

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

David Islam

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

David Islam

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentorici prof.dr.sc. Tatjani Haramini na svim smjernicama te cjelokupnoj pomoći i strpljenju tokom izrade ovog rada. Također se želim zahvaliti tehničkim suradnicima Mireli Petranović i Božidaru Bušetinčanu na pruženoj pomoći tokom izvođenja eksperimentalnog dijela rada.

David Islam



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 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **David Islam** JMBAG: **0035220384**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mehanička svojstva sendvič konstrukcija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mechanical properties of sandwich constructions**

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. Za određivanje dimenzija ispitnih tijela napravljen je računalni alat.

U radu je potrebno proučiti norme za ispitivanje mehaničkih svojstava sendvič konstrukcija, testirati računalni program s konkretnim sendvičima s vanjskim korama od polimera ojačanog vlaknima i mekane jezgre. Po potrebi napraviti korekcije i/ili dopune programa. Odrediti mehanička svojstva sendviča, vanjskih kora i jezgre.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
 2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
 3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. - 3. 3. 2023.
 2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
 3. rok: 25. 9. - 29. 9. 2023.

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Tatjana Haramina

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. SENDVIČ KONTRUKCIJE	2
2.1. Kore.....	3
2.2. Jezgra	5
3. MEHANIČKA SVOJSTVA I ISPITIVANJE SENDVIČ KONTRUKCIJA.....	8
3.1. Uobičajena ispitivanja	8
3.1.1. Rastezna svojstva	8
3.1.2. Pritisna svojstva	10
3.1.3. Savojna svojstva.....	10
3.1.4. Smična svojstva	11
3.2. Mehanika – opterećenje sendviča[3].....	11
3.2.1. Naprezanja u korama i jezgri	11
3.2.2. Savojna krutost ispitnog tijela sendviča.....	14
4. NORME ZA ISPITIVANJE SENDVIČ KONSTRUKCIJA	17
4.1. ASTM C297 – plošna rastezna čvrstoća sendvič konstrukcija [9]	17
4.1. ASTM C364 – pritisna čvrstoća sendvič konstrukcije opterećenjem paralelnim s ravninom kora [12]	17
4.2. ASTM C365 – plošna pritisna čvrstoća jezgre sendviča [13].....	17
4.3. ASTM C273 – smična svojstva jezgre sendvič kompozita [14].....	18
4.4. ASTM C393 – ispitivanje smičnih svojstava jezgre savijanjem ispitnog tijela sendviča [15].....	18
5. EKSPERIMENTALNI DIO	21
5.1. Materijali jezgre i kora	21
5.1.1. Polimer ojačan staklenim vlaknom	21
5.1.2. Polimerna pjena	23
5.2. Ispitivanje mehaničkih svojstava sendvič konstrukcije	23
5.2.1. Rastezno ispitivanje kora	23
5.2.2. Savojno ispitivanje ispitnog tijela sendviča	25
5.3. Rezultati ispitivanja.....	27
5.3.1. Rezultati rasteznog ispitivanja kora	27
5.3.2. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnih tijela sendviča	32
5.4. Program za izračun podataka iz norme ASTM C393/C393M.....	37
6. ZAKLJUČAK.....	39

