

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Lucija Lončar

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Tatjana Haramina, dipl. ing.

Student:

Lucija Lončar

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Tatjani Haramini na ukazanom povjerenju i korisnim savjetima. Velike zahvale majci Asifi, ocu Antunu, divnoj prijateljici Mariji te dečku Ivanu, kao i svim drugim meni dragim ljudima na bezuvjetnoj podršci kroz život i školovanje. Hvala i sestri Sari i psu Mikiju, koji su provodili sate slušajući moja objašnjenja gradiva najtežih kolegija.

Lucija Lončar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Lucija Lončar**

JMBAG: **0035220961**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje mehaničkih svojstava sendvič konstrukcija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Testing of mechanical properties of sandwich structures**

Opis zadatka:

Sendvič konstrukcije strukturni su kompoziti koji se sastoje od čvrstih vanjskih slojeva između kojih se nalazi mekana jezgra vrlo niske gustoće. Zbog njihove složene građe, eksperimentalna ispitivanja složenija su nego kod uobičajenih laminata.

Potrebno je napraviti pregled normi kojima se ispituju mehanička svojstva sendviča, s posebnim naglaskom na normu ASTM C393/C393M za određivanje smičnih svojstava jezgre sendvič konstrukcija savijanjem. Na temelju uvjeta iz navedene norme potrebno je napraviti računalni alat za određivanje raspona prihvatljivih dimenzija ispitnih tijela na temelju debljine sendviča, debljine vanjskih slojeva i debljine jezgre.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Tatjana Haramina

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS OZNAKA	III
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. STRUKTURNI KOMPOZITI	2
2.1. Slojeviti kompozitni materijali (laminati).....	2
2.2. Sendvič konstrukcije	5
3. OSNOVNI SLUČAJEVI OPTEREĆENJA I MEHANIZMI POPUŠTANJA SENDVIČ GREDE	9
3.1. Savojna krutost sendvič grede.....	9
3.2. Naprezanja u vanjskim slojevima i jezgri	12
3.3. Mehanizmi popuštanja sendvič grede	16
4. PREGLED NORMI ZA ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJTAVA SENDVIČ KOMPOZITA.....	21
4.1. Norma ASTM D7249/D2749M	21
4.2. Norma ASTM D7250/7250M [11]	23
4.3. Norma ASTM C393/C393M.....	23
4.3.1. Materijali i priprema za ispitivanje	24
4.3.2. Pribor i konfiguracije [12].....	25
4.3.3. Ispitna tijela [12]	27
4.3.4. Izračuni mehaničkih svojstava [12]	29
5. IZRADA RAČUNALNOG ALATA.....	33
5.1. Programski jezik Visual Basic	33
5.2. Izrada sučelja programa	34
5.3. Pisanje koda	36
6. Zaključak	38

POPIS SLIKA

Slika 2.1.	Osnovna podjela kompozita: (a) kompoziti ojačani česticama; (b) kompoziti ojačani vlaknima; (c) strukturni kompoziti [1].....	2
Slika 2.2.	Slaganje slojeva laminata za postizanje visoke čvrstoće u više smjerova [1].....	3
Slika 2.3.	Prikaz slojeva i spojene šperploče [3]	4
Slika 2.4.	Sendvič kompozit s jezgrom od valovitog kartona [4].....	5
Slika 2.5.	Sendvič kompozit s jezgrom u obliku pčelinjeg saća [2]	5
Slika 2.6.	Podjela jezgri sendvič kompozita [4]	7
Slika 2.7.	Profiliranje limova za izradu saćastih jezgri [5].....	7
Slika 2.8.	Linija za izradu sendvič kompozita s pjenastom jezgrom [6]	8
Slika 3.1.	Ravni i zakrivljeni elementi sendvič konstrukcije [4].....	9
Slika 3.2.	Simetrični poprečni presjek sendvič grede [4]	10
Slika 3.3.	Savojna krutost i gustoća sendviča u odnosu na omjer debljina jezgre i vanjskih slojeva [4]	11
Slika 3.4.	Element sendvič kompozita oslobođen veza [4]	13
Slika 3.5.	Element sendvič grede s promjenjivim momentom po presjeku [4].....	13
Slika 3.6.	Element sendviča razmatran u proračunu smičnog naprezanja jezgre [4]	15
Slika 3.7.	Raspodjela naprezanja u sendviču za različite aproksimacije [5]	15
Slika 3.8.	Boranje vanjskih slojeva u tlačno opterećenom elementu sendviča [4].....	16
Slika 3.9.	Lokalno boranje vanjskih slojeva kod sendviča s ćelijastom jezgrom [4]	17
Slika 3.10.	Sendvič kompozit s mrežastom jezgrom tlačno opterećen okomito na valove [4]	17
Slika 3.11.	Lokalno boranje vanjskih slojeva sendvič kompozita s mrežastom jezgrom, opterećenog paralelno s valovima [4].....	18
Slika 3.12.	Lokalno oštećenje uslijed koncentriranog opterećenja [4]	19
Slika 3.13.	Mapa za određivanje mehanizma popuštanja sendvič panela [8]	19
Slika 3.14.	Mogući mehanizmi popuštanja sendvič kompozita: (a) popuštanje vanjskih slojeva; (b) smični lom jezgre; (c) i (d) boranje vanjskih slojeva; (e) opće izvijanja; (f) izvijanje uslijed smicanja; (g) boranje jezgre; (h) popuštanje uslijed koncentriranih naprezanja [5].....	20
Slika 4.1.	Konfiguracije opterećenja [12].....	26
Slika 4.2.	Dimenzije standardnog ispitnog tijela	27
Slika 4.3.	Dimenzije nestandardnog ispitnog tijela	28
Slika 4.4.	Dimenzije debljina dijelova sendvič panela [12]	30
Slika 4.5.	Dijagram ovisnosti smičnog naprezanja o kutnoj deformaciji [4]	31
Slika 5.1.	Izgled sučelja računalnog alata.....	34
Slika 5.2.	Primjer unosa podataka	35
Slika 5.3.	Izbacivanje željenih vrijednosti	35

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$E_x I$	Nmm^2	Savojna krutost sendvič grede
E_x^c	N/mm^2	Modul elastičnosti jezgre u smjeru osi x
I_c	mm^4	Moment inercije jezgre oko neutralne osi y
E_x^f	N/mm^2	Modul elastičnosti vanjskih slojeva u smjeru osi x
I_f	mm^4	Moment inercije vanjskih slojeva oko neutralne osi y
B	mm	Širina sendvič grede
c	mm	Debljina jezgre
t	mm	Debljina vanjskih slojeva
d_T	mm	Udaljenost težišta vanjskih slojeva
D_x	Nmm	Savojna krutost po širini grede
m	kg	Masa sendvič grede
L_b	mm	Duljina sendvič grede
ρ_c	kg/m^3	Gustoća jezgre
ρ_f	kg/m^3	Gustoća vanjskih slojeva
ρ^*	kg/m^3	Prosječna gustoća sendviča
d	mm	Debljina sendviča
σ_s^f	N/mm^2	Prosječno savojno naprezanje u vanjskim slojevima
M	Nmm	Moment savijanja
V	N	Smična sila poprečno na os grede
dM	Nmm	Infinitezimalni prirast momenta
dx	mm	Infinitezimalna duljina
τ_{xz}	N/mm^2	Smično naprezanje koje djeluje na jezgru
F_1	N	Horizontalna sila koja djeluje na lijevu stranu elementa
F_2	N	Horizontalna sila koja djeluje na desnu stranu elementa
F_3	N	Horizontalna sila uslijed smičnog naprezanja
S_c	N/mm	Smična krutost jezgre
G_c	N/mm^2	Modul smičnosti jezgre
σ_m^f	N/mm^2	Rastezna čvrstoća vanjskih slojeva
F_{max}	N	Maksimalna sila prije pucanja

S	mm	Udaljenost simetrala potpornih oslonaca
L	mm	Udaljenost mjesta opterećivanja grede
b	mm	Širina ispitnog tijela
t	mm	Debljina gornjeg ili donjeg vanjskog sloja
τ_m	N/mm ²	Procijenjena smična čvrstoća jezgre
σ_c	N/mm ²	Dozvoljena tlačna čvrstoća jezgre
τ_m^c	N/mm ²	Smična čvrstoća jezgre
τ_e^c	N/mm ²	Granica tečenja pri smicanju
F_e	N	Smična sila pri deformaciji od 2 %.
σ^f	N/mm ²	Naprezanje u vanjskim slojevima pri maksimalnoj sili

SAŽETAK

Strukturni kompoziti zajednički su naziv za slojevite kompozitne materijale i sendvič konstrukcije. Glavni konstituenti sendvič kompozita su čvrsti vanjski slojevi i mekana jezgra niske gustoće. U ovom radu prikazana je podjela strukturnih kompozita, mehanička svojstva konstituenata sendviča (pomoću jednostavnih izraza iz mehanike) te najčešći mehanizmi popuštanja sendvič konstrukcija. Zbog složene građe ovih materijala, eksperimentalna ispitivanja složenija su nego kod uobičajenih laminata, stoga je dan i pregled normi za ispitivanje mehaničkih svojstava sendviča, od kojih je posebno izdvojena norma ASTM C393/C393M Određivanje smičnih svojstava jezgre sendvič konstrukcije savojnim ispitivanjem (e. *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*), prema kojoj je napravljena aplikacija, koja olakšava njeno korištenje.

Ključne riječi: sendvič konstrukcije, sendvič kompoziti, jezgra, vanjski slojevi, mehanička svojstva, norma

SUMMARY

Structural composites are a common name for laminates and sandwich panels. The main constituents of sandwich panels are strong facings and a low-density soft core. In this work, a classification of structural composites, mechanical properties of sandwich constituents (by using simple mechanical expressions), and most frequent failure modes of sandwich constructions are presented. Due to the complex structure of those materials, their experimental test methods are more complex than those done on ordinary laminates. Herewith an overview of standard test methods for testing mechanical properties of sandwiches is given, with a special emphasis on test method ASTM C393/C393 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, based on which an app was created to make it easier to use.

Keywords: sandwich constructions, sandwich panels, core, facings, mechanical properties, standard test methods

1. UVOD

Kompoziti su materijali nastali umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala, s jasnom granicom između njih, a koji imaju različita svojstva, s ciljem dobivanja novog materijala sa svojstvima kakva ni jedna od komponenti ne posjeduje zasebno. Time se omogućuje postizanje posebnih kombinacija svojstva, poput visoke čvrstoće, male mase, visoke krutosti i kemijske postojanosti. [1]

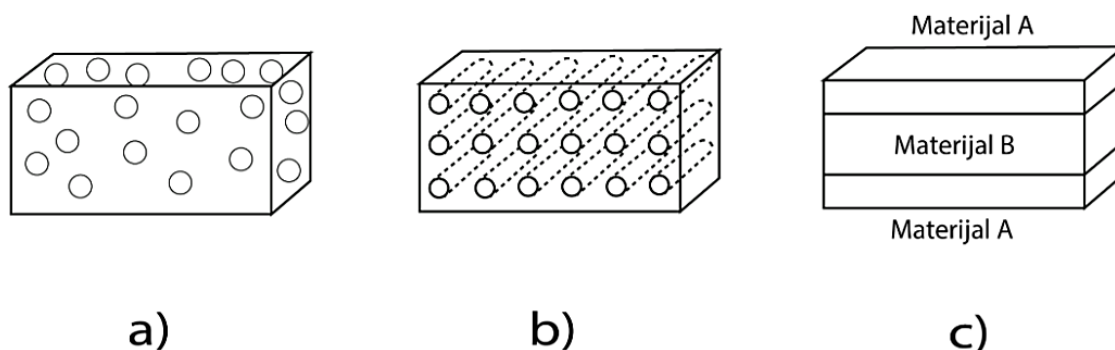
Kompozitni materijali sastoje se od dva osnovna konstituenta, a to su matrica i ojačalo. S obzirom na vrstu ojačala razlikuju se kompoziti ojačani vlaknima, kompoziti ojačani česticama te strukturni kompoziti, dok se s obzirom na materijal matrice dijele na keramičke, polimerne i metalne. Ojačala trebaju biti nosivi elementi kompozita, odnosno osigurati visoku čvrstoću, krutost te otpornost na trošenje kompozita, a zadaća matrice je da drži vlakna na okupu te ih štiti od vanjskih utjecaja, daje vanjsku formu kompozitu i prenosi opterećenje na ojačala. [2]

Posebna vrsta kompozita, kojoj je posvećeno više vremena u ovom radu, su strukturni kompoziti, točnije sendvič konstrukcije. Strukturni kompoziti zajednički su naziv za slojevite kompozitne materijale i sendvič konstrukcije, a sastavljeni su od kompozitnog i homogenog materijala čija svojstva ne ovise samo o svojstvima konstituenata, nego i o geometrijskom rasporedu elemenata konstrukcije. [1]

U ovom radu predstavljene su podjele strukturnih kompozita, kao i materijali koji se koriste za izradu istih. Uz to je dan pregled mehaničkih svojstava te najčešći načini lomova sendvič kompozita. Na kraju je prikazan pregled normi za ispitivanje mehaničkih svojstava sendviča te aplikacija napravljena u sklopu projekta, koja omogućava lakše korištenje norme ASTM C393/C393M, koja opisuje provedbu ispitivanja za dobivanje smičnih svojstava jezgre sendvič konstrukcija primjenom grede.

