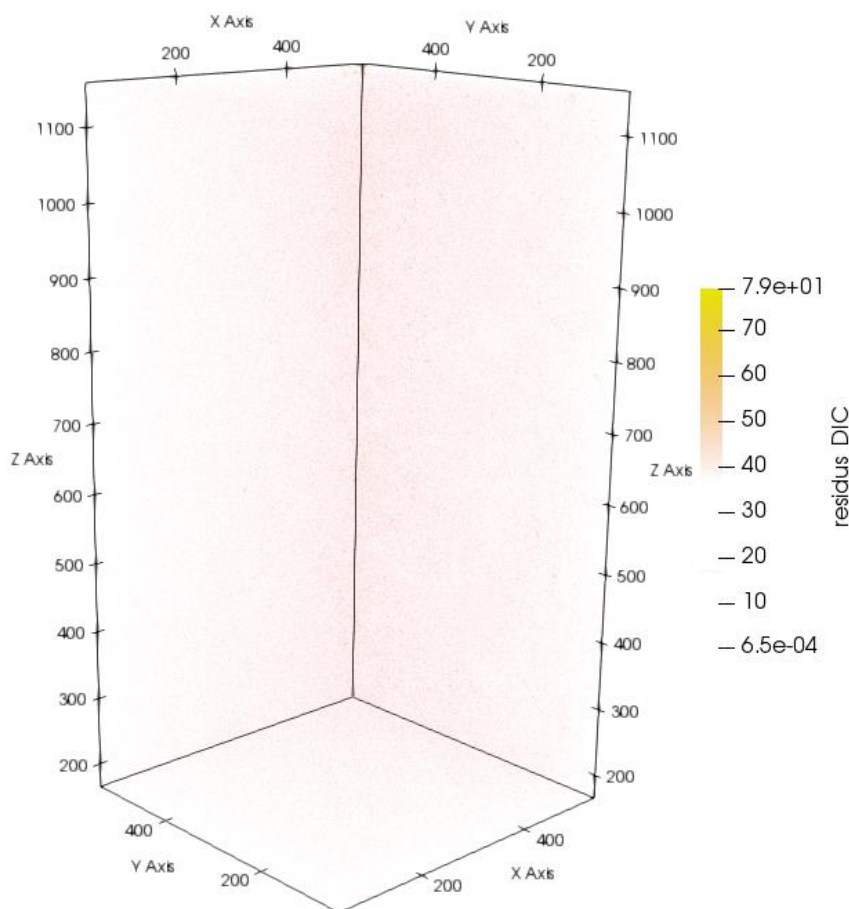
Mape korelacijskih reziduala računaju se prema izrazu (2)., a definirani su kao razlika referentne i korigirane deformirane slike. Glavni zadatak globalne DVC i DIC metode je minimizacija navedene funkcije cilja. Mape korelacijskih reziduala omogućavaju praćenje diskontinuiteta u poljima pomaka (npr. pojave pukotine tijekom opterećivanja ispitnog uzorka). Ukoliko se u materijalu javljaju oštećenja, odnosno pukotine, u prikazu mapa korelacijskih reziduala doći će do povećanja intenziteta istih na odgovarajućem mjestu. U nastavku su

prezentirane dobivene mape korelacijskih reziduala za mrežu konačnih elemenata veličina 16 i 96 voxela.

7.3.1. Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 16 voxela

Budući da je cilj ovog rada pratiti rast oštećenja kod različitih razina opterećenja, prikazane su mape korelacijskih reziduala za svaki sken.

Slika 46. prikazuje dobivenu mapu korelacijskih reziduala na mreži konačnih elemenata veličine 16 voxela. Mapa je dobivena nakon što je ispitni uzorak narinuti prvi ciklus opterećenja.