LITERATURA..... 41

POPIS SLIKA

Slika 2.1	Usporedba sačastog sendviča s I-profil gredom [2]	2
Slika 2.2	Sendvič kompozit sačaste jezgre [1]	3
Slika 2.3	Oblici staklenog vlakna: a) isječene niti, b)kontinuirane niti, c) roving, d) tkanina [4]	4
Slika 2.4	Tkanje staklenog vlakna [6]	5
Slika 2.5	Oblici jezgre sendvič kompozita [3]	6
Slika 3.1	Dijagram ovisnosti naprezanja o istezanju [8]	8
Slika 3.2	Rastezno ispitivanje sendviča okomito na slojeve ojačanja [10]	9
Slika 3.3	Sile u ispitnom tijelu kod savojnog ispitivanja [8].....	10
Slika 3.4	Čeljusti za smično ispitivanje sendviča/jezgre [3]	11
Slika 3.5	Moment savijanja poništen spregom sila kora [3].....	12
Slika 3.6	Pojava smične sile uslijed promjenljivog momenta po duljini ispitnog tijela [3].	13
Slika 3.7	Elementi promatrani kod proračuna smičnog naprezanja [3]	14
Slika 3.8	Poprečni presjek grede sendviča [3].....	14
Slika 4.1	Ispitivanje jezgre sendviča prema ASTM C273 [3].....	18
Slika 4.2	Ispitne konfiguracije [15]	20
Slika 5.1	Ispitno tijelo 1B [17]	22
Slika 5.2	Izrezana ispitna tijela kore sendviča.....	24
Slika 5.3	Opterećeno ispitno tijelo kore sendvič kompozita	25
Slika 5.4	Ispitna tijela tanjeg i debljeg sendviča	26
Slika 5.5	Opterećeno ispitno tijelo sendviča	27
Slika 5.6	Dijagram naprezanje – istezanje tanje kore.....	29
Slika 5.7	Dijagram naprezanje – istezanje deblje kore.....	31
Slika 5.8	Ispitna tijela kore sendvič kompozita nakon ispitivanja	32
Slika 5.9	Dijagram sila – progib debljeg ispitnog tijela sendviča	35
Slika 5.10	Dijagram sila – progib tanjeg ispitnog tijela sendviča	36
Slika 5.11	Ispitno tijelo debljeg sendviča nakon ispitivanja	37
Slika 5.12	Sučelje programa za lakše korištenje norme ASTM C393/C393M.....	38

POPIS TABLICA

Tablica 5.1 Vrijeme do početka očvršćivanja poliesterske smole u minutama ovisno o temperaturi i katalizatoru [16]	21
Tablica 5.2 Svojstva potpuno očvrsnute neojačane poliesterske smole [16]	22
Tablica 5.3 Izmjerene vrijednosti tanje kore	28
Tablica 5.4 Izračunate vrijednosti mehaničkih svojstava tanjih kora	29
Tablica 5.5 Izmjerene vrijednosti deblje kore	30
Tablica 5.6 Izračunate vrijednosti mehaničkih svojstava deblje kore	30
Tablica 5.7 Izmjerene vrijednosti debljeg ispitnog tijela sendviča	34
Tablica 5.8 Izračunate vrijednosti mehaničkih svojstava debljeg sendviča	34
Tablica 5.9 Izmjerene vrijednosti tanjeg ispitnog tijela sendviča	35
Tablica 5.10 Izračunate vrijednosti mehaničkih svojstava tanjeg sendviča	36
Tablica 5.11 Ulazni podaci programa za deblji i tanji sendvič	38
Tablica 5.12 Programom izračunate vrijednosti debljeg i tanjeg sendviča	38
Tablica 6.1 Svojstva dobivena ispitivanjem debljeg i tanjeg sendviča	39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
σ	MPa	Naprezanje
M	Nmm	Moment savijanja
b	mm	Širina sendviča
d	mm	Udaljenost između središta kora
h_f	mm	Debljina kore
h_c	mm	Debljina jezgre
V	N	Smična sila
F	N	Sila
τ_{xz}	MPa	Smično naprezanje
$E_x I$	Nmm ²	Savojna krutost ispitnog tijela sendviča
D_x	Nmm	Savojna krutost ovisna o širini
m	kg	Masa sendviča
l	mm	Duljina ispitnog tijela
ρ_f	kg/m ³	Gustoća kore
ρ_c	kg/m ³	Gustoća jezgre
ρ_{sr}	kg/m ³	Srednja ili efektivna gustoća sendviča
E	MPa	Modul elastičnosti
ε	mm/mm	Istezanje
σ_{fm}	MPa	Rastezna čvrstoća kore sendviča
F_{max}	N	Maksimalna sila
w_f	mm	Širina ispitnog tijela kore
σ_{fk}	MPa	Naprezanje pri lomu ispitnog tijela
F_k	N	Sila kidanja ispitnog tijela
ε_k	%	Deformacija pri lomu ispitnog itjela
ΔL_0	mm	Produljenje ispitnog tijela
L_0	mm	Početna mjerna duljina ispitnog tijela
$\sigma_{fp0,2}$	MPa	Granica razvlačenja kore
S	mm	Razmak između potpornih oslonaca
k	-	Faktor čvrstoće kore
L	mm	Razmak između trnova za opterećivanje
τ_m	MPa	Procijenjena smična čvrstoća jezgre

σ_p	MPa	Pritisna čvrstoća jezgre
l_{pj}	mm	Širina pritisnih jastučića
τ_{cm}	MPa	Smična čvrstoća jezgre
h	mm	Debljina sendviča
f	mm	Progib
σ_f	MPa	Naprezanje u korama