2. STRUKTURNI KOMPOZITI

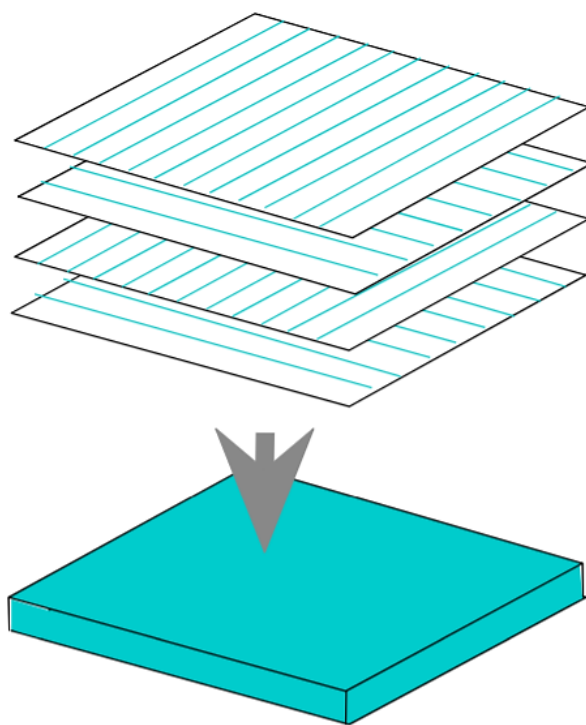
Kao što je rečeno u uvodu, strukturni kompoziti skupni su naziv za slojevite kompozitne materijale (laminat) te sendvič konstrukcije. U sljedećim poglavljima opisana su svojstva, način izrade i primjena svake od te dvije skupine. Na slici niže prikazana je osnovna podjela kompozita.



Slika 2.1. Osnovna podjela kompozita: (a) kompoziti ojačani česticama; (b) kompoziti ojačani vlaknima; (c) strukturni kompoziti [1]

2.1. Slojeviti kompozitni materijali (laminati)

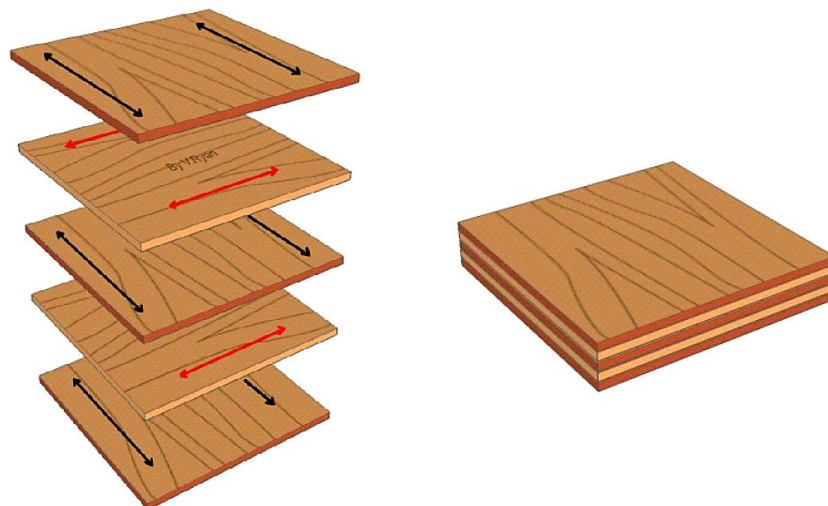
Laminati su kompoziti sastavljeni od dvodimenzionalnih slojeva ili ploča s preferiranim smjerom visoke čvrstoće, kao što je slučaj kod drva ili polimera ojačanih usmjerenim vlaknima. Svojstva laminata ovise o rasporedu slojeva, odnosno o orijentaciji vlakana u pojedinim slojevima. [1] Pa tako, žele li se postići poboljšana svojstva u više smjerova potrebno je laminatnu konstrukciju složiti kao što je prikazano na slici 2.2. Broj slojeva varira ovisno o željenim svojstvima, a minimalno su potrebna dva sloja.



Slika 2.2. Slaganje slojeva laminata za postizanje visoke čvrstoće u više smjerova [1]

Većina slojevitih kompozita izrađuje se radi postizanja: kemijske postojanosti (uz nižu cijenu), manje mase ili više čvrstoće, ali i poboljšanja estetike proizvoda, povećanja otpornosti na trošenje te postizanja neobičnih karakteristika promjene volumena pod utjecajem topline. Svojstva laminata poprilično su anizotropna, no neka svojstva u ravnini sloja mogu se predvidjeti preko zakona miješanja. Neka od tih svojstava su električna i toplinska vodljivost te modul elastičnosti. Druga izuzetno važna svojstva, poput otpornosti na trošenje i korozijske postojanosti, ovise prvenstveno o jednoj komponenti kompozita te se ne mogu predvidjeti zakonom miješanja. [1]

Neki primjeri laminata su: materijali s tankim te debljim zaštitnim slojevima, materijali s galvanskim prevlakama, laminati u užem smislu riječi, bimetalni te šperploča. Šperploče su slojeviti kompoziti koji se sastoje od furnira složenih u različitim smjerovima, kao što je prikazano na slici 2.3. Time se postiže relativno visoka čvrstoća u raznim smjerovima, ali se žrtvuje ona u danom smjeru. Ta čvrstoća je niža u odnosu na čvrstoću kod jednako orijentiranih vlakana.



Slika 2.3. Prikaz slojeva i spojene šperploče [3]

Laminati se proizvode na razne načine, a najčešći su: valjanje, spajanje eksplozijom, koekstruzija, prešanje i lemljenje. [1]

Većina metalnih laminata, poput bimetala, proizvodi se spajanjem dvaju metala toplim ili hladnim valjanjem. Ako je deformacija dovoljno velika, dolazi do drobljenja oksida na površini čime se omogućuje međuatomni kontakt, koji dovodi do zavarivanja dvaju površina. [1]

Za spajanje velikih ploča, koje ne stanu u stroj za valjanje, primjenjuje se spajanje eksplozijom. Spajanje metala ovdje je posljedica visokih tlakova uslijed eksplozivnog punjenja. Na ovaj način povezuju se čelične i aluminijske ploče. [1]

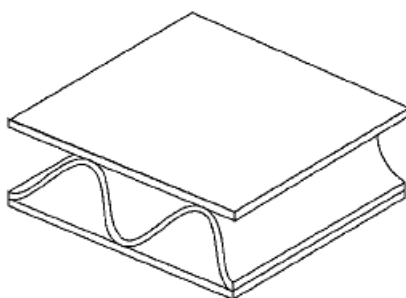
Neki jednostavniji laminati, poput koaksijalnih kabela, proizvode se koekstrudiranjem tako da mekši materijal obavija metal. Moguća je i obrnuta situacija gdje se plastomeri obavijaju metalnim vodičem. [1]

Prešanjem pri povišenoj temperaturi često se provodi očvršćivanje ljepila kod laminata. Osim toga, prešanje se može koristiti kod malih komponenti, gdje pri visokoj temperaturi i tlaku dolazi do zavarivanja. [1]

Ploče laminata također se mogu spajati lemljenjem. Metalne ploče se razmaknu na malu udaljenost, dovoljno da se ostvari kapilarni efekt, tako da se rastaljeni lem uslijed tog efekta uvuče u raspor između ploča. [1]

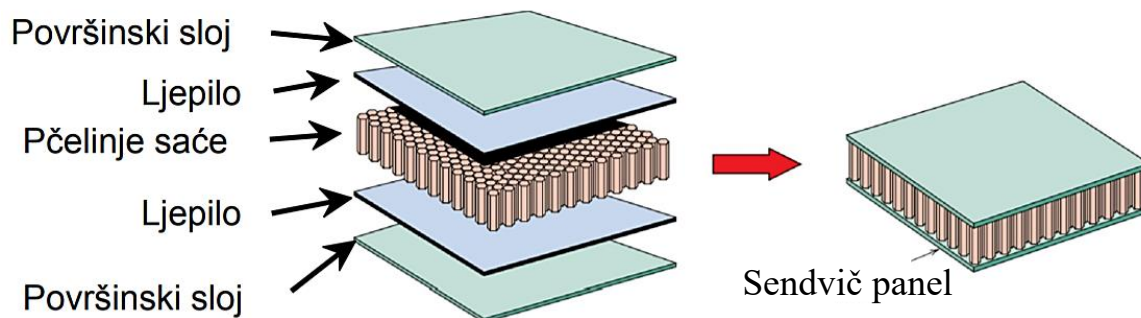
2.2. Sendvič konstrukcije

Sendvič kompoziti su materijali koji se sastoje od tankih vanjskih slojeva između kojih se nalazi lagana jezgra za popunjavanje. Svoju primjenu nalaze u dijelovima zrakoplova, brodova, teretnih vozila te krovovima, zidovima i podovima zgrada... Posebnost ovih konstrukcija je visoka čvrstoća i krutost, unatoč činjenici da niti jezgra niti vanjski slojevi ne moraju posjedovati ta svojstva. Ova posebnost se vidi na primjeru slojeva debelog papira koji su odvojeni jezgrom od valovitog kartona (slika 2.4.) – niti jezgra niti vanjski slojevi nisu ni kruti ni čvrsti, ali njihova kombinacija jest. [1]



Slika 2.4. Sendvič kompozit s jezgrom od valovitog kartona [4]

Još jedan popularan primjer su sendvič konstrukcije s jezgrom u obliku pčelinjeg saća. Za izradu ovakve jezgre koriste se tanki limovi od aluminija koji se oblikuju u šesterokute s osi okomitom na ravninu površinskih slojeva, kao što je prikazano na slici 2.5. [1]



Slika 2.5. Sendvič kompozit s jezgrom u obliku pčelinjeg saća [2]

Površinski slojevi moraju imati visoku krutost te rasteznu i tlačnu čvrstoću, kako bi se opirali savijanju i boranju, odnosno kako bi nosili poprečna naprezanja uslijed savijanja i opterećenja u smjeru ravnine. Također, moraju biti napravljeni od materijala s visokim modulom elastičnosti, kao što su laminati ili lagane legure. [4] Za izradu površinskih slojeva najčešće se koriste: aluminij, čelik, titanij, šperploče i vlaknima ojačani polimerni kompoziti. [1]

Jezgra ima dvije uloge – razdvaja vanjske slojeve te se suprotstavlja deformiranju okomitom na ravninu sendviča te u određenoj mjeri osigurava krutost u ravninama okomitim na površinske slojeve. [1]

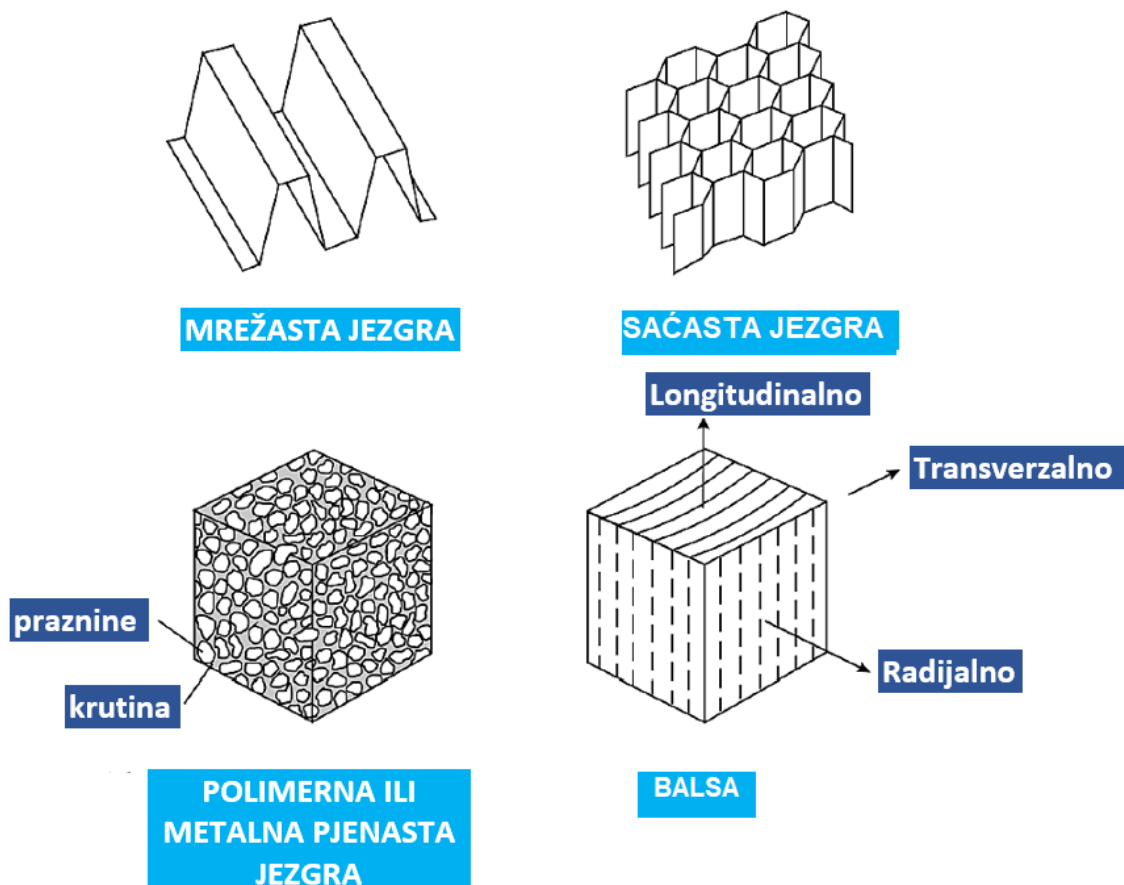
Od jezgre se također očekuje mala gustoća, kako bi se smanjila ukupna masa konstrukcije, no takav zahtjev pomalo je kontradiktoran s obzirom na to da čvrstoća i krutost rastu s porastom gustoće. [4]

