

## Modeliranje udarnih oštećenja u laminiranim kompozitnim strukturama

DRAGAN D. KRECULJ, Osnovna škola "Jovan S. Popović", Beograd

BOŠKO P. RAŠUO, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

Pregledni rad

UDC: 669.018.9

*Kompozitni laminati imaju značajnu primenu u savremenim inženjerskim strukturama. Oni se odlikuju izvanrednim osobinama, kao što su: visoka čvrstoća i krutost i mala masa. Bez obzira na to, ozbiljna prepreka mnogo široj upotrebi tih materijala je njihova osetljivost na udarna opterećenja. Udari uzrokuju inicijaciju i razvoj određenih tipova oštećenja. Otkazi koji nastaju u laminatnim kompozitnim strukturama mogu biti intralaminarni i interlaminarni. Do danas su razvijeni brojni simulacioni modeli za analizu udarnih oštećenja u laminatima. Takvi modeli mogu zameniti realne i skupe eksperimente na strukturama sa izvesnom tačnošću. Korišćenjem specijalizovanih softverskih paketa mogu biti određeni parametri i raspodela oštećenja (pri određenim uslovima) u laminiranim strukturama. Sa izvođenjem numeričke simulacije udara u kompozitne laminate dobijaju se odgovarajući rezultati, validni za analizu tih struktura.*

**Ključne reči:** udari, oštećenja, laminatne kompozitne strukture

### 1. UVOD

Laminatni kompoziti se mnogo koriste kao strukturni materijali, posebno u aerokosmičkim i automobilskim strukturama, kao i onim za potrebe vojne industrije. Oni poseduju izuzetne karakteristike, kao što su: visoka specifična čvrstoća i krutost, mala gustina, dobre zamorne performanse, otpornost na koroziju i visoke temperature, mogućnost izrade kompleksnih oblika [1].

Kompoziti su veoma osetljivi na udare, koji izazivaju jedva vidljivo udarno oštećenje (barely visible impact damage, BVID) i doprinose gubitku kompresivne čvrstoće strukture, kao glavnog razloga katastrofalnih oštećenja i otkaza. BVID predstavlja skrivenu pretnju, a preostala čvrstoća na pritisak strukture može iznositi samo 30% od njene maksimalne vrednosti.

Fizički fenomeni povezani sa udarnim oštećenjem i shodno tome progresivnom otkazu kompozitnih struktura veoma je složen, zato što je udar karakterisan kao visoko nelinearan i dinamički događaj. Iz tog razloga modeli predviđanja (2D i 3D) i simulacioni alati za projektovanje i analizu udara su obimno istraživani u prethodnim godinama.

Otkaz kompozitnih laminata uključuje sekvencija-

lnu akumulaciju različitih tipova intra- i inter-laminarnih oštećenja, koji postepeno vode ka gubitku kapaciteta nosivosti laminata. Glavni mehanizmi oštećenja, koji se pojavljuju u kompozitnim laminatima su oni u matrici i vlaknu.

### 2. UDARNA OŠTEĆENJA U KOMPOZITNIM LAMINATIMA

Energija apsorbirana tokom procesa udara u kompozitne laminate vrlo je velika. Ta energija se najvećim delom rasipa na kombinaciju oštećenja matrice, loma vlakna i razdvajanje vlakno-matrica. Ove činjenice vode ka značajnijim redukcijama prenošenja opterećenja u takvim strukturama [2].

U balističkim udarima (kratak kontakt između impaktor-a i mete) oštećenje je lokalizovano i jasno vidljivo spoljašnjom vizuelnom kontrolom. Udar niske brzine uključuje dugo vreme kontakta između impaktora i mete, koje proizvodi globalnu strukturnu deformaciju sa neotkrivenim internim oštećenjima u tačka dalje od regiona kontakta [3].

Oštećenja u kompozitima su sasvim različita od onih u metalima. Otkaz kompozita je progresivna akumulacija oštećenja, uključujući višestruke (multiple) modove oštećenja i kompleksne mehanizme oštećenja. Stoga je za analizu takvog otkaza potreban poseban prilaz.

Udar u strukturu ima dinamičku prirodu i stoga je neophodno uzeti u obzir efekte proistekle iz inercije i

Adresa autora: dr Dragan Kreculj, Osnovna škola „Jovan S Popović“ Beograd, Vojvodanska 61

Rad primljen: 18.03.2014.

Rad prihvaćen: 14.10.2014.

širenja naponskih talasa kroz materijal. Često je odgovor materijala visoko nelinearan i javljaju se velike deformacije [4].

Da se eksperimentalno okarakterise ponašanje određenih uzoraka struktura korišćene su različite vrste i iznosi opterećenja. Zatim su predloženi numerički modeli za kontinualna ili diskontinualna oštećenja. Konačno, numerički predviđena udarna oštećenja poređena su sa realnim eksperimentalnim testovima na udar.