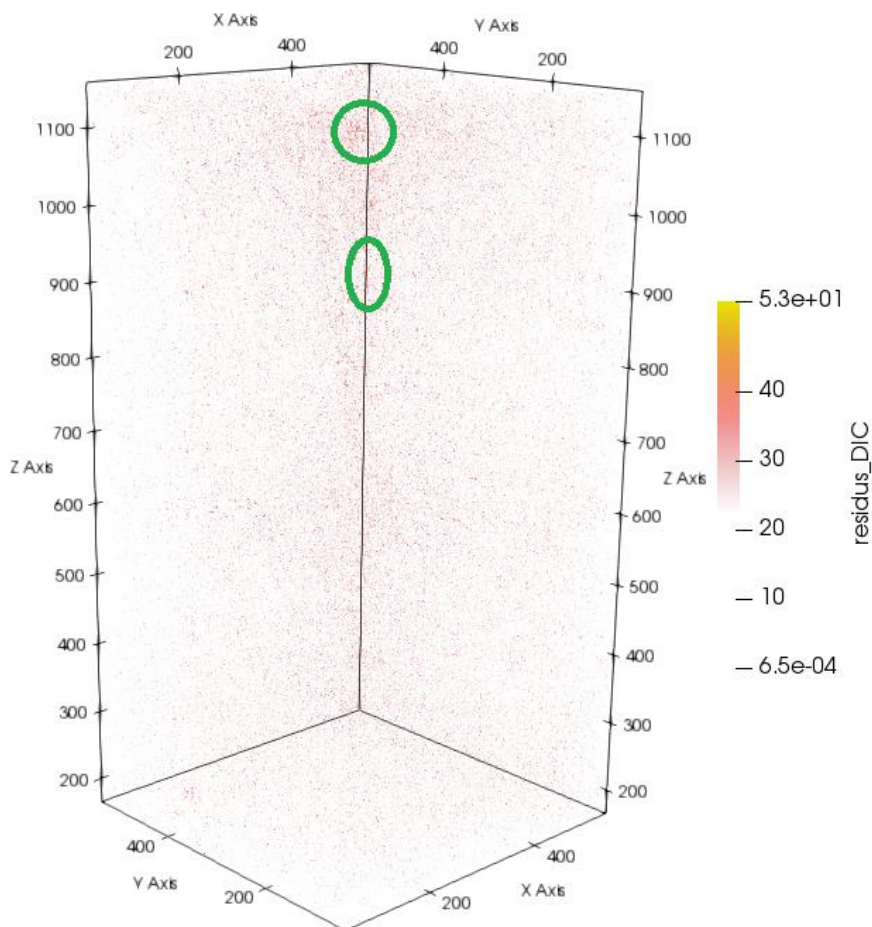


Slika 46. Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 16 voxela za sken 01

Navedena slika prikazuje kako su korelacijski reziduali uslijed prve primjene mehaničkog opterećenja homogeni te vrlo mali.

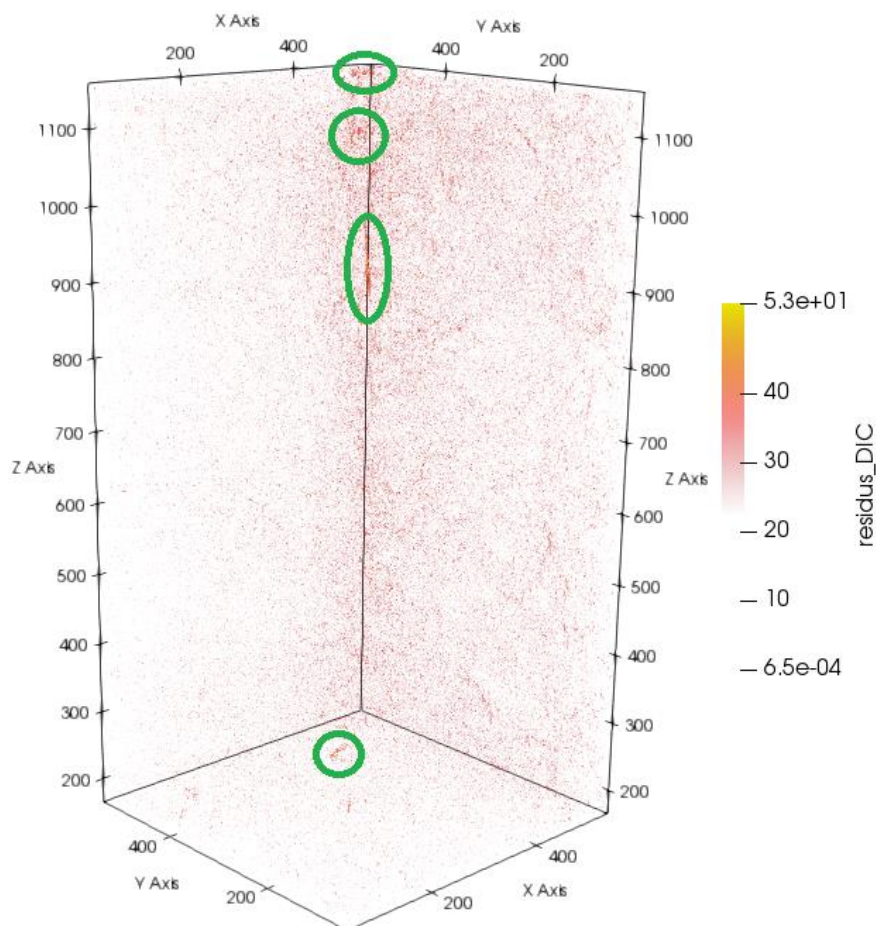
Nakon što je provedeno prvo skeniranje ispitnog uzorka on je vraćen na kidalicu te je na njega narinut drugi ciklus opterećenja čija je maksimalna vrijednost iznosila 50% od maksimalne vrijednosti vlačne čvrstoće. Povećanjem narinutnog mehaničkog opterećenja dolazi i do povećanja iznosa reziduala što se vidi na Slika 47. Na slici su naznačena dva područja (zeleni

eliptični oblici) u kojima i oko kojih je došlo do porasta iznosa reziduala, dok je u preostalom dijelu promatranog volumena raspodjela reziduala homogena.