Materijali jezgre mogu se podijeliti u dvije kategorije – ćelijaste i strukturne. Ova podjela prikazana je na slici 2.6. Ćelijaste jezgre sastoje se od praznog prostora okruženog zidovima na ponavljajući način, tako da se popuni prostor. Za izradu ćelijastih jezgri koriste se polimerne ili metalne pjene, balsa i saćaste jezgre. [4] Postupak profiliranja, kojim se izrađuju saćaste jezgre, prikazan je na slici 2.7. Predstavnik strukturnih jezgri jesu mrežaste jezgre, koje se sastoje od kontinuirane mreže napravljene od čvrstih materijala, oblikovane tako da razdvaja vanjske slojeve i učinkovito prenosi smična opterećenja. [4]

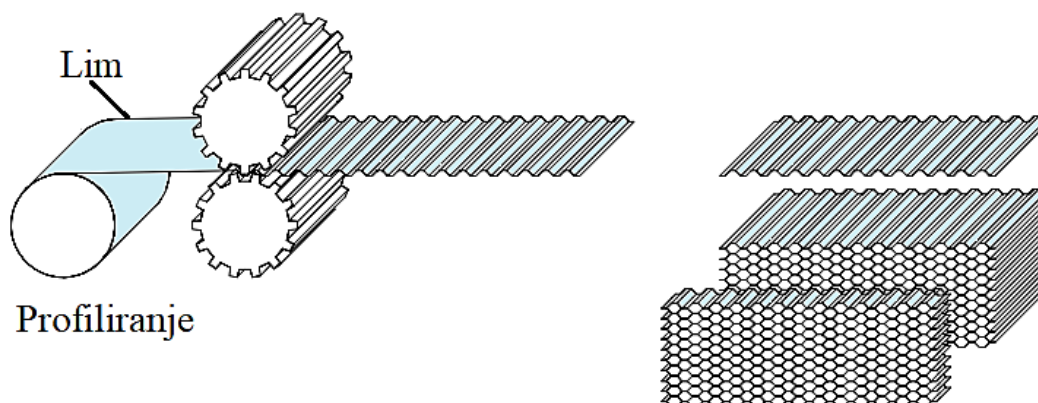
Nije uvijek moguće, a ni od osobitog značaja, ispitivati samu jezgru jer vanjski slojevi služe za njenu stabilizaciju. Također, krutost mrežaste jezgre uvelike ovisi o geometriji i materijalu mreže, što otežava određivanje njenih mehaničkih svojstava. [4]

Najčešći materijali za izradu ćelijastih jezgri su Nomex, polimerne smole i aluminijske legure. Prilikom izrade ovog tipa jezgri koriste se dvostruki zidovi u jednom smjeru te jednostruki u drugom. Ovime se postižu drugačija mehanička svojstva u smjeru duljine u odnosu na smjer širine. [4]

Pjene su također popularan materijal jezgri sendvič kompozita, a mogu biti polimerne, metalne ili ugljične. Najučestalije polimerne pjene su PU, PVC i PMI. Ovakve pjene imaju zatvorenu ćelijastu strukturu, što ih čini izotropnima i otpornima na prodor vode. [4] Na slici 2.8. prikazana je linija za proizvodnju sendvič kompozita s pjenastom jezgrom.



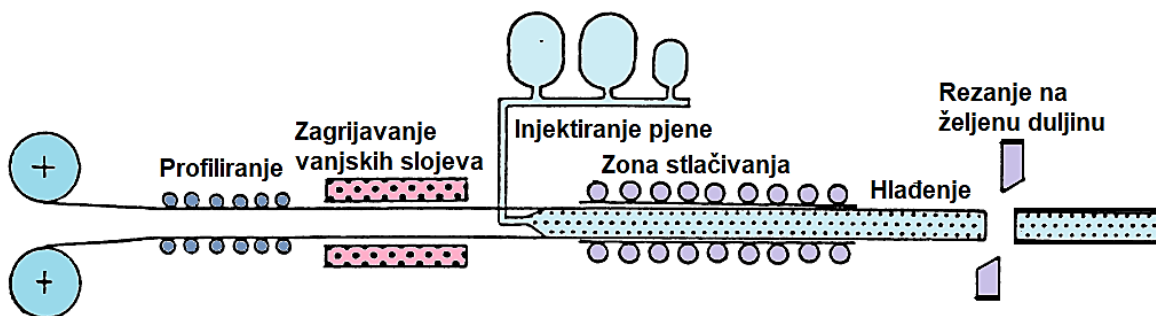
Slika 2.6. Podjela jezgri sendvič kompozita [4]



Slika 2.7. Profiliranje limova za izradu sačastih jezgri [5]

Zbog male gustoće u kombinaciji s povoljnim mehaničkim svojstvima te zatvorene ćelijaste strukture, balsa je pogodan materijal za izradu jezgri sendvič kompozita. Kao rezultat jednoosnog usmjerenja vlakana duž longitudinalnog smjera drva, balsa je jako anizotropna s puno većom krutošću i čvrstoćom u longitudinalnom, nego u transversalnom i radijalnom smjeru (slika 2.6.) [4]

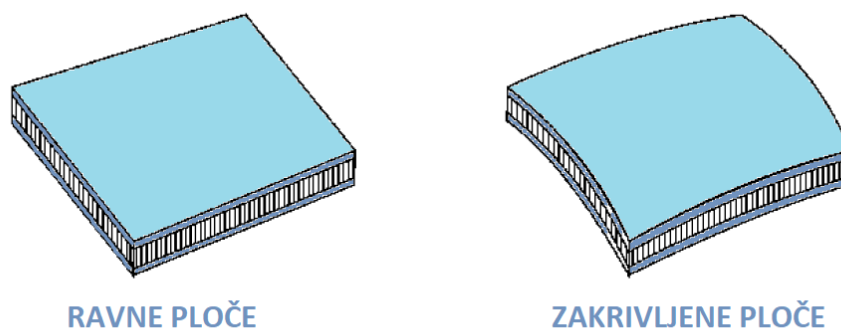
Kako su materijali jezgre lagani, a čvrstoća i krutost rastu s porastom gustoće, jezgra je uglavnom slabi konstituent sendvič konstrukcija. No, u nekim slučajevima veza između jezgre i vanjskih slojeva može biti najslabija karika ovih kompozita. [4]



Slika 2.8. Linija za izradu sendvič kompozita s pjenastom jezgrom [6]

3. OSNOVNI SLUČAJEVI OPTEREĆENJA I MEHANIZMI POPUŠTANJA SENDVIČ GREDE¹

Sendvič konstrukcije mogu se, skoro bez iznimki, izrađivati od ravnih ili zakrivljenih ploča (slika 3.1.), ali se za potrebe određivanja mehaničkih svojstava promatra znatno jednostavnija sendvič konstrukcija – greda. [4]



Slika 3.1. Ravni i zakrivljeni elementi sendvič konstrukcije [4]

3.1. Savojna krutost sendvič grede

Ukupna savojna krutost sendvič grede $E_x I$ dobivena je pomoću teorema aksijalnih osi, gdje je izražena preko modula elastičnosti i debljine konstituenata. Za simetrične poprečne presjeke, kakav je prikazan na slici 3.2., vrijedi:

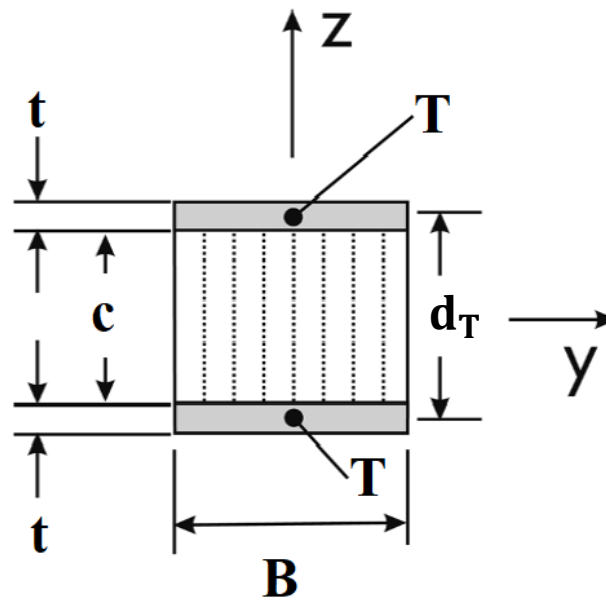
$$E_x I = E_x^c I_c + 2E_x^f I_f, \quad (3.1)$$

gdje su I_c i I_f momenti inercije jezgre i vanjskih slojeva oko neutralne osi y . [4]

$$I_c = \frac{Bc^3}{12} \quad (3.2)$$

$$I_f = \frac{Bt^3}{12} + \frac{Btd_T^2}{4} \quad (3.3)$$

¹ Napomena: Oznake korištene u ovom radu mogu se razlikovati od onih u izvornoj literaturi. Razlog tomu je ujednačavanje oznaka u svim poglavljima i prilagodba na hrvatsku literaturu.



Slika 3.2. Simetrični poprečni presjek sendvič grede [4]

Uvrštavanjem izraza (3.2) i (3.3) u izraz (3.1) te dijeljenjem sa širinom grede dobiva se izraz za savojnu krutost po širini grede $E_x I/B$, poznatu još kao savojna krutost D_x . [4]

$$D_x = E_x^f t d_T^2 \left[\frac{c^3}{12 t d_T^2} \left(\frac{E_x^c}{E_x^f} \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{t}{d_T} \right)^2 + \frac{1}{2} \right] \quad (3.4)$$

Kako se od sendvič konstrukcija zahtjeva da budu lagane, prilikom određivanja krutosti valja u obzir uzeti gustoću. Masa sendvič grede m , podijeljena s njenom duljinom i širinom dana je izrazom:

$$\frac{m}{L_b B} = 2t\rho_f + c\rho_c, \quad (3.5)$$

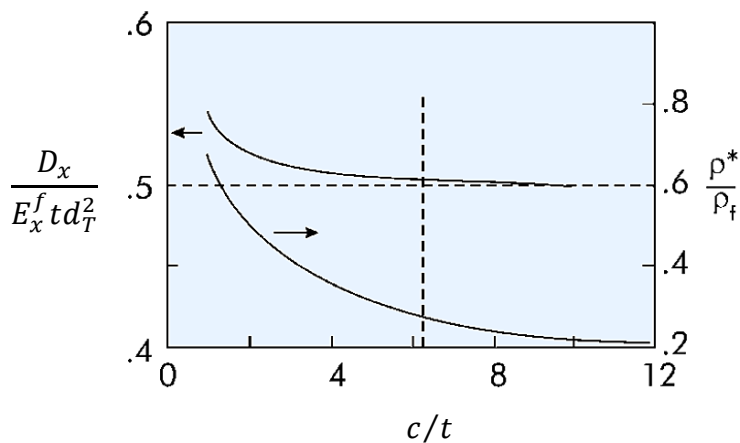
gdje su ρ_c i ρ_f gustoće jezgre i vanjskih slojeva. Prosječna gustoća sendviča tako postaje:

$$\rho^* = 2\frac{t}{d}\rho_f + \frac{c}{d}\rho_c, \quad (3.6)$$

gdje je d ukupna debljina sendviča [4]:

$$d = 2t + c. \quad (3.7)$$

Savojna krutost i gustoća opadaju s porastom omjera debljine jezgre i vanjskih slojeva. Normalizirana savojna krutost brzo opada na malim omjerima debljina te se asimptotski približava $1/2$, dok normalizirana gustoća kontinuirano opada s porastom omjera debljina, što je prikazano na slici 3.3. [4]



Slika 3.3. Savojna krutost i gustoća sendviča u odnosu na omjer debljina jezgre i vanjskih slojeva [4]

