

Errata for “On numerical analyses of woven composite laminates: homogenization, damage and fracture”.

Juan José Espadas Escalante

September 10, 2019

- An extended “Sammanfattning på Svenska” has been added. It can be found at the end of this document.
- In page 37 one reads: “The plane-stress condition”, it should be “plane stress conditions”.
- Paper I, Eq. (2a) should be “in V ” instead of “on V ”.
- Paper II, Figure 1. After the IF statement reads “ $g < 0$ ”, it should be “ $g \leq 0$ ”.
- Paper II, page 14 one reads “stress-stress curves”, it should be “stress-strain curves”.
- Paper II, Fig. 11a, the zoom-in should have the x -axis scale from 0.95 to 0.99.
- Paper II, Eq. (20b) should be a minus sign instead of a plus one.
- Paper II, Eqs. (27a – 27c) the constant factor should read “ $2/\lambda$ ” instead of “ $\lambda/2$ ”.
- Paper VI, section 3.1.2. reads “fractofrapies” when it should be “fractographies”.
- Paper VI, table 2 shear stress components should read τ_{12} instead of σ_{12} .

Sammanfattning på Svenska (Utökat)

Kompositer med vävd armering används ofta i industriella tillämpningar där konstruktioner med goda mekaniska egenskaper och låg vikt önskas. Idag testas alla konstruktioner som är gjorda av kompositmaterial experimentellt innan de används vilket är både tidskrävande och kostsamt. Ett attraktivt alternativ skulle därför vara att kunna använda så kallad virtuell testning, där istället datamodeller används för att beräkna konstruktionens egenskaper. Virtuell testning är dock inte oberoende av experimentell testning utan kräver experimentella tester för kalibrering av parametrar varje gång någon komponent ändras. Antalet experiment skulle dock kunna reduceras om vissa av parametrarna också kan bestämmas via virtuell testning. För att framgångsrikt kunna använda virtuell testning är det viktigt att förstå hur egenskaper hos konstruktioner beror av egenskaperna hos de ingående komponenterna.

I denna avhandling undersöks hur de mekaniska egenskaperna hos kompositer med vävd armering beror av egenskaperna hos dess ingående komponenter. Den komplexa uppbyggnaden för denna typ av laminat tillsammans med interaktionen mellan olika brottsmekanismer i olika storlekar utgör ytterligare utmaningar i deras utformning som komponenter i kompositmaterial. I denna avhandling beaktas vissa effekter på mesoskopisk skala. Särskilt fokus ägnas åt att studera mekanismer förknippade med brottsinitiering och utveckling som ofta leder till brott i större skala.

Avhandlingen är baserad på sex publicerade artiklar som handlar om de elastiska egenskaperna hos kompositer med vävd armering, effekter av skiktförskjutning, initiering av sprickor och brott. Först visas att valet av randvillkor kan ha en betydande inverkan, inte bara för de uppskattade egenskaperna utan också för den fysiska representationen av kompositens beteende. De sammansatta elastiska egenskaperna för kompositstrukturer studerades med hjälp av en beräkningshomogeniseringsmetod. Olika alternativ för randvillkor användes och illustreras först genom att använda enhetliga randvillkor för förskjutning, enhetliga randvillkor för dragspänning, periodiska gränsvillkor, periodiska gränsvillkor under plant spänningsförhållanden och en blandning av periodiska och enhetliga randvillkor för dragspänning i en generell heterogen periodisk struktur. I avhandlingen visas att valda randvillkoren starkt kan påverka uppskattningen av vissa elastiska egenskaper längs planet beroende på antalet skikt som antagits medans effekten på egenskaperna i planets normalriktning är mindre framträdande. Vidare har effekten av randvillkoren för kompositer med vävd armering simulerats och resultaten har jämförts med experimentella data. Från denna jämförelse kan man se att antalet lamina och randvillkoren har en stor betydelse för de elastiska egenskaperna längs planet men en mindre påverkan på elastiska egenskaperna i planets normalriktning. Ett vanligt antagande i litteraturen är att ett enda lamina med tredimensionell periodicitet kan representera beteendet hos kompositer med vävd armering men i detta arbete har även en modell som består av begränsat antal lamina med periodicitet längs planet använts. Det visade sig att detta tillvägagångssätt resulterade i en mer noggrann representation. De olika tillvägagångssätten gav inte bara skillnader i uppskattningen av de elastiska egenskaperna utan också i storleken på töjningsfälten.