Slika 47. Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 16 voxela za sken 02

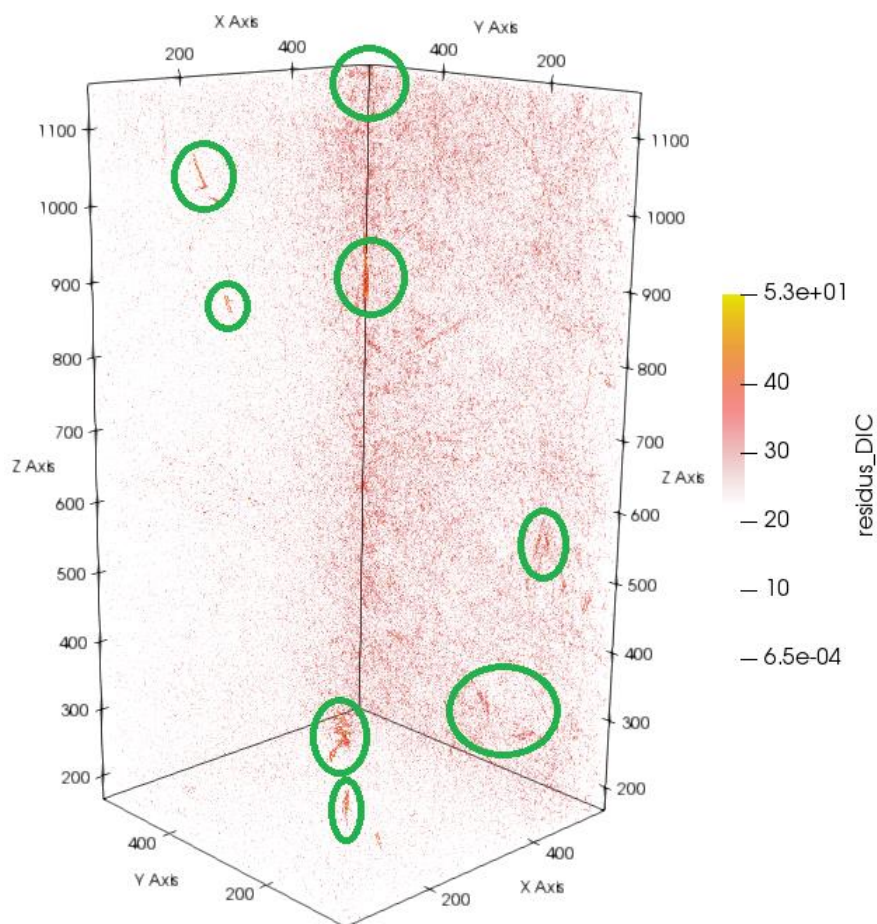
Kako je raslo narirutno mehaničko opterećenje tako su se iznosi korelacijskih reziduala sve više povećavali. Slika 48. prikazuje kako je na cijelom promatranom volumenu došlo do povećanja iznosa reziduala. Ono što je značajnije je sve izraženija lokalizacija većih iznosa reziduala na određenim mjestima. Tako su na slici zaokružena četiri mjesta na kojima i oko kojih je uočeno povećanje iznosa korelacijskih reziduala. Značaj tih mjesta je u tome što ona predstavljaju mjesta potencijalnih pojava oštećenja, odnosno mikropukotina.



Slika 48. Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 16 voxela za sken 03

Posljednjim skeniranjem dobivena je mapa korelacijskih reziduala koja je prikazana na Slika 49. Jasno se vidi kako je posljednjim povećanjem mehaničkog opterećenja došlo do najznatnijeg povećanja iznosa korelacijskih reziduala. Prethodno uočena mjesta lokalizacije reziduala povišenih iznosa dodatno su povećala svoj iznos, ali isto tako proširila svoje područje. Osim prethodno uočenih lokalnih područja primjećuju se i nova mjesta lokalizacije povišenih reziduala. Također vidljivo je povećanje reziduala na cijelom promatranom volumenu, posebno na području srednjeg brida promatranog volumena.