Prvi član zagrade u izrazu (3.4) odnosi se na doprinos jezgre krutosti sendviča, koji je malen zbog malog omjera modula elastičnosti pa se taj član može zanemariti. Drugi član daje značajan doprinos samo u slučaju debelih vanjskih slojeva, a kako se kod sendvič kompozita koriste tanki vanjski slojevi i ovaj član se može zanemariti. Vanjski slojevi smatraju se tankima, ako je zadovoljena nejednakost [4]:

$$c/t \geq 5,35. \quad (3.8)$$

Uzimajući u obzir navedene doprinose članova i poštovanje nejednakosti, izraz (3.4) transformira se u [4]:

$$D_x = \frac{E_x^f t d_T^2}{2}. \quad (3.9)$$

Iz izraza (3.9) uočavaju se glavni čimbenici za postizanje visoke savojne krutosti, a to su visok modul elastičnosti vanjskih slojeva E_x^f i velika udaljenost d_T između težišta vanjskih slojeva. Velika vrijednost debljine vanjskih slojeva također pridonosi savojnoj krutosti, ali nije poželjna s gledišta mase konstrukcije. Zaključno, najbolja konstrukcija sendviča sastoji se od tankih vanjskih slojeva s visokim modulom elastičnosti i jezgre male gustoće. [4]

3.2. Naprezanja u vanjskim slojevima i jezgri

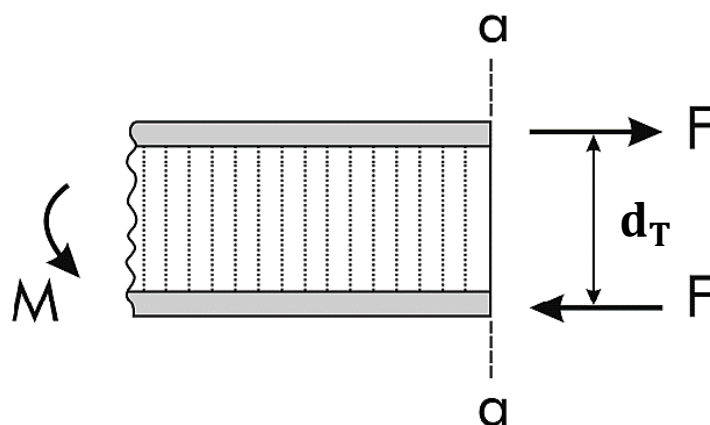
U slučaju sendvič kompozita s vanjskim slojevima, koji su puno tanji od jezgre, uočava se da je moment savijanja M jednak spregu rasteznih i tlačnih sila jednakih iznosa, kao što je prikazano na slici 3.4. Ako se zanemari savojno naprezanje u jezgri, ravnotežno stanje elementa na slici 3.4. daje izraz za prosječno savojno naprezanje u vanjskim slojevima [4]:

$$\sigma_s^f = \frac{M}{B d_T t}, \quad (3.10)$$

gdje je d_T udaljenost težišta vanjskih slojeva:

$$d_T = t + c, \quad (3.11)$$

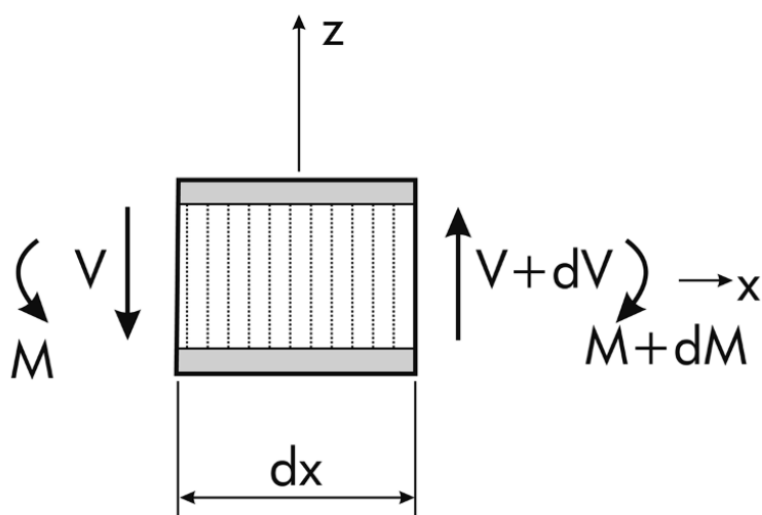
a B je širina sendvič grede (slika 3.2.). Treba uočiti da je σ_s^f rastezno (pozitivno) na gornjoj plohi sloja, odnosno tlačno (negativno) na donjoj za promatrani slučaj opterećenja. Na temelju ovoga da se zaključiti da vanjski slojevi moraju imati visoku rasteznu i tlačnu čvrstoću kako bi se opirali savijanju. [4]



Slika 3.4. Element sendvič kompozita oslobođen veza [4]

Ako je sendvič greda opterećena momentom promjenjivim po poprečnom presjeku, iz sume sila i momenata dobiva se smična sila V , koja djeluje poprečno na os grede (slika 3.5.)

$$V = \frac{dM}{dx} \quad (3.12)$$



Slika 3.5. Element sendvič grede s promjenjivim momentom po presjeku [4]

Smično naprezanje τ_{xz} , koje djeluje na jezgru, dobiveno je iz sume sila i momenata elementa mm_1ab prikazanog na donjem dijelu slike 3.6. Horizontalna sila F_1 , proizašla iz naprezanja σ_s^f , koja djeluje na lijevu stranu elementa, dana je izrazom:

$$F_1 = \sigma_s^f Bt = \frac{M}{d_T}, \quad (3.13)$$

dok je odgovarajuća horizontalna sila na desnoj strani elementa:

$$F_2 = \frac{M + dM}{d_T}. \quad (3.14)$$

Horizontalna sila uslijed smičnog naprezanja koja djeluje na površinu jezgre na presjeku ab je:

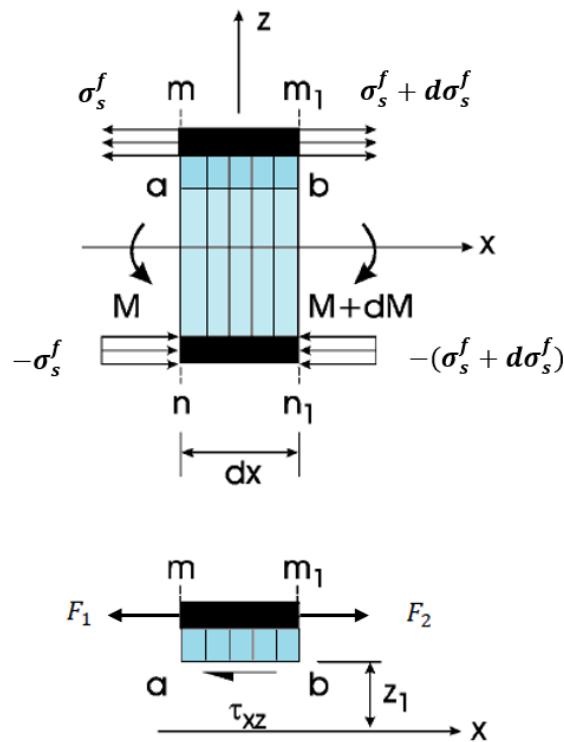
$$F_3 = \tau_{xz} B dx. \quad (3.15)$$

Iz sume sila dobije se:

$$F_3 = F_2 - F_1 = \frac{dM}{d_T}. \quad (3.16)$$

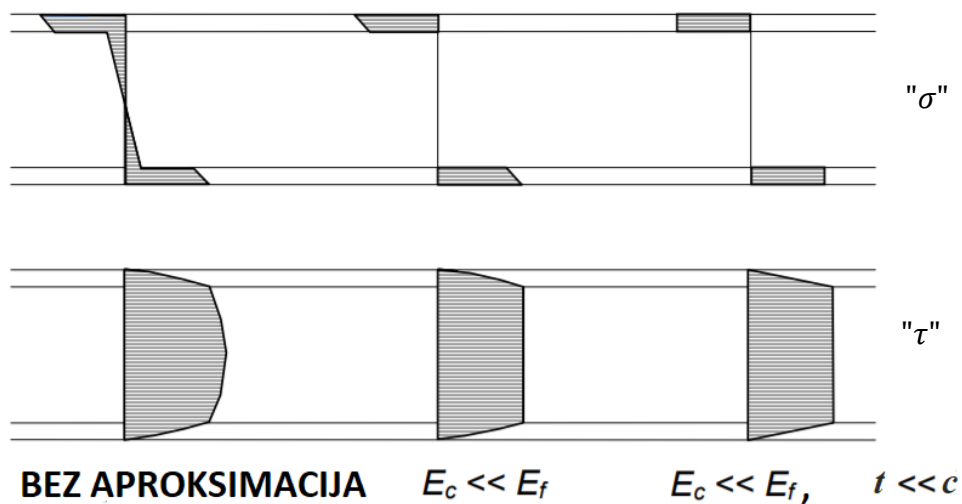
Valja primijetiti da je površina vanjskog sloja mm_1 oslobođena smičnog naprezanja. Kombinacijom izraza (3.15) i (3.16) dobije se:

$$\tau_{xz} = \frac{dM}{dx} \frac{1}{B d_T} = \frac{V}{B d_T}. \quad (3.17)$$



Slika 3.6. Element sendviča razmatran u proračunu smičnog naprezanja jezgre [4]

Smično naprezanje opada gotovo linearno od vrijednosti V/Bd_T na mjestima kontakta jezgre i vanjskih slojeva, do vrijednosti 0 na površini vanjskih slojeva. Raspodjela smičnog naprezanja u sendvič gredi prikazana je na slici 3.7. [7]



Slika 3.7. Raspodjela naprezanja u sendviču za različite aproksimacije [5]

Iz izraza (3.17) vidi se potreba za odabirom materijala jezgre koji su otporni na smik. Kod jezgri s malim modulom smičnosti, smična deformacija može biti prekomjerna i postati glavni oblik deformacije sendviča. Stoga, da bi se izbjegla prekomjerna smična deformacija sendviča, potrebno je odabrati materijale jezgre s dovoljno visokim smičnim modulom. [4]

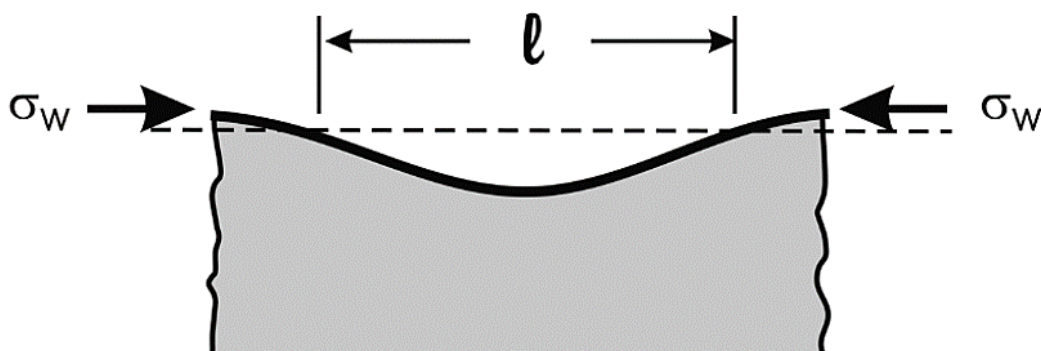
Smična krutost jezgre sendviča dana je izrazom:

$$S_c = \frac{G_c d_T^2}{c}, \quad (3.18)$$

gdje je G_c modul smičnosti jezgre, a c njena debljina, dok je d_T udaljenost težišta vanjskih slojeva (slika 3.4). [7]

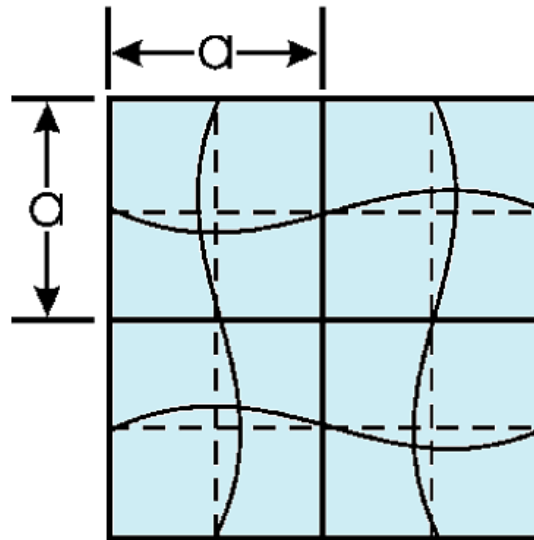
3.3. Mehanizmi popuštanja sendvič grede

Osim lomova uslijed premale otpornosti vanjskih slojeva na savijanje te jezgre na smično naprezanje (slika 3.14.), postoji još niz drugih lokalnih mehanizama popuštanja sendviča. Jedan takav mehanizam je boranje vanjskih slojeva prikazan na slici 3.8. Takav mehanizam može nastati kod sendviča s mekom, homogenom jezgrom, kao što su polimerne pjene ili balsa, uslijed djelovanja jednoosnog tlačnog naprezanja. Do boranja također može doći na tlačnoj strani grede, uslijed savijanja. Ovaj mehanizam manifestira se kao lokalno izvijanje vanjskih slojeva. Boranje se može spriječiti uporabom jezgri visoke krutosti. [4]



