

Konstruiranje in optimizacija izdelkov iz poliestrskih laminatov

Design and Optimization of Products Based on Polyester Laminates

M. Makarovič¹, ZAG Ljubljana
Frano B. Damjanić, FGG Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1995-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1995-12-22

Konstruiranje in dimenzioniranje izdelkov iz polimernih laminiranih kompozitnih materialov zahteva drugačen način, kot smo ga bili vajeni pri izdelkih iz klasičnega konstrukcijskega materiala, kot so npr. jeklo oziroma homogeni polimerni materiali. V prispevku je prikazan način dimenzioniranja izdelkov iz laminiranih kompozitnih materialov in nekatere naše izkušnje pri dimenzioniranju konstrukcij iz poliestrskih laminatov. Prikazane so možnosti:

1. izračuna mehanskih lastnosti in debelin posameznih plasti laminatov z različno armaturo in različnim razmerjem smola - armatura
2. izračun mehanskih lastnosti in debelin posameznih plasti že izdelanega laminata
3. računalniške analize odziva konstrukcije iz poliestrskega laminata na predvidene obtežbe z metodo končnih elementov, s katero je možno analizirati konstrukcijo po posameznih plasteh in v poljubnem številu točk.

Ključne besede: poliester, laminati, konstruiranje

Design and dimensioning of products based on polymer laminated composite materials requires a different access as in the case of products based on classical structural materials such as steel or homogeneous polymeric materials. The way how to undertake a design of products made of laminated composite materials and some experiences gained with laminated polyester structures are presented within this paper. The following possibilities are shown:

1. Calculation of mechanical properties and single laminate layer thicknesses in cases of various kinds of reinforcement and various resin to reinforcement ratios.
2. Calculation of mechanical properties and single laminate layer thicknesses of an already manufactured laminate.
3. Computer supported analysis of a polyester laminated structure response to foreseen loads by the finite elements method, allowing results for single laminate layers and an arbitrary number of nodes to be obtained.

Key words: polyester, composites, design

1 Uvod

Dimenzioniranje izdelkov iz poliestrskega laminata zahteva drugačen način, kot smo ga bili vajeni pri izdelkih iz klasičnega konstrukcijskega materiala kot je npr. jeklo. Potreben je predvsem iz naslednjih razlogov oziroma razlik med jeklom in poliestrskim laminatom kot konstrukcijskima materialoma:

- 1) Lastnosti jekla kot konstrukcijskega materiala so znane in standardizirane za razliko od poliestrskega laminata, kjer taka standardizacija ni možna in tudi ni smiselna, saj se z uporabo različnih smol, armatur in razporeditve le-teh lastnosti laminata lahko močno spreminjajo.
- 2) Postopki dimenzioniranja jeklenih konstrukcij so znani in prilagojeni možnim tehnologijam izdelave. Temeljijo predvsem na homogenosti in linearno elastičnem vedenju materiala ter pričakovanim relativno majhnim pomikom, ki so posledica visokih modulov elastičnosti.

Pri poliestrskih laminatih moramo upoštevati dejstvo, da je material v principu nehomogen, sestava slojevita in da je potrebno upoštevati tudi nelinearno odvisnost deformacije in napetosti. Poleg tega so tudi pomiki pri kon-

strukcijah iz poliestrskih laminatov navadno bistveno večji, kar je tudi vzrok za drugačne predpostavke oziroma robne pogoje pri izračunu konstrukcije.

- 3) Temperaturni razteznostni koeficient poliestrskega laminata je bistveno višji kot pri jeklu (reda velikosti 10 - krat) in je to dejstvo potrebno pri obravnavanju konstrukcije tudi upoštevati.
- 4) Ker je možnih laminatov za doseganje enake nosilnosti veliko, je potrebno izdelati tudi cenovno analizo in na ta način izbrati najugodnejšo varianto.

Prednosti poliestrskega laminata kot konstrukcijskega materiala lahko izkoristimo le, če natančno poznamo njegove lastnosti in če razpolagamo z zanesljivim načinom izračuna posameznega tipa konstrukcije.

Za optimalno konstruiranje, kjer so upoštevane vse specifične lastnosti poliestrskih laminatov, je potrebno razpolagati z zanesljivim in verificiranim računskim modelom in dovolj veliko podatkovnico lastnosti materiala.

Iz opisanega je razvidno, da je za uspešno oziroma kvalitetno konstruiranje potrebno tesno sodelovanje vsaj dveh oziroma treh ločenih strokovnih področij, in sicer matematično modeliranje in presoja nosilnosti, lastnosti materiala in sestava laminata ter tehnologija izdelave.