Povećanje narinutnog mehaničkog opterećenja dovelo je do povećanja iznosa korelacijskih reziduala. Svakim skeniranjem uočena su područja na kojim je dolazilo do pojave lokalnih mjesta nakupljanja povišenih reziduala. Lokalizacijom reziduala uočena su potencijalna mjesta nastanka oštećenja, odnosno mikropukotina.

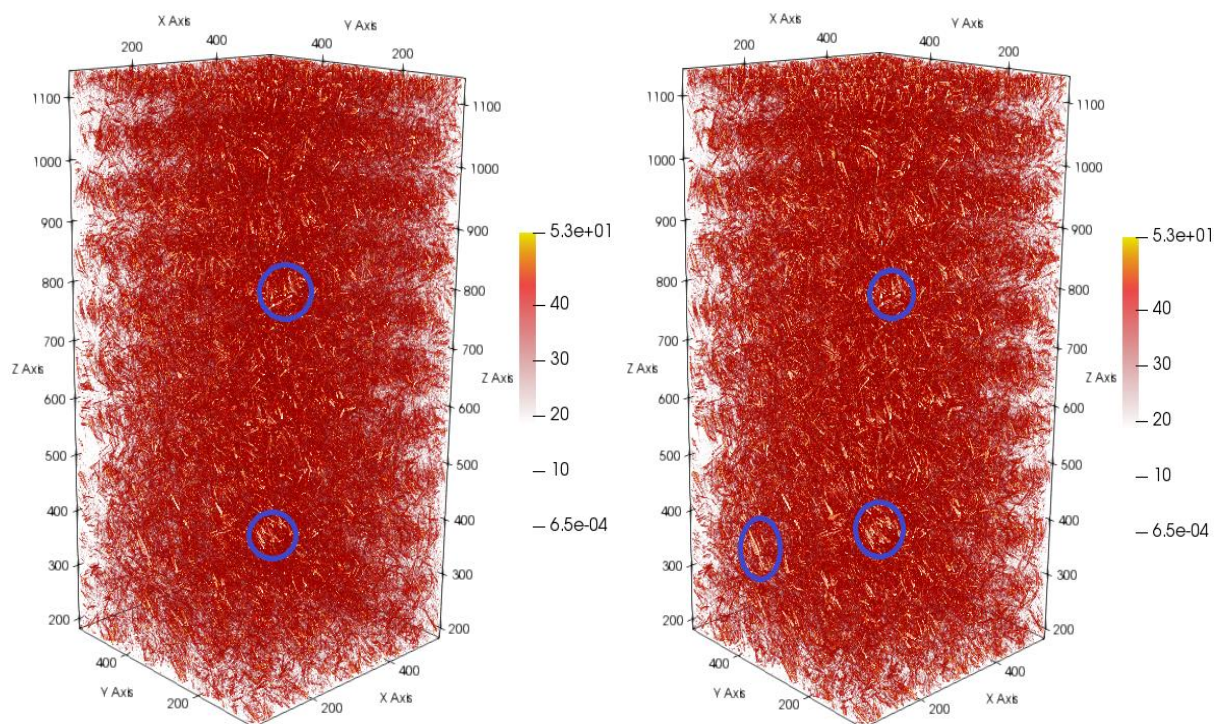


Slika 49. Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 16 voxela za sken 04