SAŽETAK

Ovaj rad temelji se na mehaničkim svojstvima sendvič konstrukcija. Dan je uvid u konstituente koji čine sendvič konstrukciju i način konstruiranja u svrhu dobivanja svojstava na koja se zahtjev postavlja ovisno o primjeni. Opisane su svojstvene uloge pojedine komponente i kojim se ispitivanjima podnašaju. Prema tome je dan i pregled normi koje se koriste za dobivanje mehaničkih svojstava sendvič konstrukcija. Dobivene su dvije različite sendvič konstrukcije s korama i jezgrama različitih debljina, kao i odgovarajuće kore odvojeno. Kore su ispitane rastezno i određen je udio vlakana u polimernoj matrici. Rezultati ukazuju na povećanje rastezne čvrstoće kompozita s porastom njegove debljine. Sendviči su ispitani savojno te je utvrđeno da debljina jezgre znatno utječe na njezinu smičnu čvrstoću. Korišten je računalni program za lakše korištenje norme ASTM C393/C393M za usporedbu rezultata s ispitivanja mehaničkih svojstava. Program je dao preporučene debljine kora i jezgre za optimalna svojstva dobivenih sendviča.

Ključne riječi: sendvič konstrukcija, kompozitni materijal, kora, jezgra, polimeri ojačani staklenim vlaknima, PVC pjena, mehanička svojstva, rastezna čvrstoća, krutost, smična čvrstoća

SUMMARY

This work is based on mechanical properties of sandwich constructions. An inspection has been made into the constituents from which a sandwich construction is made from. Construction with an intention of designing needed properties for a specific application was also considered. Specific roles of individual components were described as were the testings which they are submitted to. An overview of the standards applied in testing of mechanical properties of sandwich constructions has been made as well. Two sandwich panels and separate facings, each of different thickness were tested. The facings underwent a tensile test along with determination of glass fiber content in the polymer matrix. The results indicate an increase in tensile strength of the composite with the rise of its thickness. The sandwich constructions underwent flexural testing which determined that the shear strength of the core is drastically influenced by its thickness. A computer program for easier use of the ASTM C393/C393M standard was used for comparison of the mechanical properties testing results. The program has calculated the recommended thicknesses of facings and the core of each individual sandwich.

Key words: sandwich construction, composite material, facing, core, fiberglass reinforced polymer, PVC foam, mechanical properties, tensile strength, stiffness, shear strength

1. UVOD

Sendvič konstrukcije su tehnički materijali koje se kategorizira u strukturne kompozite. Koriste se radi povoljnih svojstava uz niske troškove proizvodnje u raznim područjima primjene poput zrakoplovstva, brodogradnje i građevinarstva.

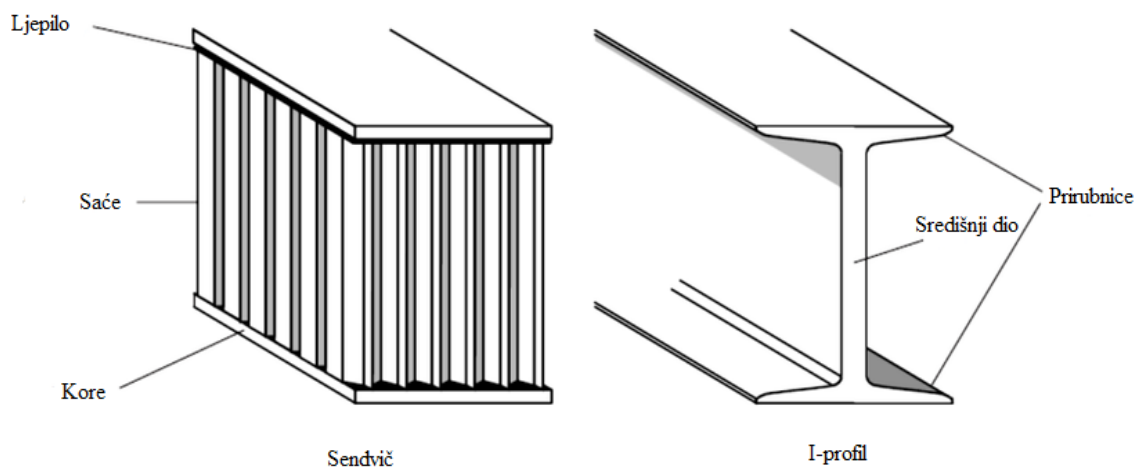
Kompozitni materijali dobivaju se kombinacijom dvaju ili više različitih materijala. Pri tome je naglasak na to kako zasebni materijali koji čine kompozit ne posjeduju svojstva koja posjeduje njihov kompozit. Strukturni kompoziti svojstva dobivaju specifičnim načinom slaganja sastavnih materijala i dijele se na slojevite kompozite i sendvič konstrukcije. Slojeviti kompoziti sastoje se od lijepljenih i najčešće anizotropnih ploča što znači da uporabna svojstva ovise o njihovoj orijentaciji. Sendvič konstrukciju čini lagana jezgra niske gustoće na koju su s obje strane nalijepljene kore koje su znatno manje debljine u odnosu na jezgru. Kore preuzimaju pritisna i rastezna vanjska opterećenja dok jezgra osigurava krutost sendviča.