En sak som belyses i avhandlingen är vikten av skiktens relativa placering. Genom att ta hänsyn till detta kan man få bättre beskrivningar av fenomen som observerats experimentellt,

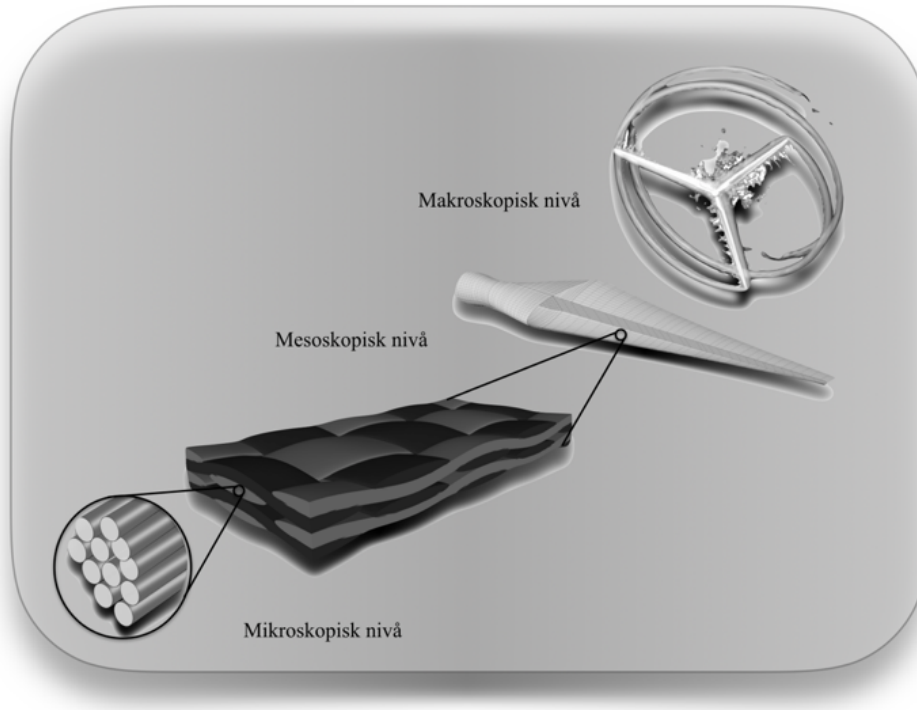


Figure 1: Nivåer i kompositer med vävd armering.

t.ex. förstyrkning av responsen i planet, placering, distribution och mängd skada, alstring av tvärsprickor och gynnsamma regioner för delaminering. Även om det i praktiken inte är möjligt att kontrollera placeringen av skikten, är kännedom om dess placering gynnsam för att kunna representera det komplexa beteendet hos dessa heterogena strukturer under olika belastningsscenarioer. Genom att ta hänsyn till skiktens relativa placering fås en modell som är mer exakt än de mer förenklade metoderna så som enhetsceller men även mer beräkningseffektiv än mer komplexa modeller som innefattar många defekter samtidigt. Ytterligare har kapaciteten hos fasfältteori för att studera spröda brott i kompositmaterial analyserats på mikroskopisk, mesoskopisk och makroskopisk nivå (se figur 1). På mikroskopisk nivå har fasfältmetoden för sprickor använts för att studera sprickvägar i fiberbuntar. Det visade sig att metoden är användbar för att representera sprickvägar som utvecklas vid kompression och tvärspänning.

På mesoskopisk nivån har sprickvägar hos tvärgående garn i vävda textilstärkta kompositlaminat under enaxlig belastning studerats. Specifikt har skiktförskjutning och dess inverkan på elasticitetsmodulen längs planet analyserats. Effekter av skiktförskjutning studeras i utvecklingen av sprickor och deras inverkan på bidraget till minskning av elasticitetsmodulen längs planet. Det visade sig att den bästa uppskattningen av sprickutvecklingen erhöles när skiktförskjutning liknade skiktförskjutningen som observerades experimentellt. Vidare konstateras att prediktera spricktillväxt med denna metod är lika pålitliga som med mer komplexa metoder som innefattar många defekter samtidigt. Dessutom kan det föreslagna fasfältmetoden fånga sneda sprickor som observerades experimentellt eftersom dess naturliga formulering inte kräver förkunskaper om deras form eller position. På

makroskopisk nivå, undersöks två kvasi-isotropa skårade laminater. Spricktillväxtens beskaffenhet används för att uppskatta materialets hållfasthet. Det visade sig att fasfältmetoden kunde förutsäga hållfasthet med rimlig noggrannhet. En fördel med fasfältmetoden är dessutom att den kräver mindre antal experimentella parametrar än andra metoder i litteraturen som baseras på klassiska kontinuumskademodeller.

Delaminering har studerats ur två perspektiv där det ena överväger effekten av fria kanter som uppstår under uniaxial förlängning och det andra balkar som utsätts för ett skjuvningstest med kort spann. Effekten av fria kanter hos kompositer med vävd armering visade sig vara olika än för kompositer med enkelriktade fiber. Det visade sig även att effekten av fria kanter drastiskt minskade med ökande förskjutning av skikten i kompositen. Detta antyder att delamineringen inte nödvändigtvis börjar vid de fria kanterna. Under skjuvningstesten med kort spann visade det sig att balkar gjorda av kompositer med vävd armering ger olika spänningsfördelning beroende på skiktförskjutning.

Sammantaget kan man se att inkludera skiktens relativa placering i modellering av kompositer med vävd armering inte bara är effektivt utan ger också värdefull information om hur dessa defekter påverkar brottbeteendet.