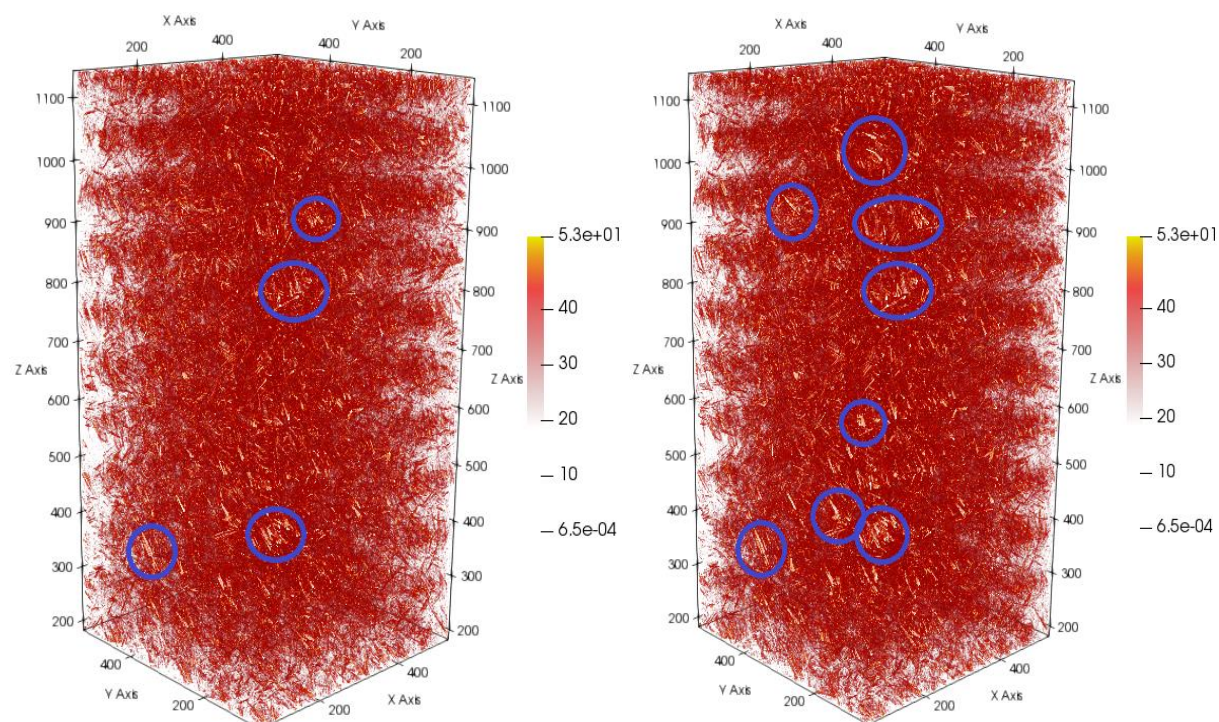
7.3.2. Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 96 voxela

Nakon prikaza dobivenih mapa korelacijskih reziduala za mrežu konačnih elemenata veličine 16 voxela prikazane su i dobivene mape korelacijskih reziduala za mrežu konačnih elemenata veličine 96 voxela.

Prema Slika 50. i Slika 51. vidljivo je kako je povećanje veličine konačnog elementa dovelo do povećanja iznosa korelacijskih reziduala na cijelom promatranom volumenu. Primjećuje se kako su iznosi korelacijskih reziduala u ovom slučaju samo u rubnim područjima približni jednaki nuli, odnosno samo u rubnim područjima dolazi do potpunog preklapanja referentne i deformirane slike promatranog volumena. Iako je došlo do povećanja iznosa korelacijskih reziduala na cijelom volumenu, uočavamo nekoliko područja lokaliziranja povišenih vrijednosti reziduala. Lokalizacijska područja koncentrirana su duž srednjeg brida promatranog volumena. Između prikaza mapa korelacijskih reziduala za pojedine skenove uočeno je daljnje povećanje iznosa korelacijskih reziduala kao i stvaranje novih lokalizacijskih područja, ali i širenja postojećih.



Slika 50. Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 96 voxela za sken 01 (lijevo) i sken 02 (desno)