¹ Matjaž MAKAROVIC, dipl.inž.kem.tehn.
Zavod za gradbeništvo
1000 Ljubljana, Dimičeva 12

2 Matematično modeliranje

Učinkovit matematični model temelji na eni od numeričnih metod. Največ se uporablja metoda končnih elementov, vendar so v uporabi tudi druge metode. Ker so izdelki iz poliestrskih laminatov v glavnem tanki, je nujno potrebno, da je model razvit na *podlagi teorije velikih pomikov in velikih deformacij* (tem primeru se v tehnični mehaniki uporablja pojem, da model upošteva "geometrijsko nelinearnost"). Model mora imeti tudi možnost upoštevanja nelinearnega mehanskega vedenja materiala, kar pomeni, da se odnos napetosti in deformacije ($\delta - \epsilon$ diagram), ki ni nujno linearen niti elastičen, lahko poda kot vhodni podatek za vsak material posebej.

Laminati so značilen večplastni material. Zaradi tega je nujno potrebno, da ima model *možnost prikazovanja vsake posamezne plasti*, da se lahko v analizi upošteva natančne debeline in pripadajoče lastnosti materiala. Poleg tega mora obstajati možnost *anizotropnega opisa posameznih plasti* zaradi ustreznega prikazovanja orientiranih armatur ("rowing", tkanina).

Zaradi natančnega opisa geometrije mora imeti model možnost ustreznega prikazovanja *lokalnih - posameznih ojačitev*, kot so npr. rebra ali dodatne plasti.

Ker mora model upoštevati možne velike pomike, mora biti narejen tako, da upošteva takoimenovano "*ne-konzervativno obtežbo*", to pomeni, da v analizi obtežba (kot so npr. pritiski, notranji ali zunanji) "spremlja" pomike konstrukcije.

3 Lastnosti osnovnih laminatov in debeline posameznih plasti

Z razvojem računskega modela, ki upošteva večplastno vgrajevanje usmerjenih ali neusmerjenih armatur oziroma lokalnih ojačitev konstrukcije, je potrebna podatkovnica možnih materialov bistveno zmanjšana saj ni več potrebe po podatkih o lastnosti sestavljenih laminatov.

Še vedno pa je paleta možnih materialov (laminatov za posamezne plasti) izredno velika, če upoštevamo, da je na razpolago veliko smol z različnimi lastnostmi in veliko različnih armatur ter predvsem, da lahko projektiramo laminat s tako rekoč poljubnim razmerjem smola - armatura.

Dodatni problem je sama izdelava laminata, saj v praksi le redko dosežemo projektirano sestavo laminata (razmerje med smolo in armaturo).

Pri dimenzioniranju konstrukcije moramo natančno poznati in upoštevati ne le zahtev glede mehanskih lastnosti, ampak tudi predvidene pogoje obratovanja, to je prisotnost agresivnih medijev, povišanih ali znižanih temperatur.

Le z upoštevanjem vseh parametrov konstrukcije in okolja lahko izberemo ustrezno vrsto poliestrske smole in armature.

Mehanske lastnosti in debelina laminata so določeni z lastnostmi surovin (poliestrske smole in armature),

vsebnostjo armature ter količine zračnih vključkov v laminatu.

3.1 Lastnosti utrjene poliestrske smole, ki vplivajo na lastnosti laminata

3.1.1 Najpomembnejši lastnosti sta natezni in tlačni elastični modul, ki definirata lastnosti laminata v območju dopustnih obremenitev.

3.1.2 Za določanje uporabnega področja (dopustnih obremenitev) je potrebno poznati celotno napetostno krivuljo ($\delta - \epsilon$ diagram).

3.1.3 Gostota utrjene smole vpliva na debelino laminata.

3.1.4 Spremembe lastnosti pri povišani temperaturi vplivajo na temperaturno uporabno področje laminata.

3.1.5 Temperaturni razteznostni koeficient smole vpliva na dimenzijsko stabilnost laminata.

3.2 Lastnosti steklene armature, ki vplivajo na lastnosti laminata

3.2.1 Lastnosti neorientiranih steklenih vlaken (matta)

3.2.1.1 Površinska masa vpliva na debelino plasti

3.2.1.2 Enakomernost orientacije posameznih vlaken v vseh smereh določa enakomernost lastnosti laminata v vseh smereh.

3.2.1.3 Kvaliteta in količina apreture vplivata na mehanske lastnosti in debelino laminata.

3.2.1.4 Vsebnost vlage vpliva na mehanske lastnosti laminata

3.2.2. Lastnosti orientiranih steklenih vlaken

3.2.2.1 Masa šopa vlaken (rowing) na tekoči km (tex.) in število šopov na enoto širine vpliva na debelino plasti.

3.2.2.2 Kvaliteta in količina apreture vplivata na mehanske lastnosti in debelino laminata.

3.2.2.3 Vsebnost vlage vpliva na mehanske lastnosti laminata.

Iz navedenega sledi, da je možno tudi pri laminatih iz ene vrste smole in ene vrste armature na račun različnih vsebnosti armature in zračnih vključkov izdelati laminat z različnimi lastnostmi in različnih debelin.