Radi svoje složene strukture sendvič konstrukcije zahtijevaju posebne uvjete ispitivanja kod određivanja mehaničkih svojstava što uključuje karakterističnu pripremu ispitnih tijela, brzinu ispitivanja i prijenos opterećenja te odgovarajuće prihvatljive mehanizme popuštanja ispitnog tijela sendviča.

2. SENDVIČ KONTRUKCIJE

Sendvič konstrukcije kompozitni su materijali sastavljeni od dviju tankih vanjskih laminata (kora) između kojih se nalazi laki materijal za popunjavanje koji ih spaja, ali ujedno i razdvaja. Za tanke kore i materijal ispune nužno ne postoji zahtjev visoke čvrstoće i krutosti, ali sendvič konstrukcija koju oni sačinjavaju posjeduje oba svojstva.[1]

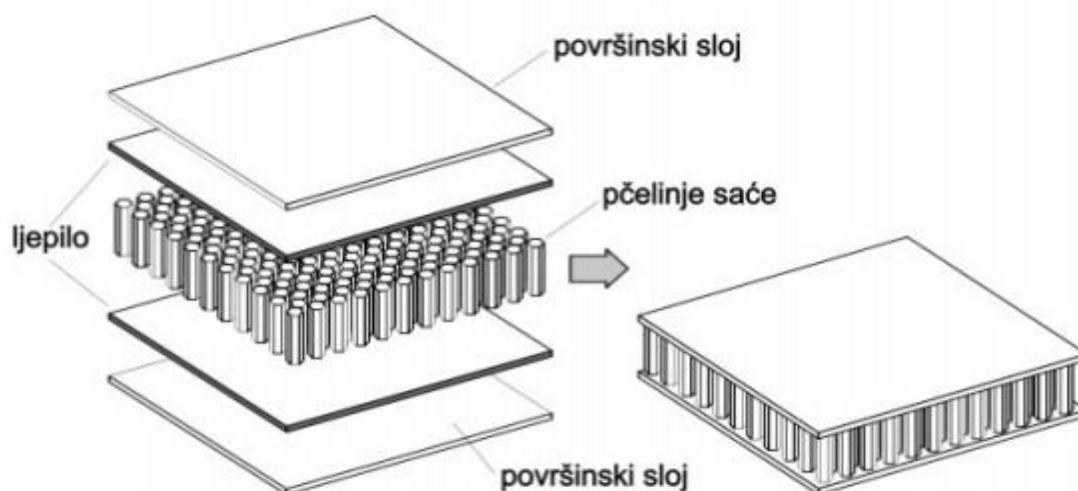
Dakle, svojstva sendvič kompozita ovise o materijalu kore i jezgre, ali i o njihovom geometrijskom rasporedu u strukturi. Konstruiranjem materijala s jezgrom između dvaju slojeva (kora) dobivamo visoku krutost materijala uz minimalno povećanje mase. Slično rješenje koristi se u građevinarstvu kod I-profila gdje relativno lagani središnji dio samo odvaja visoko opterećeni gornji i donji dio te tako povećava krutost profila (slika 2.1).[2]



Slika 2.1 Usporedba sačastog sendviča s I-profil gredom [2]