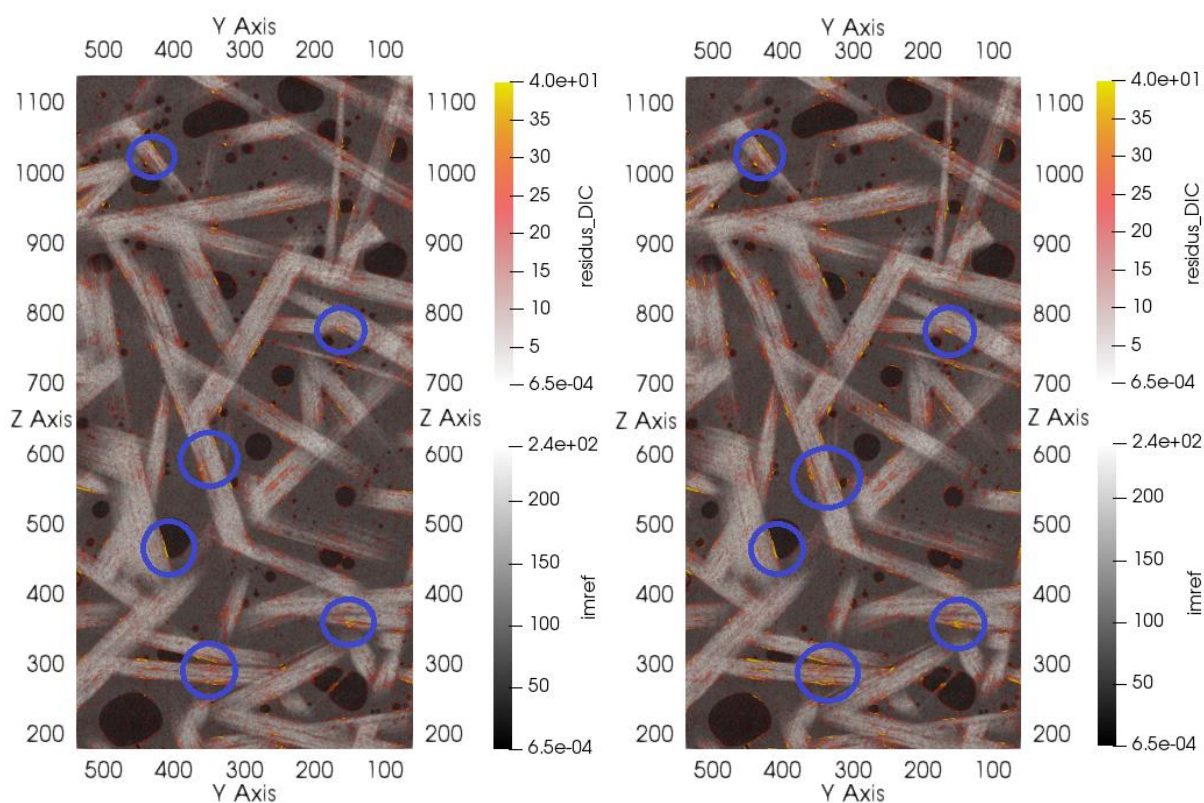


Slika 51. Mapa korelacijskih reziduala za veličinu elementa 96 voxela za sken 03 (lijevo) i sken 04 (desno)

7.4. Mehanizam oštećenja

Preklapanjem polja korelacijskih reziduala i odgovarajuće mikrostrukture predloženog materijala određena su mjesta nastanka oštećenja, odnosno mikropukotina. Osim mjesta nastanka mikropukotina, identificiran je mehanizam oštećenja predloženog kompozitnog materijala.

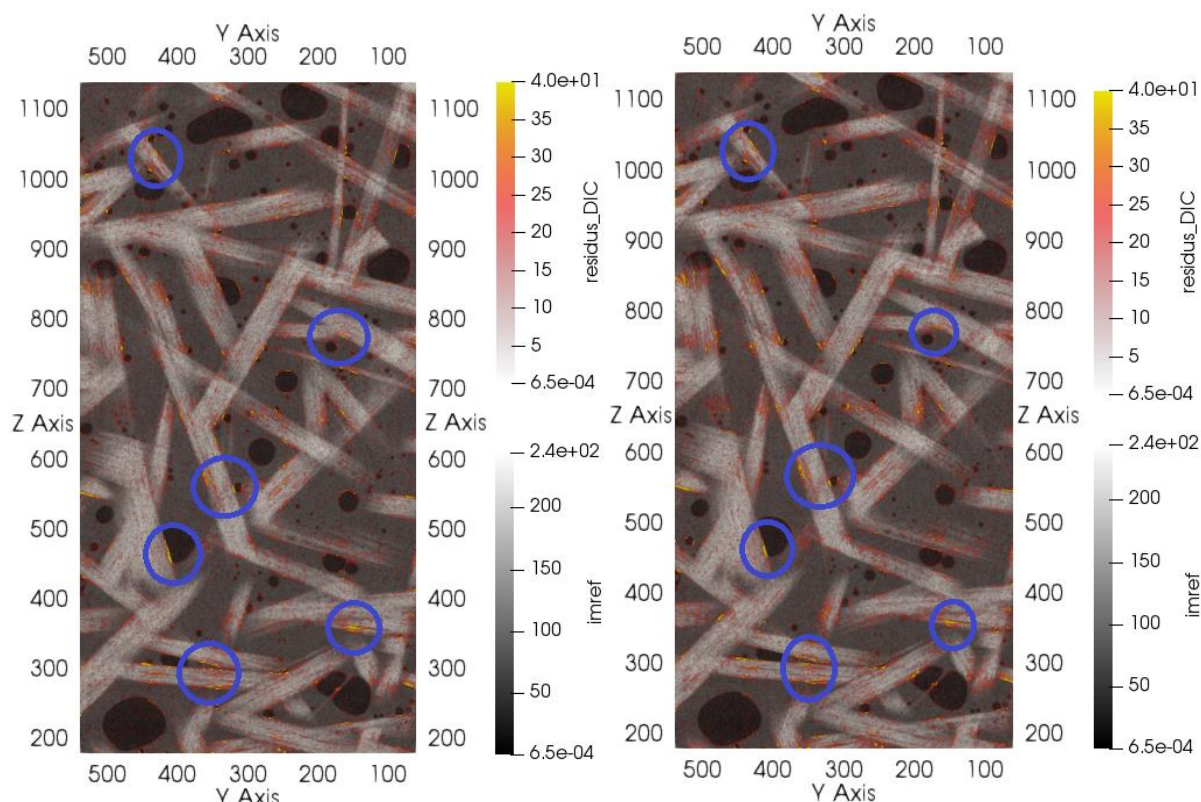
Slika 52. prikazuje mape korelacijskih reziduala koje su preklapljene odgovarajućom mikrostrukturom za sken 01 i sken 02. Prikaz se nalazi u y-z ravnini, odnosno okomito na x ravninu. Slika jasno prikazuje stohastički raspoređena mat staklena vlakna kao i poroznosti u materijalu. Na slici su istaknuta područja povišenih iznosa korelacijskih reziduala (plavi kružići) koja sugeriraju da je na tom mjestu dolazi do oštećivanja predloženog kompozitnog materijala.