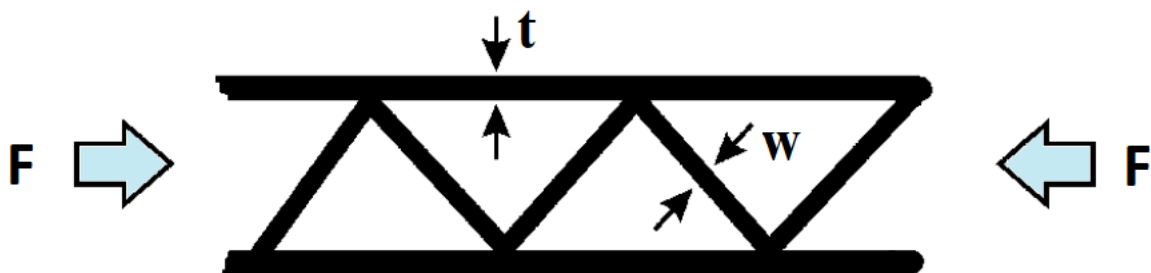
Slika 3.8. Boranje vanjskih slojeva u tlačno opterećenom elementu sendviča [4]

Kod sendvič kompozita s ćelijastom jezgrom, vanjski slojevi se mogu naborati između potpornih ćelija, kao što je prikazano na kvadratnim ćelijama na slici 3.9. Takav mehanizam naziva se međućelijasto boranje. Naprezanje uslijed lokalnog boranja proporcionalno je umnošku modula elastičnosti vanjskih slojeva i kvadrata njihove debljine ($E_f \cdot t^2$). [4]

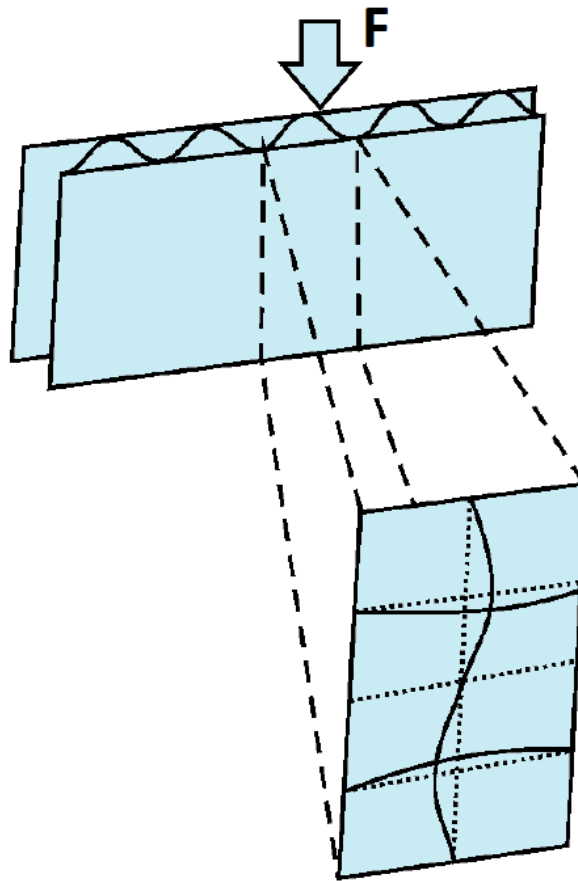


Slika 3.9. Lokalno boranje vanjskih slojeva kod sendviča s ćelijastom jezgrom [4]

Kod sendvič kompozita s mrežastom jezgrom dolazi do boranja i vanjskih slojeva i jezgre uslijed tlačnih naprezanja okomitih (slika 3.10.) ili paralelnih na valove jezgre (slika 3.11.) [4]
 Kod sendvič kompozita s ćelijastim ili mrežastim jezgrama može doći do lokalnog boranja uslijed smičnog naprezanja, no to se može izbjeći korištenjem kratkih segmenata visoke lokalne savojne krutosti. [4]



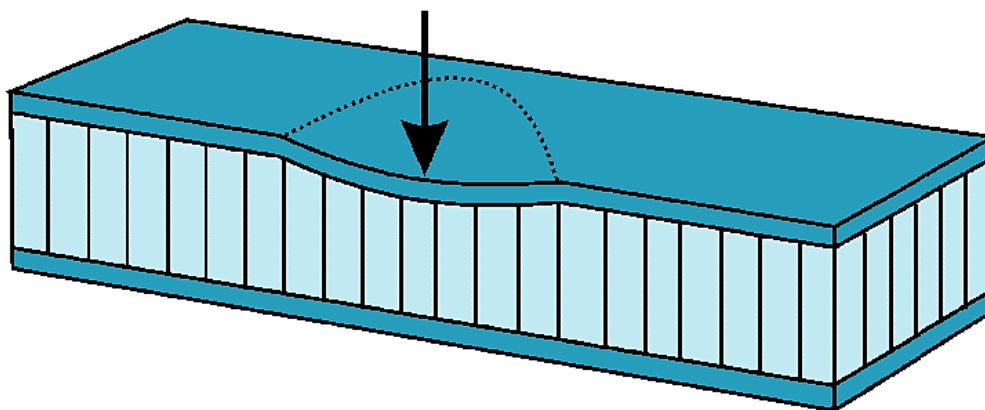
Slika 3.10. Sendvič kompozit s mrežastom jezgrom tlačno opterećen okomito na valove [4]



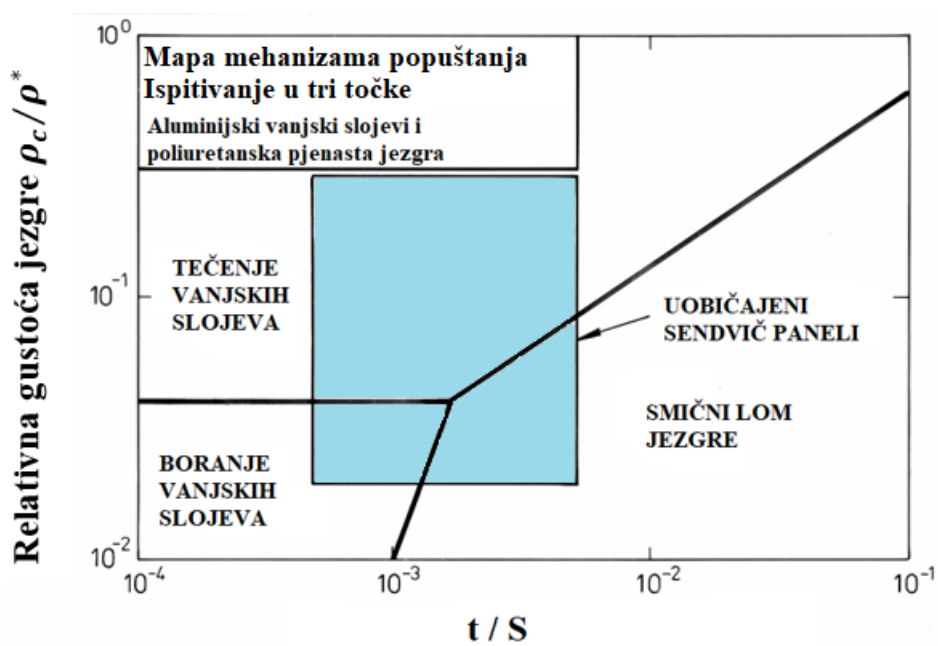
Slika 3.11. Lokalno boranje vanjskih slojeva sendvič kompozita s mrežastom jezgrom, opterećenog paralelno s valovima [4]

Sendvič kompoziti mogu podlegnuti lomu uslijed koncentriranih naprezanja koja djeluju u smjeru normale ravnine sendviča, kao što je prikazano na slici 3.12. Lokalizirana opterećenja mogu nastati uslijed udarnog opterećenja uzrokovanog teškim predmetima, poput udaraca od ispalih alata te na mjestima između spojeva i zglobova dijelova sendvič konstrukcije. Koncentrirana opterećenja koja djeluju poprečno na ravninu sendviča mogu uzrokovati značajne lokalne deformacije i dovesti do nastanka višeosnog stanja naprezanja u pogođenim područjima jezgre i vanjskih slojeva. [4]

Postoje različite mape za predviđanje mehanizma popuštanja sendvič konstrukcija. Jedan takav primjer dan je na slici 3.13.

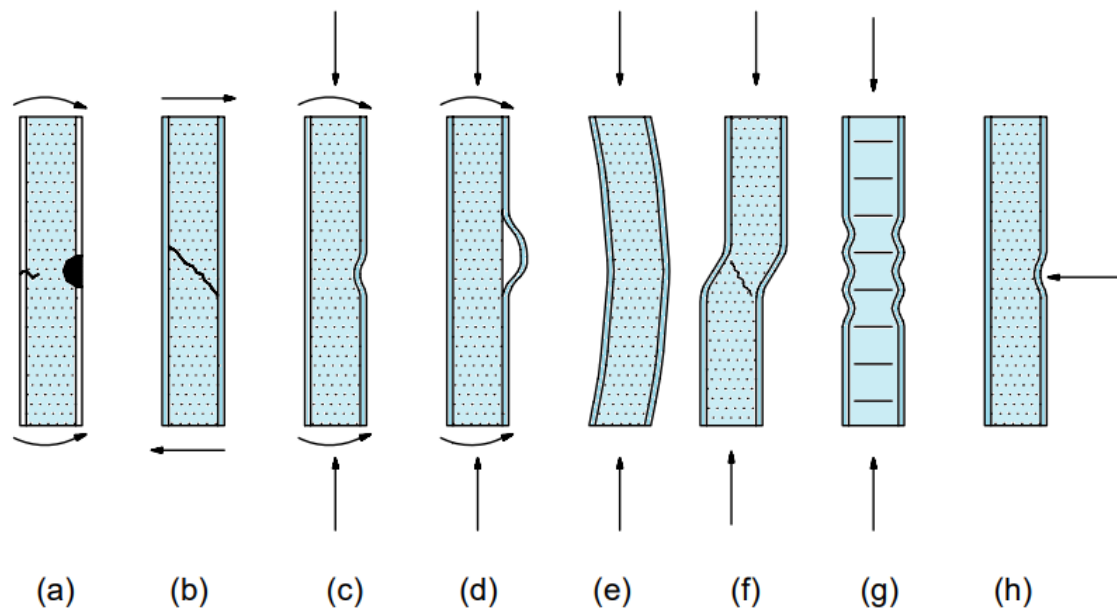


Slika 3.12. Lokalno oštećenje uslijed koncentriranog opterećenja [4]



Slika 3.13. Mapa za određivanje mehanizma popuštanja sendvič panela [8]

Na slici 3.14. dan je sumirani prikaz mogućih mehanizama popuštanja sendvič kompozita.



Slika 3.14. Mogući mehanizmi popuštanja sendvič kompozita: (a) popuštanje vanjskih slojeva; (b) smični lom jezgre; (c) i (d) boranje vanjskih slojeva; (e) opće izvijanja; (f) izvijanje uslijed smicanja; (g) boranje jezgre; (h) popuštanje uslijed koncentriranih napreznja [5]

4. PREGLED NORMI ZA ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA SENDVIČ KOMPOZITA²

U ovom poglavlju dan je prikaz i kratak opis nekih normi za ispitivanje mehaničkih svojstava sendviča, te detaljniji prikaz norme ASTM C393/C393M Određivanje smičnih svojstava jezgre sendvič konstrukcije savojnim ispitivanjem (e. *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*), po kojoj je napravljen računalni alat u sklopu završnog zadatka.

Norma je „sporazumno ustanovljen dokument, odobren od mjerodavnoga tijela, koji za opću uporabu daje pravila, upute, značajke djelovanja, te time jamči najviši stupanj usklađenosti u danim uvjetima.“ [9]

Osim norme ASTM C393/C393M, dan je i kratak pregled normi ASTM D7249/7249M Određivanje svojstava vanjskih slojeva sendvič konstrukcija savijanjem duge grede (e. *Standard Test Method for Facesheet Properties of Sandwich Constructions by Long Beam Flexure*) i ASTM D7250/7250M Određivanje savojne i smične krutosti sendviča (e. *Standard Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness*). Sve tri norme povezane su međusobno, odnosno koriste se za dobivanje svojstava koja su potrebna u nekoj od ostalih normi.

4.1. Norma ASTM D7249/D2749M

Prema normi ASTM D2749/D2749M mogu se odrediti mehanička svojstava vanjskih slojeva sendvič konstrukcije. [10]

Ova ispitna metoda sastoji se od opterećivanja dugačke sendvič grede momentom okomitim na ravninu sendviča, koristeći ispitivanje u četiri točke (slika 4.1). Mjeri se deformacija u ovisnosti o sili. Jedini prihvatljivi mehanizmi popuštanja kod ispitivanja čvrstoće vanjskih slojeva su oni unutar samih slojeva. Popuštanje jezgre ili adheziva, koji prethode popuštanju vanjskih slojeva nisu prihvatljiv mehanizam popuštanja. [10]

Kako je objašnjeno u poglavlju 3.2., prilikom savijanja grede moment savijanja M jednak je spregu vlačnih i tlačnih sila koje djeluju na vanjske slojeve, pa se tako prosječno savojno naprezanje u vanjskim slojevima može dobiti dijeljenjem sprega sila s površinom na koju

² Napomena: Oznake korištene u ovom radu mogu se razlikovati od onih u izvornoj literaturi. Razlog tomu je ujednačavanje oznaka u svim poglavljima i prilagodba na hrvatsku literaturu.

djeluju. Također, ako se greda optereti momentom promjenjivim po poprečnom presjeku, iz sume sila i momenata može se dobiti smično naprezanje u jezgri.