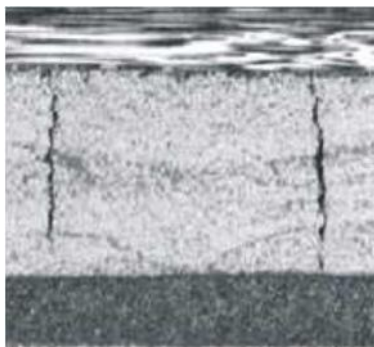
Najprisutniji mehanizmi oštećenja u laminatnim kompozitima su:

- lom vlakna
- transversalna prskotina matrice i
- delaminacija.

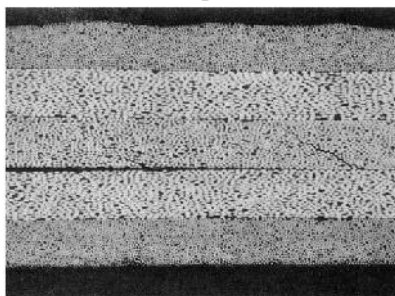
Ovi mehanizmi jasno su presentovani na slici 1. Formirana oštećenja mogu, ali i ne moraju uticati jedno na drugo [5].



a) Lom vlakna



b) Transverzalna matrična prskotina



c) Delaminacija

Slika 1 - Mehanizmi oštećenja u laminatnim kompozitima [5]

Mehanizmi oštećenja u kompozitnim laminatima mogu biti studirani teoretski preko dva prilaza: mehanike kontinualnog oštećenja i mikromehanike. Koristeći priraz mehanike kontinualnog oštećenja, različiti tipovi oštećenja se računaju preko tenzora oštećenja. Primenom aproksimacije mikromehanike, analiza napona oštećene kompozitne strukture se sprovodi u eksplicitnom prisustvu oštećenja.

Oštećenja uočena tokom inicijalnih stadijuma procesa otkaza su intralaminarna i u formi matričnih prskotina. Matrične prskotine iniciraju se mnogo pre gubitka kapaciteta nosivosti laminata. To postepeno redukuje krutost i čvrstoću laminata.

Budući projekti zahtevaju razvoj i implementaciju proračunskih modela i simulacije, da se dobiju validni i pouzdani rezultati. Neki od glavnih zadataka su usmereni na: poboljšanje metodologije; proširenje i validiranje rezultata kroz korelaciju sa eksperimentalnim test podacima; korišćenje simulacionog modela, da se analiziraju tipični udarni odgovori i da se dobiju buduća pojašnjenja karakteristika udarnog oštećenja [3].

Klasična teorija laminiranih kompozita bazira se na serijama pojednostavljenih hipoteza. Lamine se razmatraju kao vrlo tanke, napravljene od homogenog, ortotropnog, linearno elastičnog materijala sa ravnanskim stanjem napona. Takođe, pretpostavlja se perfektna adhezija između lamina, kao i Kirchhoff-ova hipoteza. Mnogi algoritmi i modeli baziraju se na ovim činjenicama i oni vode ka opštem stanju napona i deformacija, bez karakterizacije mehaničkog ponašanja ovih materijala.

Zbog anizotropije kompozitnih laminata i neuniformne distribucije napona, usled dinamičkog opterećenja, proces otkaza u laminatima je vrlo kompleksan. Dinamički odgovor kompozitnih struktura izloženih tranzijentnom dinamičkom opterećenju uključuje analitički, eksperimentalni i proračunski priraz. Udarno oštećenje je glavna opasnost za bezbednost i pouzdanost u laminatnim kompozitnim strukturama. Određeni udar u strukturu često izaziva oštećenje, koje ozbiljno redukuje čvrstoću, krutost i stabilnost strukture [6].

Generalno, udari se kategorišu u one niske i visoke brzine, ali ne postoji strogi prelaz između ovih kategorija. Obično se brzina ograničava u opsegu od 10 do 100 m/s. Ipak, jasna razlika u obliku oštećenja razvijenog nakon svakog od tih tipova udara postoji. Sjöblom i Shivakumar tvrde da je oštećenje lokalizovano usled udara visoke brzine, pošto se incidentna energija rasipa u veoma maloj zapremini; a oštećenje karakteriše penetracijom indukovanom lomom vlakna. Tokom udara niske brzine, oštećenje se inicira matričnim

prskotinama, koje kreiraju delaminacije na interfejsima između slojeva sa različitim orijentacijama vlakana.

Tradicionalno, modeli udarnog oštećenja grade se na ili analitičkim proračunima, ili ekstenzivnim eksperimentalnim podacima. Analitička predviđanja otpornosti i tolerancije kompozitnih laminata su preterano pojednostavljena i nepouzdana. Sa druge strane, testiranje nekog projekta prilično traje i košta. Relativno jeftini virtualni testovi nelinearne analize metodom konačnog elementa mogu zameniti udarne testove na laminatima. Kada su mehanizmi oštećenja korektno simulirani, progresivne analize otkaza mogu biti pogodan alat u tačnom predviđanju otpornosti udarnom oštećenju kod kompozita.