Slika 52. Prikaz mape korelacijskih reziduala preklopljene odgovarajućom mikrostrukturom u y-z ravnini za sken 01 (lijevo) i sken 02 (desno)

Preklapanjem mapa korelacijskih reziduala i mikrostrukture možemo uočiti kako se područja povišenih iznosa korelacijskih reziduala nalaze duž rubova staklenih vlakana. Usljed povećanja mehaničkog opterećenja došlo je do povećanja iznosa korelacijskih reziduala. Usporedbom korelacijskih mapa postavljenih na odgovarajuću mikrostrukturu prezentiranih na Slika 52. i Slika 53. vidljivo je da se u istim zonama pojavljuju više vrijednosti reziduala. U

istaknutim područjima jasno se vidi povećanje iznosa te širenje označenih zona korelacijskih reziduala duž staklenih vlakana.



Slika 53. Prikaz mape korelacijskih reziduala preklopljene odgovarajućom mikrostrukturom u y-z ravnini za sken 03 (lijevo) i sken 04 (desno)

Nakon promatranja mapa korelacijskih reziduala i preklapanja istih s odgovarajućom mikrostrukturom može se zaključiti kako s povećanjem narinutog mehaničkog opterećenja dolazi do povećavanja iznosa korelacijskih reziduala i širenja područja povećanih iznosa korelacijskih reziduala. Preklapanjem s odgovarajućom mikrostrukturom predloženog materijala uočeno je da se ta područja nalaze duž rubova stohastički raspoređenih staklenih vlakana. Mehanički mehanizam uslijed kojeg nastupa oštećivanje kod predloženog kompozitnog materijala je odvajanje staklenih vlakana od matrice izrađene iz epoksidne smole.

8. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedeno je *ex-situ* mehaničko ispitivanje uslijed cikličkog opterećenja za vlačnog ispitivanja na kompozitnom ispitnom uzorku. Predloženi kompozitni materijal izrađen je iz epoksidne smole koja je ojačana stohastički raspoređenim staklenim vlaknima. *Ex-situ* mehaničko ispitivanje provedeno je korištenjem laboratorijskog CT skenera, X50+ (North Star Imaging), i klasičnog jednoosnog ispitnog uređaja. Projekcije registrirane CT skenerom rekonstruirane su u 3D skenove. Na temelju dobivenih 3D digitalnih slika izmjerena su polja pomaka primjenom metode korelacije digitalnih volumena. 3D polja pomaka i deformacija određena su primjenom globalnog C8 Correlli DVC algoritma. Budući da se globalni korelacijski princip temelji na određivanju kinematike ispitnog uzorka u čvorovima mreže konačnih elemenata korištene su različite diskretizacije mreže konačnih elemenata s obzirom na veličinu elemenata.

Ciklički opterećeni ispitni uzorak skeniran je četiri puta. Nakon što bi mehaničko opterećenje dostiglo, prethodno određeni iznos, ispitni uzorak bi se rasteretio te potom skenirao unutar CT skenera. Skeniranja su provedena nakon što je na ispitni uzorak narinuto opterećenje koje je odgovaralo naprezanjima od 25%, 50%, 75% i 90% prethodno određene vlačne čvrstoće predloženog kompozitnog materijala.

Budući da su skeniranja ispitnog uzorka izvedena u rasterećenom stanju pretpostavljeno je kako će izmjerena polja pomaka biti približno jednaka nuli. Međutim, s obzirom da se ispitni uzorak premještao iz CT skenera na mehanički ispitni uređaj, i obrnuto, zabilježeni su značajni pomaci koji odgovaraju pomacima krutog tijela. 3D polja deformacija izračunata su na mrežama konačnih elemenata s veličinama 16 i 96 voxela. Primjenom većih konačnih elemenata moguće je mjeriti manje priraste promatranih deformacija budući da imaju manju standardnu rezoluciju deformacija. Međutim 3D polja deformacija dobivena korištenjem većih konačnih elemenata ne prikazuju jednoznačno lokalizacijska područja većih iznosa deformacija budući da ne mogu detaljno opisati promjene u manjim zonama. Promatranjem raspodjele deformacija izmjerenih s elementima veličine 16 voxela moguće je uočiti kako progresivno raste iznos i veličina zone obuhvaćene trajnim deformacijama koje su identificirane u nerasterećenom stanju ispitnog uzorka. Korelacijske procedure mjerenja cijelog polja pomaka rezultiraju izmjerenim poljima pomaka i deformacija. Štoviše, predloženi globalni pristup korelacije digitalnih volumena daje i dodatnu mapu korelacijskih reziduala koja je jednaka razlici referentne i korigirane deformirane slike. U ovom radu prezentirana su polja korelacijskih reziduala, predložene mreže konačnih elemenata veličine 16 i 96 voxela.