Ker bi bila zbirka podatkov o lastnostih možnih materialov, dobljena na osnovi meritev, bistveno preobsežna in tudi tehnično težko izvedljiva, smo poskušali izdelati računsko metodo za izračun lastnosti laminatov na osnovi znanih lastnosti poliestrske smole in natančno izmerjenih lastnosti enega laminata z znano vsebnostjo armature.

V izračunu smo upoštevali:

- a) Izmerjene lastnosti utrjenih poliestrskih smol: diagram nateznih karakteristik, gostoto. Diagram nateznih karakteristik smo zaradi lažjega izračuna in potrebe po upoštevanju celotnega diagrama pri izračunu konstrukcije skrčili na minimalno število točk, ki pa še zadovoljivo opisujejo izmerjeno krivuljo.
- b) Lastnosti steklene "matte": površinska masa, vsebnost apreture

- c) Lastnosti referenčnega laminata: diagram nateznih karakteristik, vsebnost in lastnosti steklene armature, iz katere je bil konkreten laminat izdelan
- d) Predpostavljeno količino vgrajenih zračnih vključkov v laminatu

Za kontrolo izračuna smo izvršili serijo meritev laboratorijsko izdelanih laminatov s tremi različnimi vrstami poliestrskih smol in z različnimi vsebnostmi in vrstami steklenih armatur ("matta", "rowing", tkanina) z različnimi površinskimi masami oziroma masami na tekoči km.

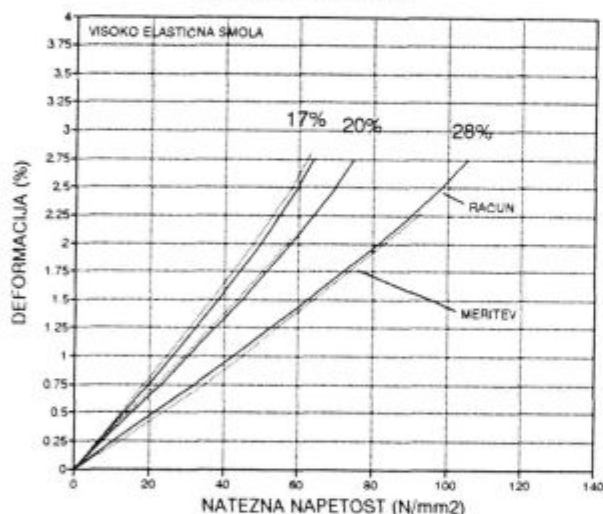
Poliestrške smole smo izbrali tako, da so bile zastopane smole z nizkim, srednjim in visokim nateznim elastičnim modulom.

Lastnosti laboratorijsko izdelanih laminatov so bile izmerjene za vsak preskušane posebej. Prav tako smo v računu upoštevali podatke o armaturi in vsebnosti armature, ki smo jih izmerili na vsakem preskušancu posebej po izvršenem nateznem preskusu. Rezultati nekaterih karakterističnih primerjav med izmerjenimi in izračuna-

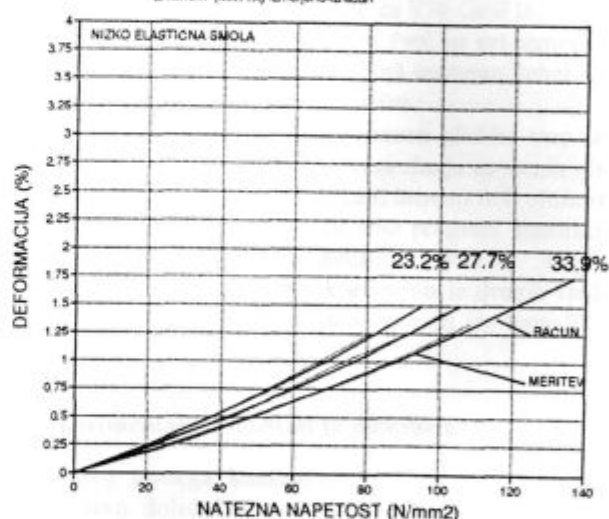
nimi vrednostmi nateznih karakteristik laminatov z različnimi armaturami, različnimi smolami in različnim razmerjem smola - armatura so podani v obliki $\delta - \epsilon$ diagramov (slika 1 - 4).