Udarno oštećenje indukuje značajne redukcije u stabilnosti i čvrstoći laminatnih kompozitnih struktura. Oštećenje letelice usled udara niske brzine od ptica, nekih delova na poletno-sletnoj stazi, pada alata tokom proizvodnje ili procedura održavanja, mogu uzrokovati oštećenja ispod limita BVID. Ovi tipovi oštećenja mogu voditi ka katastrofalnom otkazu i to je važno uzeti u obzir u procesu projektovanja kompozitnih struktura. Pošto je takvo oštećenje teško detektovati, posebno tokom eksploatacije, strukture moraju biti sigurne i sa prisutnim BVID-om [7].

Kompleksni problem određivanja efekata udarnog oštećenja može biti podeljen na dva domena:

- otpor udarnom oštećenju, povezan sa odgovorom i oštećenjem usled udara i
- tolerancija udarnom oštećenju, u vezi sa redukovanim čvrstoćom i stabilnošću strukture zbog već nastalog udara [7].

Obično, udarno oštećenje je unutrašnje i ne može biti detektovano vizuelno. Ono može da raste pod daljim opterećenjem i značajno redukovati kapacitet nosivosti strukture [8].

Pod udarima visoke brzine, pritisci generisani u materijalu mogu dostići visoke vrednosti. Pri takvim uslovima, materijali pokazuju hidrodinamičke efekte bez čvrstoće na smicanje. Pri tim uslovima jednačina stanja koristi se da se modeluje konstitutivni zakon i definiše relacija između termodinamičkih parametara, kao što su: pritisak, zapremina i temperatura [9].

U poslednje dve decenije učinjeni su značajni naponi na polju izučavanja otpora udarnom oštećenju kompozitnih struktura. Ovaj problem bio je detaljno predložen od strane Abrate (1991, 1994, 1998.). Mnoge studije udara baziraju se na Hertz-ovom kontaktnom zakonu, koji je razvijen za statičko opterećenje na izotropno linearno elastičnoj ploči.

U studijama udarnog oštećenja carbon fiber reinforced plastics (CFRP) tri glavna tipa oštećenja su

bila prisutna: lom vlakna, matrične prskotine i multiplicirane interlaminarne delaminacije. Redukcija kompresivne čvrstoće usled udara je mnogo značajnija od redukcije zatezne čvrstoće i drugih čvrstoća. Rezidualna čvrstoća se fokusira na razdvajanje slojeva delaminacijom i može takođe uzrokovati značajnu redukciju kompresivne čvrstoće [7].

U istraživanjima naglasak je na razvoju modela otkaza pogodnih za upotrebu u eksplicitnim FE kodovima, kako bi se predvidelo oštećenje poteklo od dejstva udarnog opterećenja u kompozitne strukture. Ovo je "multiscale" problem, pošto je oštećenje kompozita na "microscale" nivou, dok je udar na strukturalnom nivou [10].

Tokom eksploatacije letelica opterećenja često uključuju udar, koji može rezultovati u velikoj unutrašnjoj oblasti oštećenja laminata (ne detektuje se vizuelno). Fluktuirajuća radna opterećenja, posebno kompresija, mogu kontinualno uvećati zonu oštećenja, rezultujući sa kompletnim strukturalnim kolapsom oštećenog dela. Udarne oštećenja mogu imati zanemarljiv uticaj, ali i biti kritična za integritet i radni vek konstrukcija od kompozita. Neophodno je tačno predvideti gde će se oštećenja javiti, kako će se ona širiti i kada će eventualno proizvoditi lom i otkaz konstrukcija [11]. Otpor oštećenju kod kompozitnih materijala se meri sposobnošću da ne nastane oštećenje usled udara. Alternativno, tolerancija oštećenja može se razmatrati kao mera preostale čvrstoće, nakon određenog perioda dejstva opterećenja [12].

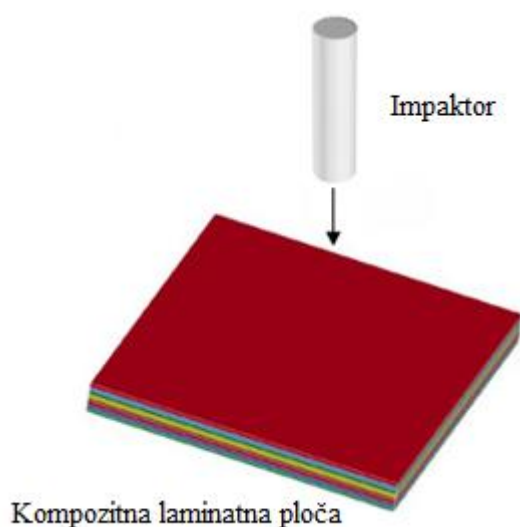
### 3. MODELIRANJE UDARA U LAMINATE METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Modeliranje udara u kompozitne laminirane strukture istraživano je od strane brojnih istraživača i inženjera. Najviše korišćeni prilaz za ovaj tip problema je analiza konačnim elementima (Finite Element Analysis - FEA).