Stoga se savojna ispitivanja ravnih sendvič konstrukcija mogu koristiti za dobivanje mehaničkih svojstava poput: savojne krutosti sendviča, smične čvrstoće jezgre, smičnog modula ili za dobivanje rastezne i tlačne čvrstoće vanjskih slojeva. Ispitivanja za procjenu smične čvrstoće jezgre mogu se koristiti i za procjenu svojstava adheziva. [10]

Norma ASTM D7249/D7249M ograničena je na dobivanje čvrstoće i krutosti vanjskih slojeva sendvič konstrukcije te dobivanje podataka o opterećenju i progibu, koji se koriste za izračunavanje savojne i smične krutosti sendvič grede prema normi ASTM D7250/D7250M. Usljed zakrivljenosti ispitnog tijela opterećenog na savijanje, tlačna čvrstoća vanjskih slojeva dobivena ovim ispitivanjem može se razlikovati od tlačne čvrstoće dobivene opterećivanjem vanjskih slojeva čistim tlačnim naprezanjem. [10]

Smična čvrstoća jezgre korištena u ovoj ispitnoj metodi dobiva se normom ASTM C393/C393M, dok se savojna i smična krutost sendvič grede dobivaju iz norme ASTM D7250/D7250M. [10]

Norma ASTM D7249/D7249M također se koristi za dobivanje podataka o čvrstoći vanjskih slojeva potrebnih za: dobivanje dozvola za izradu konstrukcije, specifikacije materijala, primjenu u istraživanju i razvoju te za kontrolu kvalitete spojenih sendvič panela.

Čimbenici koji utječu na čvrstoću vanjskih slojeva i na koje treba obratiti pažnju jesu [10] :

- materijal vanjskih slojeva,
- materijal jezgre,
- materijal adheziva,
- metode izrade materijala,
- slijed slaganja vanjskih slojeva i njihova debljina,
- geometrija jezgre,
- priprema uzorka,
- ispitno okruženje,
- poravnavanje ispitnih tijela,
- postupak opterećivanja ispitnih tijela,
- brzina ispitivanja,
- sadržaj praznina u vanjskim slojevima i adhezivu te
- volumni udio ojačala u vanjskim slojevima.

Pomoću podataka dobivenih ovim ispitivanjem mogu se izračunati podatci poput rastezne čvrstoće vanjskih slojeva, izraz (4.1), efektivnog sekantnog modula elastičnosti te savojne krutosti sendviča. [10]

$$\sigma_m^f = \frac{F_{max}(S - L)}{2(d + c)bt} \quad (4.1)$$

4.2. Norma ASTM D7250/7250M [11]

Ova ispitna metoda sastoji se od izračuna savojne i poprečne smične krutosti te smičnog modula jezgre sendvič grede, koristeći podatke o progibu i/ili deformaciji, dobivene iz dva ili više savojna ispitivanja s različitim konfiguracijama naprezanja. Savojna ispitivanja provedena su u sklopu normi ASTM C393/C393M i ASTM D7249/7249M. Ova norma također uključuje izraze za izračun smične krutosti i smičnog modula jezgre sendvič grede, koristeći podatke dobivene jednim savojnim ispitivanjem u sklopu norme ASTM C393/C393M, kad su poznati moduli elastičnosti vanjskih slojeva.

Ispitivanja se mogu provoditi na kratkim i dugim ispitnim tijelima ili na jednom ispitnom tijelu opterećenom na više načina. Savojna i smična krutost te modul smičnosti jezgre mogu se odrediti istovremenim rješavanjem jednadžbi progiba za svaku promjenu presjeka i opterećenja. Ako su poznati moduli elastičnosti vanjskih slojeva za kratku gredu, izračunati progib uslijed savijanja može se izdvojiti od ukupnog progiba, ostavljajući smični progib iz kojeg se može dobiti poprečni modul smičnosti.

4.3. Norma ASTM C393/C393M

Norma ASTM C393/C393M primjenjuje se za dobivanje smičnih svojstava jezgre sendvič grede. Ova ispitna metoda sastoji se od savojnog opterećivanja sendvič grede, momentom okomitim na ravninu sendviča. Mjeri se ovisnost sile i progiba. Jedini prihvatljiv mehanizam popuštanja je popuštanje jezgre ili adheziva uslijed smicanja. Čvrstoća vanjskih slojeva dobiva se iz norme ASTM D7249/7249M. [12]

Ovim ispitivanjem dobivaju se smične čvrstoće jezgre i adheziva te smična krutost sendvič grede. Moguće je dobiti i podatke o odnosu opterećenja i progiba, koji služe za izračun smične i savojne krutosti sendvič grede, prema normi ASTM D7250/7250M. Za dobivanje smične čvrstoće i modula smičnosti čistog materijala jezgre, primjenjuje se norma ASTM C273. [12] Norma ASTM C393/C393M također se koristi za dobivanje podataka o smičnim čvrstoćama jezgre i adheziva za: prikupljanje dozvola za izradu konstrukcije, specifikacije materijala, primjenu u istraživanju i razvoju te za kontrolu kvalitete sendviča. [12]

4.3.1. Materijali i priprema za ispitivanje

Posebnu pažnju treba obratiti na pripremu jezgre sendviča, odnosno na čimbenike koji mogu prouzročiti rasipanje rezultata ispitivanja, a to su: postojanje spojeva, praznina ili drugih diskontinuiteta u jezgri, zakrivljenosti okomite na ravninu sendviča te površinska hrapavost. [12]

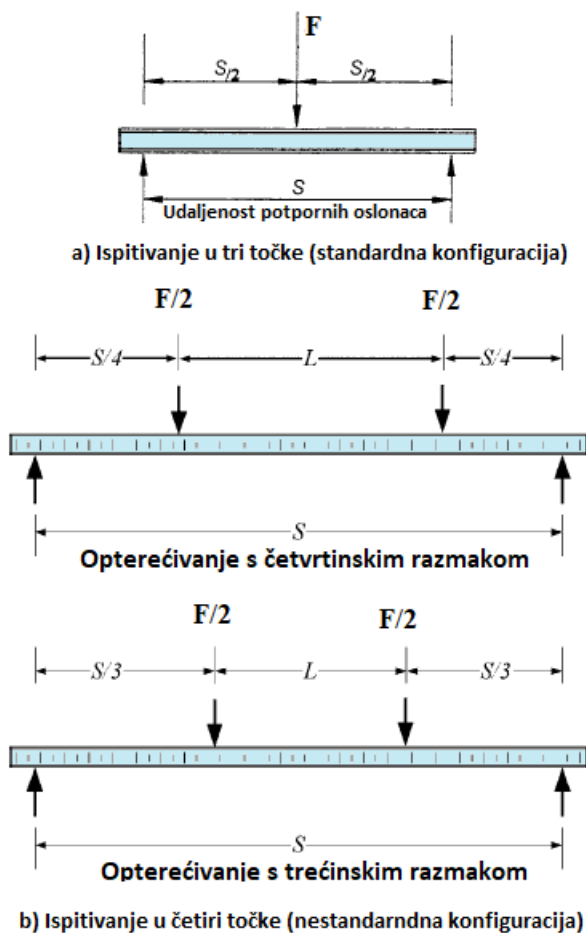
Što se tiče geometrije ispitnog tijela, geometrijski faktori koji utječu na smičnu čvrstoću jezgre su ortotropnost materijala jezgre te geometrija ćelije. Ako materijal jezgre ima nedovoljnu smičnu ili tlačnu čvrstoću, može doći do lokalnih puknuća na mjestima opterećivanja ispitnog tijela, uzrokujući lom vanjskih slojeva uslijed lokalnih naprezanja. Za neke materijale jezgre, smična čvrstoća je funkcija usmjerenosti jezgre relativno u odnosu na duljinu ispitnog tijela. [12]

Važno je još pažnju obratiti i na okolišne uvjete ispitivanja, kao što su vlaga, temperatura i slično. Ispitnim tijelima ispitivanim u različitim okolišnim uvjetima mogu se značajno razlikovati dobivena svojstva i mehanizmi popuštanja. Preporuka je obaviti kondicioniranje uzoraka prije ispitivanja, prema normi ASTM D5229/D5229M Određivanje upojnosti vlage i ravnotežnog kondicioniranja kompozita s polimernom matricom (e. *Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials*). [12] Ovo je gravimetrijska ispitna metoda koja prati promjenu prosječnog sadržaja vlage u uzorku mjereći ukupnu promjenu mase ispitnog tijela izloženog djelovanju okoline sa dvije strane [13].

4.3.2. Pribor i konfiguracije [12]

Mjerni instrumenti koji se koriste trebaju imati preciznost mjerenja ± 0.025 mm kod mjerenja debljine, odnosno ± 0.254 mm za mjerenje duljine i širine.

Sustav opterećivanja ispitnog tijela izvodi se u obliku opterećivanja u tri, odnosno četiri točke, a sastoji se od dva potporna oslonca, koji pokrivaju širinu ispitnog tijela odozdo i jedne ili dvije grede za opterećivanje ispitnog tijela, koje se nalaze s gornje strane (slika 4.1.) Sila se prenosi vertikalno, kroz grede za opterećivanje ispitnog tijela, dok su potporni oslonci fiksirani u ispitnom uređaju.



Slika 4.1. Konfiguracije opterećenja [12]

Standardna konfiguracija podrazumijeva ispitivanje u tri točke, gdje je razmak između simetrala oslonaca $S = 150 \text{ mm}$, a raspon opterećivanja $L = 0$.

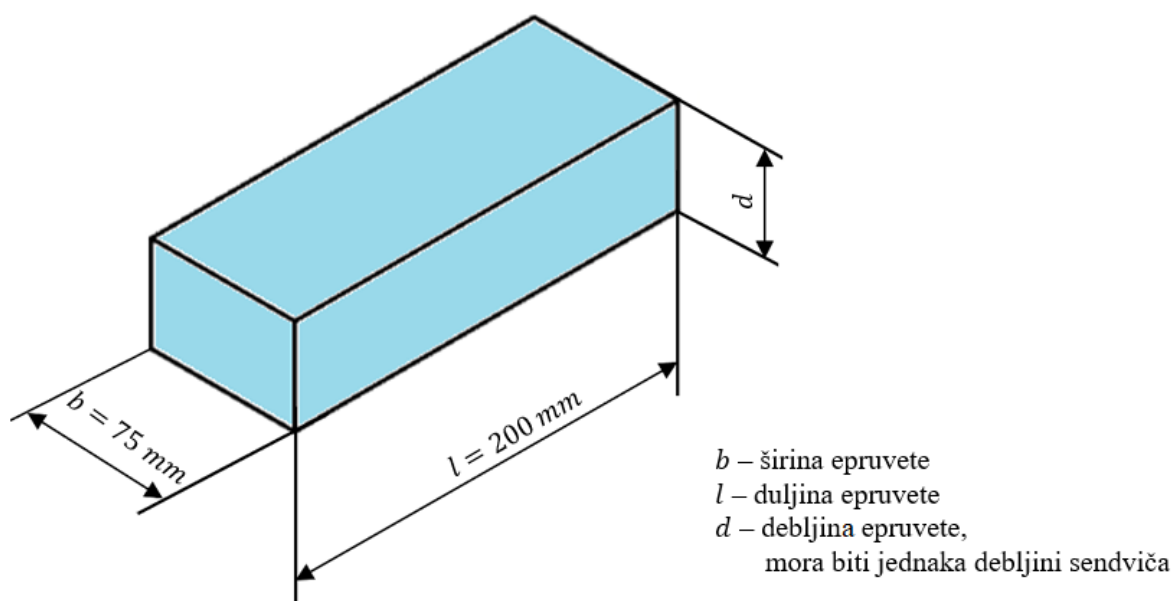
Nestandardne konfiguracije podrazumijevaju ispitivanje u četiri točke s trećinskim ili četvrtinskim razmakom opterećenja, kao što je prikazano na slici 4.1. Ovakve konfiguracije zadržale su se u uporabi zbog poklapanja s prethodnim verzijama norme ASTM C393, također zbog toga što konstrukcija nekih sendvič panela zahtjeva ovakva nestandardna ispitivanja da bi se postigli željeni mehanizmi popuštanja te zbog toga što se dobiveni podatci o ovisnosti opterećenja i progiba mogu koristiti u sklopu norme ASTM D7250/D7250M, za dobivanje smične i savojne krutosti sendvič grede.