Iz primerjave izmerjenih in izračunanih vrednosti je razvidno, da se izračunan potek krivulje natezna napetost - deformacija pri vseh testiranih primerih praktično popolnoma ujema z izmerjeno krivuljo pri določeni vsebnosti steklene armature. Nekoliko problematična je porušna trdnost laminata, kjer so odstopanja nekoliko večja. Če pa si malo bolj pozorno ogledamo izmerjene vrednosti pri različnih vsebnostih armature, opazimo, da so porušne trdnosti pri nekaterih preskušancih z višjo vsebnostjo armature nižje od porušnih trdnosti preskušancev z nižjo vsebnostjo armature. Tak odnos ni logičen in kaže na to, da imajo posamezni preizkušanci lokalne poškodbe ali deformacije, ki so vzrok, da je prišlo do predčasne porušitve. Torej so bolj verjetni računsko dobljeni podatki. Ne smemo pa zanemariti tudi dejstva, da so odstopanja pri meritvah lastnosti lamina-

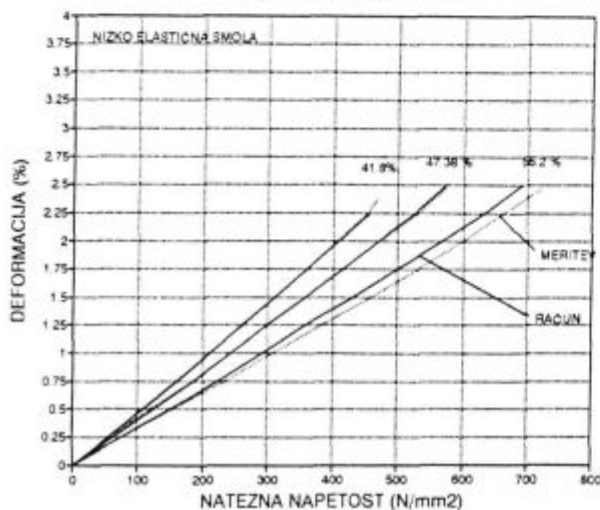
NATEZNE KARAKTERISTIKE
LAMINAT (MATT) izmerjeno-izračun



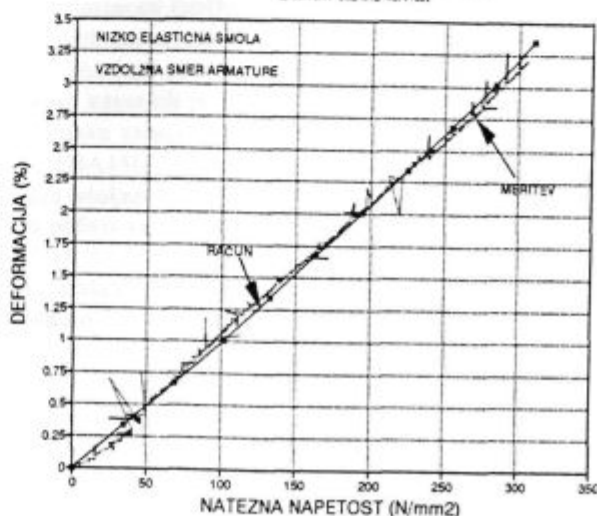
NATEZNE KARAKTERISTIKE
LAMINAT (MATT) izmerjeno-izračun



NATEZNE KARAKTERISTIKE
LAMINAT (ROWING) izmerjeno-izračun



NATEZNE KARAKTERISTIKE
LAMINAT - tkanina 45.4%
NIZKO ELASTIČNA SMOLA
VZDOLŽNA SMER ARMATURE



tov po statističnem načinu, to je na večjem številu preizkušancev, navadno reda velikosti $\pm 10 - 20\%$.

Rezultati preskusov in analiz so pokazali, da je možno z računsko metodo dovolj natančno predvideti mehanske lastnosti in debeline laminatov s poljubnim deležem armature iz steklene "matte", "rowinga" oziroma tkanine ob upoštevanju lastnosti poliestrske smole in lastnosti referenčnega laminata. Z laboratorijsko izmerjenimi lastnostmi vzorcev in omenjene računske metode je možna tudi analiza že izdelanega sestavljenega

laminata, to je določitev mehanskih lastnosti posameznih plasti na osnovi izmerjenih debelin plasti, gostote sestavljenega laminata in znanih karakteristik vhodnih komponent.

V računsko analizo posameznih plasti oziroma sestavljenega laminata je poleg mehanskih lastnosti vključena tudi analiza stroškov materiala in dela ter za izdelavo predvidenega laminata potrebne količine smole in armatur ob upoštevanju predvidenih odpadkov.