Kako bi se analizirao takav problem razmatra se dinamički odgovor laminirane ploče usled udara. FEA uključuje velike deformacije u kratkom vremenskom intervalu, zahtevane za rešenje tranzijentnih dinamičkih problema. Eksplicitne i implicitne tehnike, ili kombinacija obe, bile su korišćene kao osnova za FE kodove udara [13]. Slika 2 opisuje udar krutog tela (impaktor; masa -  $m$ , radijus -  $r$  i brzina -  $V$ ) u laminatnu kompozitnu ploču. Uvođenjem konvencionalnih rezultanata sila i momenata ( $N_x, N_y, N_{xy}; M_x, M_y, M_{xy}; Q_x, Q_y$ ), konstitutivna jednačina laminata data je kao:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \\ Q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & 0 \\ B^T & D & 0 \\ 0 & 0 & F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad (1)$$

gde su:  $[A]$  proširena matrica krutosti,  $[B]$  proširena matrica savijanja,  $[D]$  matrica krutosti na savijanje i  $[F]$  transverzalna čvrstoća smicanja [14].



Slika 2 – Udar impaktora u kompozitnu laminatnu ploču

Glavna jednačina dinamike strukture data je Hamilton-ovim principom. Pošto je ona povezana sa piezoelektričnim kontinuumom, Lagrangian se posebno prilagođava da obuhvati doprinos od električnog polja, pored već onog od mehaničkog polja [15].

Dinamička jednačina za ploču data je sledećim izrazom:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (2)$$

gde su  $[M]$  i  $[K]$ , matrice masa i krutosti kompozitne ploče. U jednačini (2)  $\{u\}$  i  $\{\ddot{u}\}$  su vektori pomeranja i ubrzanja,  $\{F\}$  je ekvivalentno spoljašnje opterećenje (koje uključuje silu udara) [7].

Ako je impaktor kruta lopta, dinamička jednačina je data Drugim Newton zakonom:

$$m_i \ddot{w}_i = -F_c \quad (3)$$

gde su:  $m_i$  masa lopte, a  $F_c$  kontaktna sila.

Razmatra se kontakt između lopte od izotropnog materijala i mete od laminirane kompozitne ploče, koja sadrži  $N$  transverzalnih tankih slojeva. Pri tome kontakt je lociran u centru ploče.

Ova kontaktna sila između impaktora i ploče se računa koristeći modifikovani nelinearni Hertz-ov zakon uvlačenja predložen od strane Tam- i Sun-a:

$$F = k\alpha^{3/2} \quad (4)$$

gde je  $\alpha$  uvlačenje,  $k$  je Hertz-ova kontaktna konstanta.

Za ploču  $\alpha$  je dato sledećom jednačinom:

$$\alpha(t) = w_i(t) - w_s(t) \quad (5)$$

$w_i(t)$  i  $w_s(t)$  su pomeranja impaktora i udarne tačke na srednjoj površini ploče. Rešenje za nelinearnu jednačinu dobijeno iz predstavljenih jednačina (1), (2), (3) i (4), sprovodi se iterativnom procedurom koristeći Newton-Raphson metodu.

Kako bi se rešile jednačine (1) i (2) koristi se Newmark algoritam. Newmark-ova šema integracije upotrebljava se da reše dinamičke jednačine za objekat udara (ploču) i impaktor u funkciji vremena [16].

FEA se upotrebljava da se simulira strukturalno ponašanje kompozita i procene efekti udara. Kako bi se numerički optimizovao projekat kompozitnih struktura za toleranciju udarnog oštećenja, neophodno je modelovati dve faze: fazu udara (posebno permanentno uvlačenje) i fazu rezidualne čvrstoće nakon udara [17].

#### 4. „MULTISCALE” MODELIRANJE OŠTEĆENJA

Oštećenja u kompozitnim laminatima javljaju se usled različitih mehanizama. Neki od njih (lom vlakna, matična prskotina, delaminacija) su već predstavljeni u uvodnom delu (slika 1) [18].