Dio opreme na koji treba obratiti dodatnu pažnju su trnovi za opterećivanje ispitnog tijela te potporni oslonci. Ta oprema treba dozvoliti slobodnu rotaciju ispitnog tijela na mjestima

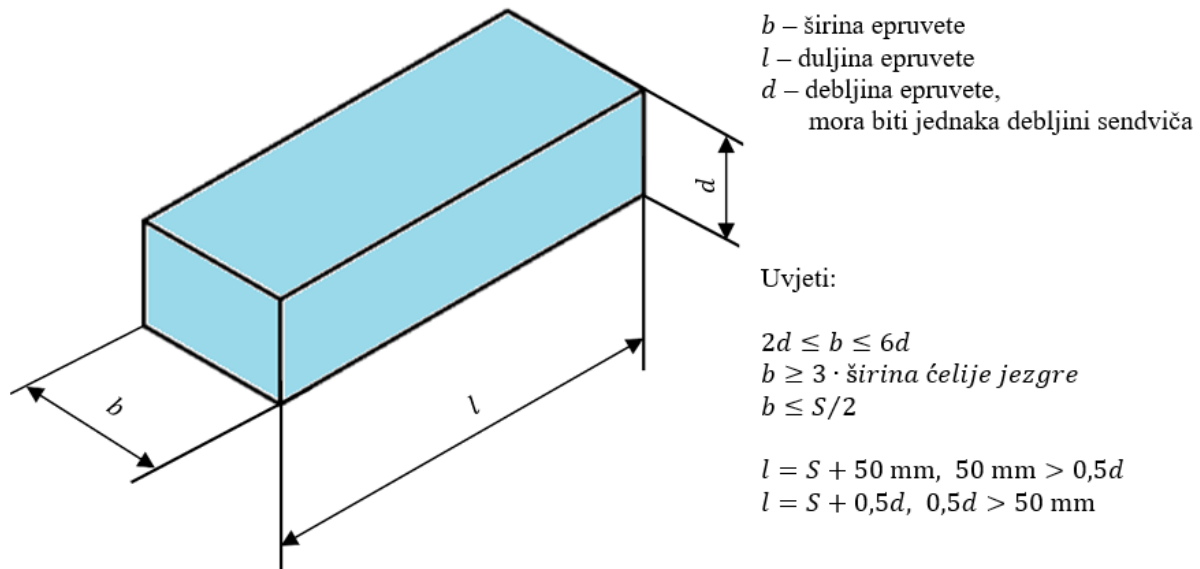
opterećivanja odnosno podupiranja. Također, moraju imati dovoljnu krutost, kako ne bi došlo do deformacije samih trnova prilikom ispitivanja. Preporučena širina ravnih čeličnih blokova za opterećivanje ispitnih tijela (preko gumenih jastučića) je $l_{pad} = 25$ mm, a na kraju tih čeličnih blokova nalaze se cilindrični ili V-oblik završetci. Gumeni pritisni jastučići koji se koriste između trnova za opterećivanje i ispitnih tijela trebaju imati nazivnu širinu 25 mm, te nazivnu debljinu 3 mm.

4.3.3. Ispitna tijela [12]

Pri svakom ispitivanju potrebno je ispitati najmanje pet ispitnih tijela, osim ako se važeći rezultati mogu postići s manjim brojem. Preporučuje se korištenje standardne konfiguracije za koju vrijedi da: ispitna tijela trebaju biti pravokutnog poprečnog presjeka, širine 75 mm, duljine 200 mm, dok debljina treba biti jednaka debljini sendvič konstrukcije, kao što je prikazano na slici 4.2. Za nestandardne konfiguracije duljina ispitnog tijela mora biti jednaka razmaku između potpornih oslonaca s dodatkom od još 50 mm ili s dodatkom pola debljine sendviča, ovisno što je veće. Širina ne smije biti manja od dvostruke, odnosno veća od šesterostruke debljine sendviča. Također, ne smije biti manja od trostruke širine ćelije jezgre, ni veća od polovine razmaka između oslonaca (slika 4.3.)



Slika 4.2. Dimenzije standardnog ispitnog tijela



Slika 4.3. Dimenzije nestandardnog ispitnog tijela

Prilikom dimenzioniranja ispitnih tijela koriste se izrazi navedeni u nastavku i to uz pretpostavke da oba vanjska sloja imaju iste module i debljine, te da je debljina vanjskih slojeva mala u odnosu na debljinu jezgre, odnosno da vrijedi :

$$t/c \leq \sim 0,10. \quad (4.2)$$

Razmak između oslonaca treba zadovoljiti sljedeći izraz:

$$S \leq \frac{2k\sigma_f^m t}{\tau_m} + L, \quad (4.3)$$

gdje su: S razmak između oslonaca, L razmak između mjesta opterećenja ($L = 0$ za ispitivanje u tri točke), σ_f^m očekivana rastezna čvrstoća vanjskih slojeva dobivena normom ASTM D7249/7249M, t debljina vanjskih slojeva, k faktor sigurnosti vanjskih slojeva koji osigurava popuštanje jezgre (preporučena vrijednost je 0,75) te τ_m procijenjena smična čvrstoća materijala jezgre.

Vrijedi i obrnuti izraz, koji mora zadovoljiti smična čvrstoća materijala jezgre:

$$\tau_m \leq \frac{2k\sigma_f^m t}{S - L}. \quad (4.4)$$

Za tlačnu čvrstoću materijala jezgre vrijedi:

$$\sigma_c \geq \frac{2(c + t)\sigma_f^m t}{(S - L)l_{pad}}, \quad (4.5)$$

gdje je c debljina jezgre, a l_{pad} širina pritisknog jastučića.

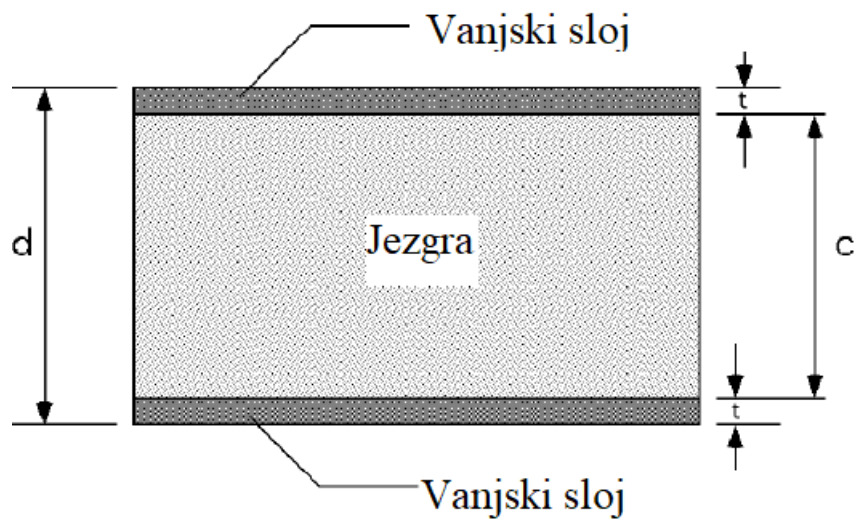
Iz gore navedenih izraza mogu se izraziti dopuštene dimenzije debljina jezgre i vanjskih slojeva, kao pomoć prilikom dimenzioniranja sendviča. Kod standardnih ispitnih tijela, vanjski slojevi trebaju biti napravljeni od istog materijala, iste debljine, istog rasporeda slojeva, ako se radi o kompozitnim materijalima, te iste krutosti. Naručitelj ispitivanja dužan je odrediti debljinu vanjskih slojeva, koja će se koristiti u izračunima.

4.3.4. Izračuni mehaničkih svojstava [12]

Kod standardne konfiguracije s ispitivanjem u tri točke, smična čvrstoća jezgre dobiva se iz izraza:

$$\tau_m^c = \frac{F_{max}}{(d + c)b}, \quad (4.6)$$

gdje su: τ_m^c smična čvrstoća jezgre, F_{max} maksimalna sila prije loma, d debljina sendviča, c debljina jezgre (slika 4.4.) i b širina sendviča.

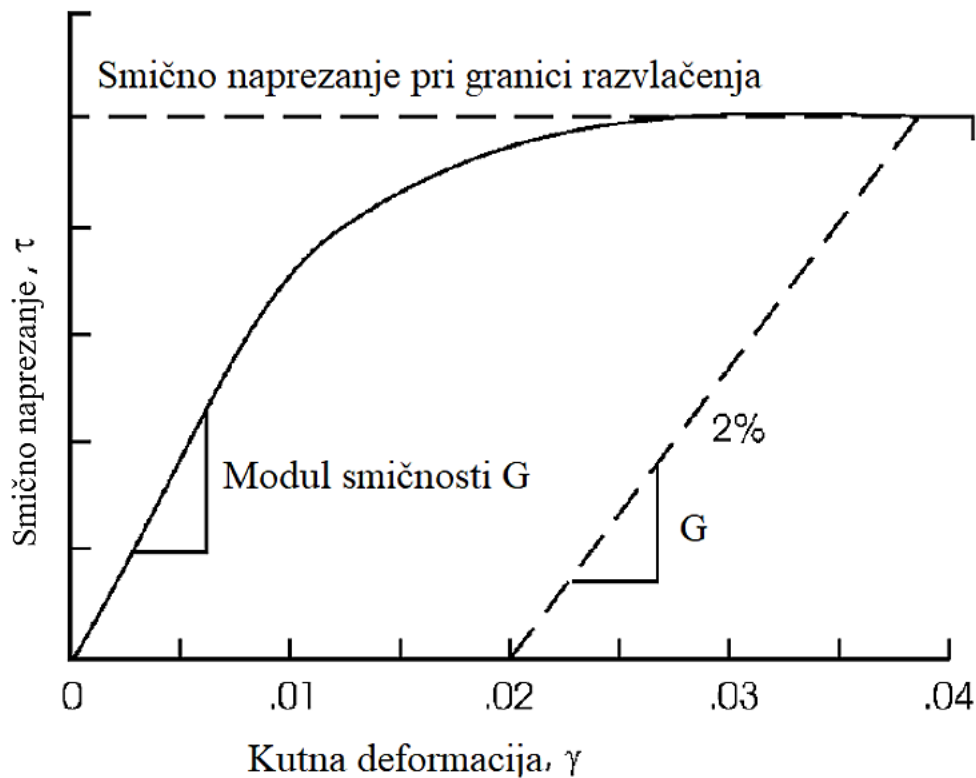


Slika 4.4. Dimenzije debljina dijelova sendvič panela [12]

Za materijale jezgre kojima je deformacija pri granici smicanja veća od 2 % (slika 4.5.), granica tečenja pri smicanju otprilike je jednaka smičnoj čvrstoći, a računa se prema sljedećem izrazu:

$$\tau_e^c = \frac{F_e}{(d + c)b'} \quad (4.7)$$

gdje je τ_e^c granica tečenja pri smicanju, a F_e smična sila pri deformaciji od 2 %.



Slika 4.5. Dijagram ovisnosti smičnog naprezanja o kutnoj deformaciji [4]

Prema ovoj normi moguće je izračunati i naprezanje u vanjskim slojevima, koristeći izraz:

$$\sigma^f = \frac{F_{max}S}{2t(d+c)b} \quad (4.8)$$

Naprezanje u vanjskim slojevima, izračunato pomoću izraza (4.8), služi kao referentna vrijednost za maksimalnu primijenjenu silu. Kako je ova norma ograničena na smične lomove jezgre i adheziva, naprezanja u vanjskim slojevima dobivena ovim izrazom ne predstavljaju rasteznu čvrstoću vanjskih slojeva, nego se ona dobiva normom ASTM D7249/D7249. Za nestandardne konfiguracije vrijede izrazi (4.6) i (4.7), a izraz (4.8) poprima sljedeći oblik:

$$\sigma^f = \frac{F_{max}S}{4t(d+c)b'} \quad (4.9)$$

za četvrtinski raspored opterećenja, ili:

$$\sigma^f = \frac{P_{max}S}{3t(d+c)b'} \quad (4.10)$$

za trećinski raspored opterećenja, a predstavlja savojno naprezanje u vanjskim slojevima.

5. IZRADA RAČUNALNOG ALATA

U sklopu završnog zadatka napravljen je računalni alat, koji omogućava lakše korištenje norme ASTM C393/C393M. Za njegovu izradu korišten je softver Microsoft Visual Studio.

Microsoft Visual Studio .NET je integrirano razvojno sučelje za izradu više različitih vrsta složenih mrežnih, kao i jednostavnijih „desktop“ aplikacija. Ova razvojna okolina uključuje četiri programska jezika [14], a u izradi ovog programa korišten je Visual Basic.

Računalni alat napravljen je tako da prikazuje dimenzije ispitnih tijela za standardnu i nestandardnu konfiguraciju prema normi ASTM C393/C393M, te daje rješenja za izraze iz poglavlja 4.3.3., a dalje slijedi proračun mehaničkih svojstava za standardnu konfiguraciju, koristeći izraze iz poglavlja 4.3.4.

5.1. Programski jezik Visual Basic

Za bolje razumijevanje izrade programa, u ovom poglavlju opisane su glavne značajke programskog jezika, poput tipova podataka i varijabli. Tipovi podataka u Visual Basicu su [14]:

- numerički: Integer (za cijele brojeve) i Double (za decimalne brojeve),
- tekstualni: String,
- logički: Boolean,
- opći: Variant,
- datum: Date i
- binarni: Byte.

Pri izradi računalnog alata korišten je tip podataka Double jer sve varijable predstavljaju brojeve, koji mogu biti u decimalnom obliku.