Vrijednosti korelacijskih reziduala na grubljoj mreži konačnih elemenata znatno su veća. Međutim, neovisno o veličina konačnih elemenata na oba prikaza uočena su lokalizacijska područja povišenih vrijednosti korelacijskih reziduala. Ta područja ukazuju na pojavljivanje oštećenja, tj. mikropukotina. Preklapanjem polja korelacijskih reziduala i odgovarajuće mikrostrukture određena su mjesta nastanka mikropukotina i mehanički mehanizam oštećenja. Na dobivenim presjecima mikrostrukture vidljiva su stohastički raspoređena staklena vlakana te poroznosti unutar materijala. Mjesta povišenih iznosa korelacijskih reziduala uočena su duž rubova staklenih vlakana. Iz toga slijedi da je odvajanje između epoksidne matrice kompozita i staklenih vlakana mehanizam uslijed kojeg dolazi do pojave navedenih mikropukotina kod narinutog jednoosnog mehaničkog opterećenja.

LITERATURA

- [1] <https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/> [3.12.2019.]
- [2] <http://microctworld.net/the-history-of-microct/> [3.12.2019.]
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_computed_tomography [3.12.2019.]
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_computed_tomography [3.12.2019.]
- [5] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [6] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/automotive-composites-market> [7.12.2019.]
- [7] https://www.researchgate.net/figure/Increased-usage-of-composite-structures-in-next-generation-aircrafts_fig1_308882060 [7.12.2019.]
- [8] https://www.researchgate.net/figure/Composite-usage-in-Airbus-A350-XWB_fig2_308882060 [7.12.2019.]
- [9] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Composite_material [7.12.2019.]
- [11] https://www.researchgate.net/figure/Hand-lay-up-process-for-fabricating-composite-materials_fig1_305218585 [8.12.2019.]
- [12] Mađerić, G.: Određivanje rezolucije pomaka i deformacija metodom korelacije digitalnih volumena na epoksidnoj smoli ojačanoj staklenim vlaknima, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019.
- [13] S. Gholizadeh. A review of non-destructive testing methods of composite materials. Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Selangor Darul Ehsan, Malaysia.
- [14] <https://en.wikipedia.org/wiki/Radiography> [18.12.2019.]
- [15] Marchiori, M. D. Clinical Imaging, third edition. Part I: Introduction to Imaging. Chapter 2: I. D. McLean, J. Martensen. Specialized Imaging
- [16] https://www.researchgate.net/figure/A-typical-lab-based-cone-beam-x-ray-CT-setup-consisting-of-a-source-and-detector-with-a_fig2_291384870 [2.1.2020.]
- [17] https://d32ogoqmya1dw8.cloudfront.net/images/research_education/geochemsheets/techniques/_1172960774.png [3.1.2020.]
- [18] Cantatore, A., Mueller, P. (2011.). Introduction to computed tomography. Kgs. Lyngby: DTU Mechanical Engineering.

-
- [19] Buljac, A., Jailin, C., Mendoza, A., Neggers, J., Taillandier-Thomas, T., Bouterf, A., Smaniotto, B., Hild, F., Roux, S. Digital Volume Correlation: Review of Progress and Challenges. *Experimental Mechanics*, Society for Experimental Mechanics, 2018, 58 (5), pp.661-708. <10.1007/s11340-018-01390-7>. <hal-01744752>
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_image_correlation_and_tracking [4.1.2020.]
- [21] Leclerc, H., Perie, J.N., Hild, F., Roux, S. Digital Volume Correlation: What are the limits to the spatial resolution?. *Mechanics. Industry*, EDP Sciences, 2012, 13, pp.361-371. <10.1051/meca/2012025>. <hal-00848721>.
- [22] Garcea, S.C., Wang, Y., Withers, P.J.. X – ray computed tomography of polymer composites; *Composites Science and Technology* 156 (2018) 305-319; Science Direct.

PRILOZI

- I. CD – R disc