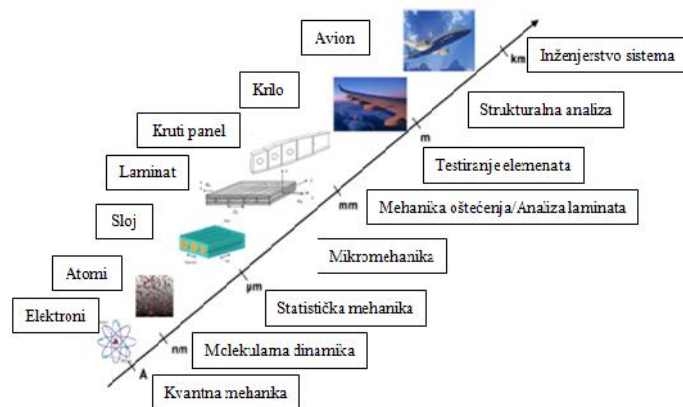
Da se potpuno objasni skriveni fenomen degradacije strukture i okarakteriše njegov uticaj na performanse materijala, ključno je povezati dve skale: skalu na kojoj se ovi procesi odvijaju („microscale”), i skalu na kojoj razmatramo materijal (strukturalna ili „macroscale”). U realnosti ove dve skale, mogu biti različite jedna od druge i zahtevati razmatranje međuskale („mesoscale”). Proces povezivanja osobina materijala pri ovim različitim skalama je označen kao „multiscale” modeliranje. Na slici 3 opisana je hijerarhija svih mogućih skala (strukturalne skale) uključene u „multiscale” modeliranje vazduhoplovnih materijala (modeliranje oštećenja) [19].

Druga činjenica, za „multiscale” modeliranje oštećenja, jeste da totalno oštećenje može biti usled višestrukih (multiple) mehanizama oštećenja, čije skale mogu biti sasvim različite jedna od druge. Osim toga, ove skale mogu se razvijati kako se opterećenje povećava. Mikrostrukturalna konfiguracija i sile za inicijaciju i progresiju oštećenja determinišu skale oštećenja. Prema tome, skale oštećenja i njihova hijerarhija nisu fiksne, već su određene razvojem istog kao funkcije opterećenja [19].

„Multiscale” model ne reprodukuje egzaktno isti odgovor kao „singlescale” model. Preporuka je da se istražuju druge dobro poznate i po mogućstvu nove metodologije, da se sprovedu mnogo efikasnije simulacije udarnog oštećenja u kompozitnim laminatnim strukturama [20].

Predviđanje oštećenja u multidirekcijskom laminatu, pod složenim opterećenjem, prilično je teško. Rezultujući problem granične vrednosti za multidirekcijske laminatne je previše komplikovan da se dostigne bilo koje relevantno rešenje (iz domena elastično-

sti), te je opšta strategija bila upotreba računarskih alata. Otuda, treba razviti jednostavniji prilaz, koji bi mogao biti korišćen za predviđanje oštećenja takvih laminata, i takođe lako integrisan u model "multiscale" analize [21].



Slika 3 - Hijerarhija strukturalnih skala u modeliranju oštećenja vazduhoplovnih kompozita [19]

## 5. NUMERIČKA SIMULACIJA UDARA U KOMPOZITNE LAMINATNE STRUKTURE

FEA je numerička tehnika za rešavanje matematičkih modela čvrstih strukturalnih komponenti, transfera toplote i toka fluida. Ona može biti upotrebljena za određivanje napona, pomeranja, deformacija i prirodnih frekvencija oscilovanja strukturalnih komponenti; kao i brzina i pritisaka u analizi strujanja fluida. Za numeričku simulaciju udara u kompozitne strukture razvijeni su 2- ili 3-dimenzionalni modeli. Svaki od njih ima odgovarajuće karakteristike, tačnost i prema tome primenu u određenim domenima.

Da se redukuju troškovi razvoja i sertifikacije za kompozitne strukture, zahtevaju se efikasne proračunske metode. Otkaz u kompozitima se inicira na mikroskopskom nivou (skala razmatranja dijametra vlakna), dok je skala struktura letelica u metrima. Ovo predstavlja ozbiljan izazov za FEA kompozitnih struktura. Korišćenjem "meso-scale" modela baziranim na mehanici kontinualnog oštećenja, predloženim od strane Ladevèze i saradnika, moguće je definisati materijalne modele preko kodova konačnih elemenata na strukturalnom makro nivou. Tako se otkazi unutar i između slojeva (delaminacije) mogu modelirati. Modeli otkaza slojeva su razvijani za unidirekcijska i multidirekcijska vlakna i mogu se predstaviti sa skalarnim parametrima oštećenja [22].

Tokom godina inženjeri su sproveli brojne napore da se optimizuju udarne performanse višeslojnih kompozitnih sistema. Većina ovih pokušaja su eksperimentalni, koji mogu biti vremenski dugi i skupi. Numeričke simulacije povezane sa eksperimentima pokazale su da obezbeđuju, uz mnogo manje troškova, procene

udarnih performansi laminiranih sistema. Dodatno, numeričke simulacije pružaju uvid u odgovore materijala i mehanizme otkaza, nastalih u laminatima tokom udara [23].