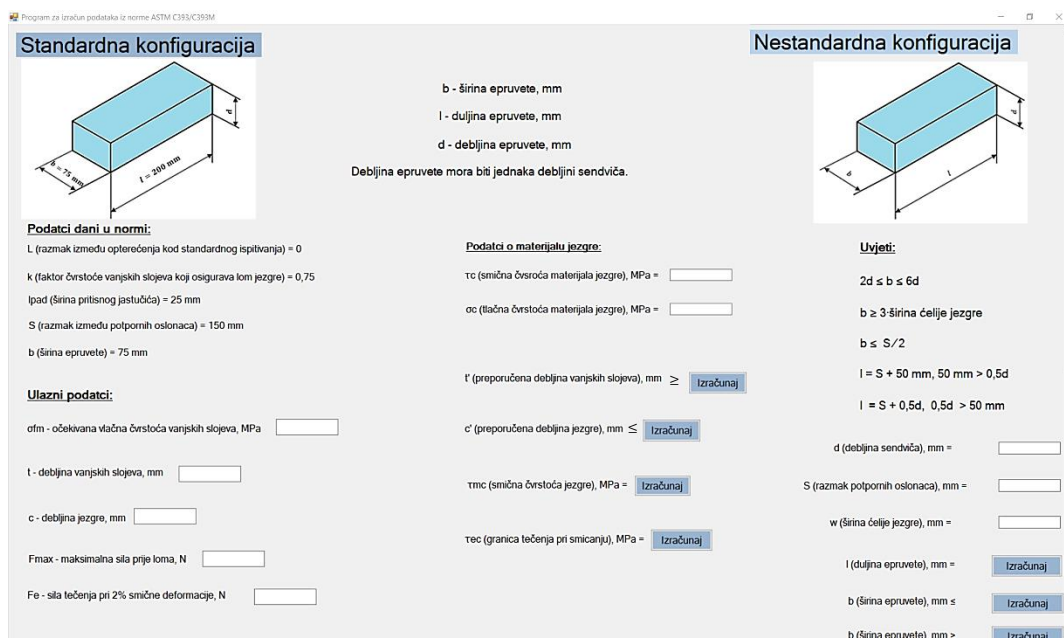
Varijable u programskom jeziku predstavljaju mjesta u memoriji u kojima se čuvaju podatci. Programeri kolokvijalno varijable nazivaju imenima podataka, no s time treba biti oprezan jer se podatci u tom mjestu u memoriji mogu mijenjati za vrijeme izvršavanja programa pa će varijabla ukazivati na različite podatke, ali uvijek na isto mjesto u memoriji. [15]

Jedna od karakteristika varijabli jest doseg varijable, a on označava područje naredbi programa u kojima je varijabla vidljiva. Prema dosegu, varijable se dijele na globalne i lokalne. Globalne varijable su dostupne u svim procedurama, dok su lokalne deklarirane i dostupne samo unutar te procedure ili funkcije. [14] Za ispunjavanje uvjeta kod nestandardne konfiguracije korištena je uvjetna kontrola toka, odnosno If i Else.

If se koristi za ispisivanje željenog podatka samo ako je neki uvjet zadovoljen. Naredba započinje riječju If, a zatim slijedi uvjet te riječ Then. Nakon toga se piše kod koji će se izvršiti ukoliko je taj uvjet zadovoljen. Cijela naredba završava riječju End If. Postoje slučajevi kada se želi da se ispiše jedan kod, ako je uvjet zadovoljen, a ako nije neka se ispiše drugi kod. U tim slučajevima koristi se Else. [14]

5.2. Izrada sučelja programa

Sučelje programa sastoji se od različitih kontrola poput prozora za nazive pojedinih segmenata (Label), tekstualnih okvira za upisivanje ulaznih podataka (TextBox), dugmadi za izračunavanje željenih podataka (Button) te okvira za slike (PictureBox). Na slici 5.1. prikazan je izgled sučelja napravljenog računalnog alata, a na slikama 5.2. i 5.3. način korištenja programa. Kod svih Labela i Buttona u rubrici Font upisan je željeni tekst, dok je kod TextBoxa u rubrici Design promjenjen naziv tekstualnog okvira (ime varijable).



Slika 5.1. Izgled sučelja računalnog alata

Sučelje se sastoji od dva glavna djela vezana za standardnu odnosno nestandardnu konfiguraciju. Na početku svake konfiguracije dan je prikaz ispitnih tijela te pripadajuće dimenzije. Kod nestandardne konfiguracije dani su uvjeti koje treba zadovoljiti prilikom njihovog dimenzioniranja. Standardna konfiguracija detaljnije je obrađena, te su uz dimenzije ispitni tijela dani i podatci za izračun mehaničkih svojstava. Podatci se dijele na one dane u

samoj normi te na ulazne podatke, koje korisnik mora sam unijeti. Primjer unošenja podataka dan je na slici 5.2. Nakon što korisnik unese potrebne podatke, pritiskom na gumb „Izračunaj“ program izbacuje vrijednosti pojedinih svojstava (slika 5.3.) Prve dvije nejednakosti vezane su za dimenzioniranje ispitnih tijela, a preostale dvije jednadžbe daju mehanička svojstva koja se mogu dobiti u sklopu norme.

Ulazni podatci:

σ_{fm} - očekivana vlačna čvrstoća vanjskih slojeva, MPa

t - debljina vanjskih slojeva, mm

c - debljina jezgre, mm

Fmax - maksimalna sila prije loma, N

Fe - sila tečenja pri 2% smične deformacije, N

Slika 5.2. Primjer unosa podataka

t' (preporučena debljina vanjskih slojeva), mm \geq

c' (preporučena debljina jezgre), mm \leq

τ_{mc} (smična čvrstoća jezgre), MPa =

τ_{ec} (granica tečenja pri smicanju), MPa =

Lucija_Loncar_zavrzni ✕
30,9739583333333

Slika 5.3. Izbacivanje željenih vrijednosti

5.3. Pisanje koda

Na početku koda potrebno je definirati sve varijable, a kao što je već spomenuto, sve su definirane kao „Double“ i to pod „Public Class“, odnosno kao globalne varijable.

```
Public Class Form1
    Dim d As Double
    Dim τc As Double
    Dim σc As Double
    Dim τmc As Double
    Dim τec As Double
    Dim Sigf As Double
    Dim t As Double
    Dim tc As Double
    Dim cc As Double
    Dim Sig As Double
    Dim c As Double
    Dim Fmax As Double
    Dim Fe As Double
    Dim S As Double
    Dim w As Double
    Dim l1 As Double
    Dim l2 As Double
    Dim b1 As Double
    Dim b2 As Double
    Dim b3 As Double
    Dim b4 As Double
```

Sljedeći korak je za svaki „Button“, odnosno gumb „Izračunaj“ napisati lokalne varijable, koje će se iščitati iz podataka koje korisnik unosi. Zatim je potrebno napisati jednadžbe za izračun željenih podataka, te podatke ispisati pomoću opcije „MsgBox“.

```
Private Sub Button1_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button1.Click
    Sig = txtsig.Text
    τc = txttau.Text

    τc = (τc * 150) / (2 * 0.75 * Sig)

    MsgBox(τc)
End Sub
```

```
Private Sub Button2_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button2.Click
    Sig = txtsig.Text
    τc = txttau.Text
    σc = txttl.Text

    τc = (τc * 150) / (2 * 0.75 * Sig)

    cc = ((σc * 150 * 25) / (2 * Sig * τc)) - τc
    MsgBox(cc)
End Sub
```

```
Private Sub Button3_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button3.Click
    Fmax = txtFm.Text
    c = txtc.Text
    t = txtt.Text

    d = c + 2 * t
    τmc = Fmax / ((d + c) * 75)
    MsgBox(τmc)
End Sub

Private Sub Button4_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles txttaue.Click
    Fe = txtFe.Text
    c = txtc.Text
    t = txtt.Text

    d = c + 2 * t

    τec = Fe / ((d + c) * 75)
    MsgBox(τec)
End Sub

Private Sub Button4_Click_1(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Button4.Click
    S = txtS.Text
    d = txtd.Text
    l1 = S + 50
    l2 = S + 0.5 * d
    If 0.5 * d < 50 Then
        MsgBox(l1)
    ElseIf 0.5 * d >= 50 Then
        MsgBox(l2)
    End If
End Sub

Private Sub Button5_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button5.Click
    S = txtS.Text
    d = txtd.Text
    b1 = 6 * d
    b2 = S / 2
    If b1 < b2 Then
        MsgBox(b1)
    ElseIf b1 >= b2 Then
        MsgBox(b2)
    End If
End Sub

Private Sub Button6_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button6.Click
    d = txtd.Text
    w = txtw.Text
    b3 = 2 * d
    b4 = w * 3
    If b3 < b4 Then
        MsgBox(b4)
    ElseIf b3 >= b4 Then
        MsgBox(b3)
    End If
End Sub
```

6. Zaključak

Cilj ovog rada bio je pobliže objasniti značaj uporabe sendvič kompozita, te pomoću jednostavnih izraza iz mehanike prikazati zahtjeve na pojedine konstituente sendviča. Pokazano je da se pri izradi sendvič konstrukcije trebaju birati materijali jezgre s visokom smičnom krutošću i modulom smičnosti te malom gustoćom, dok pri odabiru vanjskih slojeva prednost imaju oni s visokim modulom elastičnosti te tlačnom i rasteznom čvrstoćom, kako bi nosili poprečna naprezanja uslijed savijanja i opterećenja u smjeru ravnine. Nadalje, prikazani su karakteristični mehanizmi popuštanja sendvič kompozita, gdje se da uočiti da osim standardnih mehanizama popuštanja, kao što su popuštanje vanjskih slojeva, smični lom jezgre i izvijanje, postoje još i mehanizmi popuštanja uslijed boranja i koncentracije naprezanja. Nakon prikaza mehanizama popuštanja dan je i pregled normi za ispitivanje mehaničkih svojstava sendvič konstrukcija te su za svaku normu dane osnovne informacije o načinu ispitivanja i mehaničkim svojstvima, koja se pomoću njih dobiju. Zadatak je bio i pobliže opisati normu ASTM C393/C393M te na temelju nje izraditi računalni alat. Izrada tog alata obavljena je pomoću softvera Visual Studio, a omogućava lakšu primjenu spomenute norme. Program se sastoji od: dimenzija ispitnih tijela za pojedinu konfiguraciju, prikaza podataka koji su dani u normi (čime se olakšava pretraživanje norme), unosa podataka koji se dobiju drugim ispitivanjima ili mjerenjima te dijela za izračun mehaničkih svojstava iz norme.

LITERATURA

- [1.] Filetin T, Kovačiček F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. U Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2013.
- [2.] 1401782635-0-materijalii-kompoziti2014gmari.pdf [Internet]. [citirano 31. siječanj 2022.]. Dostupno na: <http://jonas1234.no-ip.org/download/2.%20Semestar/Materijali%20/Materijali%20predavanja/1401782635-0-materijalii-kompoziti2014gmari.pdf>
- [3.] What do you mean by plywood? [Internet]. Quora. [citirano 01. veljača 2022.]. Dostupno na: <https://www.quora.com/What-do-you-mean-by-plywood>
- [4.] Carlsson LA, Kardomateas GA. Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites. Springer, Dordrecht; 2011.
- [5.] Zenkert D. An Introduction to Sandwich Structures (Student Edition). DTU Mechanical Engineering, Technical University of Denmark; 2005.
- [6.] Davies JM. Lightweight Sandwich Construction. Wiley-Blackwell; 2001.
- [7.] Allen HG. Analysis and Design of Structural Sandwich Panels. Franklin Book Co; 1969.
- [8.] MIT3_054S15_L17_trans.pdf [Internet]. [citirano 17. veljača 2022.]. Dostupno na: https://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-054-cellular-solids-structure-properties-and-applications-spring-2015/lecture-notes/MIT3_054S15_L17_trans.pdf
- [9.] norma | Hrvatska enciklopedija [Internet]. [citirano 10. veljača 2022.]. Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=44095>
- [10.] ASTM D7249/D7249M Određivanje svojstava vanjskih slojeva sendvič konstrukcija savijanjem duge grede (e. Standard Test Method for Facesheet Properties of Sandwich Constructions by Long Beam Flexure). 2012.
- [11.] ASTM D7250/D7250M Određivanje savojne i smične krutosti sendviča (e. Standard Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness). 2016.
- [12.] ASTM C393/C393M Određivanje smičnih svojstava jezgre sendvič konstrukcije savojnim ispitivanjem (e. Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure). 2011.
- [13.] ASTM D5229/D5229M Određivanje upojnosti vlage i ravnotežnog kondicioniranja kompozita s polimernom matricom (e. Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials). 2012.
- [14.] PROGRAMIRANJE_I_ALGORITMI_SKRIPTA_prva_polovica.pdf [Internet]. [citirano 15. veljača 2022.]. Dostupno na: <http://jonas1234.no->

ip.org/download/3.%20Semestar/Programiranje%20i%20algoritmi/PROGRAMIRANJE_I_ALGORITMI_SKRIPTA_prva_polovica.pdf

[15.] Varijable i primitivni tipovi (UVOD U PROGRAMIRANJE) [Internet]. [citirano 23. veljača 2022.]. Dostupno na: <http://laris.fesb.hr/java/varijable.htm>