Sa sofisticiranim tehnikama numeričke analize i moćnim računarima kakvi su danas, esencijalni su modeli koji mogu tačno opisati odgovor i otkaz kompozitnih materijala pod velikim deformacijama i pri visokim brzinama deformacije. Kada se simuliraju dinamički događaji, odgovor strukture tipično je opisan sa sledećim parametrima: jednačinom stanja, unutrašnjom energijom i temperaturom; konstitutivnom relacijom koja opisuje čvrstoću materijala (otpornost na distorziju); i modelom otkaza koji može opisati otkaz materijala pod multiaksijalnim stanjem napona pri različitim brzinama deformacije [23]. U projektima za analizu udara u strukture koristi se širok opseg softverskih paketa. Među njima najveću primenu imaju: ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS [24].

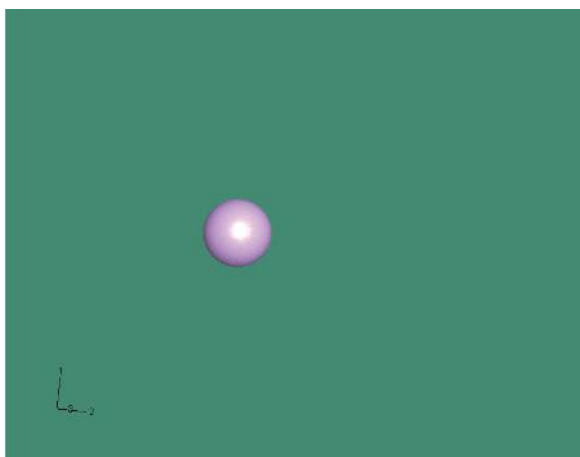
## 6. MODELIRANJE UDARA PROJEKTILA U OJAČANU PLOČU OD KARBONSKOG VLAKNA U PROGRAMU ABAQUS

Za simulaciju udara korišćen je projektil (impaktor) u vidu hladno valjane čelične lopte (prečnika 5 mm) sa početnom brzinom normalnom na ravan ploče. Kompozit u obliku ploče je ortotropni  $[0/90/0]_{3s}$ , ima ukupno 18 slojeva (debljine po 0.2 mm). Projektil i ploča razmatrani su kao čvrsti kontinualni elementi redukovane integracije prvog reda (C3D8R) [25]. Izvršena je simulacija udara u programu ABAQUS i dobijeni su odgovarajući grafički prikazi nastalih oštećenja. Na slici 4 predstavljeni su detaljno rezultati takvog simulacionog ispitivanja i to redom po fazama

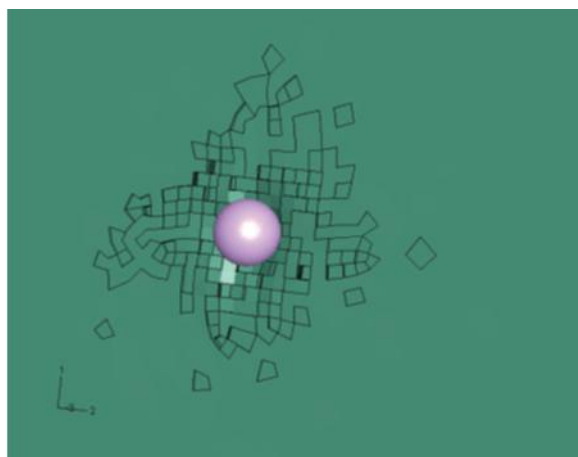


(1-6). Iz predstavljenog se jasno vidi dejstvo udara, odnosno faze procesa udara u ispitivanu strukturu. Pri

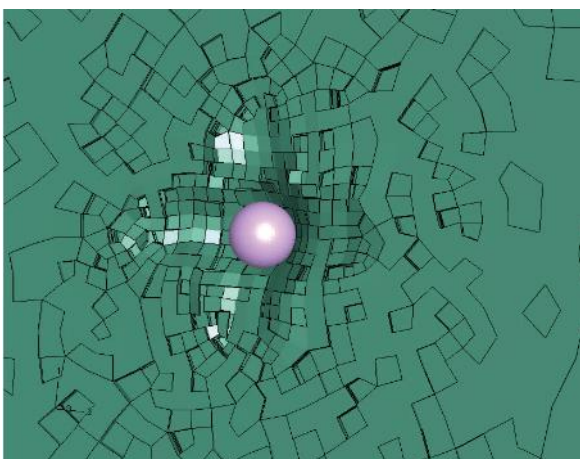
tome se jasno uočavaju oštećenja (od najmanjih do najvećih), da bi na kraju došlo do potpunog loma te strukture.



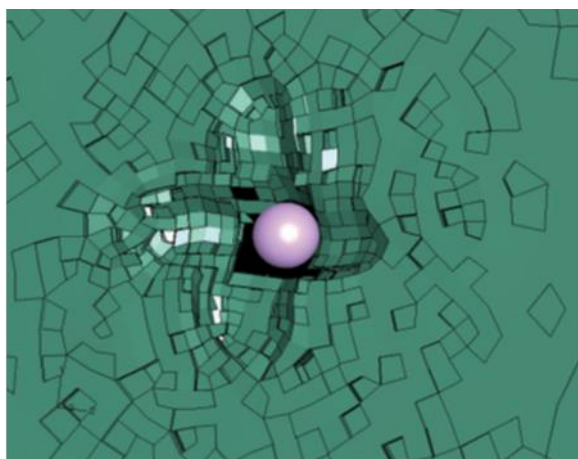
1) faza



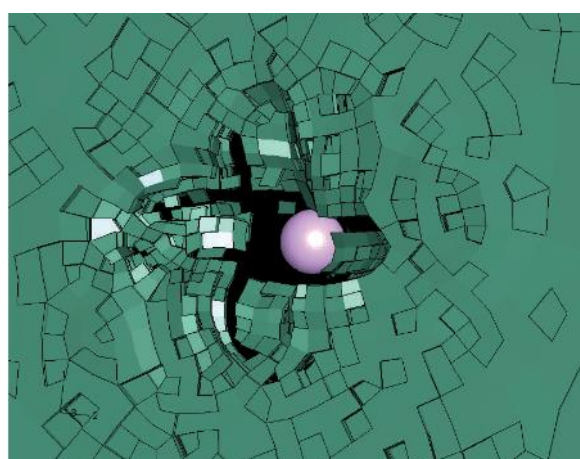
2) faza



3) faza



4) faza



5) faza



6) faza

Slika 4 - Prikaz udara (po fazama) čelične lopte u kompozitnu ploču od karbonskog vlakna [25]

## 7. ZAKLJUČAK

Udarne oštećenja u strukturama od laminatnih kompozita veoma su složena. Među njima najčešća i najznačajnija su: prskanje matrice, otkaz vlakna i delaminacija. Mogućnost da se predvidi početak i rast oštećenja krucijalna je za procenu performansi i razvoj pouzdanih i bezbednih struktura od kompozita. Korišćenjem simulacija u modeliranju udarnih oštećenja troškovi testiranja pri projektovanju i održavanju takvih struktura biće prilično smanjeni.

Usled široke upotrebe kompozitnih materijala u različitim tehničkim strukturama, neophodno je uvesti nove prilaze za modeliranje udarnog oštećenja. Efikasne metodologije modeliraju kompozitne strukture specijalizovanim metodama konačnih elemenata (koje uzimaju u obzir makromehaničke strukturalne osobine) i upotrebom numeričkih metoda sa kompleksnim kodovima za analizu. Kako bi se validirali rezultati ovih postupaka, u procesu projektovanja čvrstoće struktura neophodna je verifikacija numeričkog modela. Poređenje eksperimentalnih i dobijenih numeričkih rezultata čini se kako bi se ustanovilo koliko su predloženi modeli tačni i validni.

Kompozitna oštećenja postoje na "microscale" nivou, dok su udarna opterećenja prisutna na "macroscale" (strukturalnom) nivou. Zbog toga je za takav tip problema i sveobuhvatnu analizu neophodno uvesti i razmatrati tzv. "multiscale" prilaz.

Razvoj odgovarajućih konstitutivnih zakona za modeliranje otkaza kompozitnih laminata i modela sa kodovima konačnih elemenata pri dejstvu udara, pružaju značajnu pomoć u fazama projektovanja i eksploatacije određenih struktura. Ipak, konačna potvrda uočenih činjenica i zakonitosti može se realizovati samo eksperimentima.

Razvijanje proračunskih modela i izvršenje simulacija potrebni su u proučavanju nastanka, ali i razvoja udarnih oštećenja. U numeričkoj simulaciji udara u kompozitne strukture može se uopšteno reći da postoje 2- ili 3-dimenzionalni modeli.

Za analizu udarnog oštećenja kompozitnih laminata komercijalni softveri ABAQUS i LS-DYNA najviše su u upotrebi. ANSYS i neki nekomercijalni softveri su takođe pogodni za istu svrhu. Sa njihovim korišćenjem, pri određenim uslovima (geometrija, granični uslovi, mreža, opterećenja) distribucije oštećenja, napona, pomeranja, deformacija itd. mogu biti grafičke predstavljene i analizirane.

U razmatranju udarnih oštećenja u laminiranim kompozitima suštinski je istražiti dinamički odgovor pri dejstvu udara i predvideti inicijaciju/rast oštećenja u tim strukturama. Za takvu analizu numeričko modeliranje i simulacije oštećenja uzrokovanih udarom obezbeđuju značajne i vrednosne rezultate.

## LITERATURA

- [1] B. Rašuo: Tehnologija proizvodnje letelica, Mašinski fakultet Beograd, 1995.
- [2] M. R. Karim: Constitutive Modeling and Failure Criteria of Carbon-Fiber Reinforced Polymers under High Strain Rates, Doctor Dissertation, the Graduate Faculty of the University of Akron, 2005.
- [3] U. Farooq, K. Gregory: Finite Element Simulation of Low Velocity Impact Damage Morphology in Quasi-Isotropic Composite Panels under Variable Shape Impactors, European Journal of Scientific Research, Vol. 25, No. 4, pp. 636-648, 2009.
- [4] D. Kreculj, B. Rašuo: Problem udara u konstrukcije letelica od kompozitnih materijala, Tehnika, No. 6, Mašinstvo, pp. 1-8, Beograd, 2009.
- [5] A. Birur: Time-Dependent Damage Evolution in Multidirectional Polymer Composite Laminates, Master Thesis, University of Manitoba, Canada, 2008.
- [6] R. Tiberkak, M. Bachene, S. Rechak, B. Neciba: Damage Prediction in Composite Plates Subjected to Low Velocity Impact, ScienceDirect, Composite Structures 83, pp. 73-82, 2008.
- [7] E. Nilsson: Residual Strength Prediction of Composite Laminates Containing Impact Damage, Master Thesis, Linköping University, 2005.
- [8] S. Abrate: Impact Engineering of Composite Structures, pp. 71-96, CISM Courses and Lectures, Vol. 526, Springer, 2011.
- [9] O. Matic: Modelling of High Velocity Impact on Composites, Master Thesis, Cranfield University, 2007.
- [10] A. F. Johnson: Modelling Impact Damage in Composite Structural Elements, German Aerospace Center (DLR), Stuttgart, 2005.
- [11] D. Kreculj: Stress Analysis in a Unidirectional Carbon/Epoxy Composite Material, FME Transactions, Vol. 36, No. 3, pp. 127-132, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2008.
- [12] A. R. Brindle: Predicting the Damage Tolerance of Carbon Fibre Coupons Based on Impact Response, Master Thesis, Cranfield University, 2007.
- [13] S. K. Chelluru: Finite Element Simulations of Ballistic Impact on Metal and Composite Plates, Master Thesis, Andhra University, 2007.
- [14] Z. Aslan: Behavior of Laminated Composite Structures Subjected to Low Velocity Impact, Doctor Thesis, Dokuz Eylül University, Izmir, 2002.
- [15] D. Marinkovic, H. Köppe, U. Gabbert: Numerically Efficient Finite Element Formulation for Modeling

- Active Composite Laminates, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, pp. 379-392, 2006.
- [16] R. Tiberkak, S. Rechak and M. Bachene: The Dynamic Response of Laminate Composite Plate under Low-Velocity Impact, 25<sup>th</sup> International Congress of the Aeronautical Sciences, 2006.
- [17] C. Bouvet, S. Rivallant, J. J. Barrau: Modelling of Impact Damage and Permanent Indentation on Laminate Composite Plate, 14<sup>th</sup> European Conference on Composite Materials, Budapest, 2010.
- [18] R. Talreja: Multi-scale Modeling in Damage Mechanics of Composite Materials, *Journal of Materials Science*, Vol. 41, pp. 6800-6812, 2006.
- [19] C. V. Singh: Multiscale Modeling of Damage in Multidirectional Composite Laminates, Doctor Dissertation, Texas A&M University, 2008.
- [20] S. A. Sabet: Investigation of Multi-scale Modeling Strategies to Simulate High Velocity Impact Damage, Master Thesis, Stuttgart, 2011.
- [21] C. V. Singh: Multiscale Modeling of Damage in Multidirectional Composite Laminates, Doctor Thesis, Texas A&M University, 2008.
- [22] A. Johnson: Influence of Delamination on Impact Damage in Composite Structures, German Aerospace Center (DLR), Stuttgart, 2003.
- [23] C. G. Fountzoulas, B. A. Cheeseman, P. G. Dehmer and J. M. Sands: A Computational Study of Laminate Transparent Armor Impacted by FSP, 23<sup>rd</sup> International Symposium on Ballistics, Tarragona, Spain, 2007.
- [24] D. Kreculj: Modeliranje udarnog oštećenja u laminatnim kompozitnim strukturama, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Beograd, 2013.
- [25] Projectile Impact on a Carbon Fiber Reinforced Plate, Abaqus Technology Brief TB-06-CRP-1, DSS Simulia, 2007.

## SUMMARY

### IMPACT DAMAGES MODELING IN LAMINATED COMPOSITE STRUCTURES

*Laminated composites have an important application in modern engineering structures. They are characterized by extraordinary properties, such as: high strength and stiffness and lightweight. Nevertheless, a serious obstacle to more widespread use of those materials is their sensitivity to the impact loads. Impacts cause initiation and development of certain types of damages. Failures that occur in laminated composite structures can be intralaminar and interlaminar. To date it was developed a lot of simulation models for impact damages analysis in laminates. Those models can replace real and expensive testing in laminated structures with a certain accuracy. By using specialized software the damage parameters and distributions can be determined (at certain conditions) on laminate structures. With performing numerical simulation of impact on composite laminates there are corresponding results valid for the analysis of these structures.*

**Key words:** *Impacts, Damages, Laminated Composite Structures*