Jedan od jednostavnijih i dobro poznatih primjera sendvič konstrukcije jest karton. Ulogu jezgre obnaša valoviti karton koji je sa svake strane vezan za debele slojeve papira. Valovita jezgra i vanjski papirnati slojevi samostalno nisu izrazito kruti, dok njihova kombinacija jest. Drugi rašireni i značajan primjer sendviča su strukture čije su jezgre napravljene od oblika pčelinjih saća (slika 2.2). Profilirani limovi, folije ili trake aluminijske ili njegove legure sjedinjuju se u šesterokutne ćelije čije su osi okomito usmjerene na ravninu kora sendviča. Kore također mogu biti istog ili sličnog materijala od kojeg se sastoji i jezgra. Najčešća primjena kartona jest u pakiranju, dok se sačasti sendviči koriste u zrakoplovstvu za oplatu krila, trupa i repa zrakoplova,

u građevinarstvu u krovovima, podovima i zidovima zgrada te u brodogradnji gdje postoje zahtjevi na visoku čvrstoću i krutost uz minimalni prirast mase.[1][2]



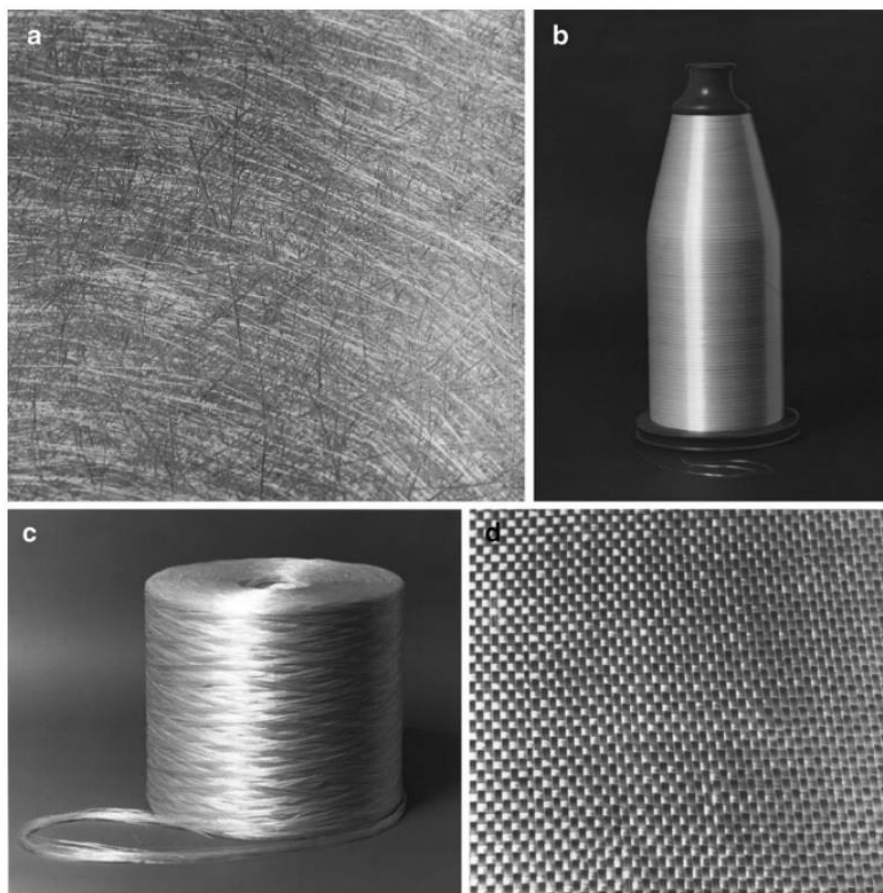
Slika 2.2 Sendvič kompozit saćaste jezgre [1]

2.1. Kore

Osnovna opterećenja na kora sendvič kompozita su pritisna i rastezna pa se prema tome definiraju i zahtjevi za materijale koji se mogu koristiti kao kore, prvenstveno zadovoljavajuća pritisna i rastezna čvrstoća, dovoljna krutost za distribuciju opterećenja, otpornost na trošenje, korozijska postojanost i slično. Stoga se za njihovu izradu može primijeniti gotovo svaki konstrukcijski materijal dostupan u obliku tankih ploča. Od metala se za kore sendviča najčešće koriste aluminij i njegove legure te razni čelici. Također se mogu koristiti furnir, papir, polimeri, laminati kompozita ojačanih vlaknima. Međutim, najčešće se koriste kompoziti i to polimeri ojačani staklenim vlaknima (slika 2.3) iz jednostavnog razloga: mogu se izrađivati i krojiti u raznim oblicima i dimenzijama, male su gustoće i cjenovno pristupačni. Na taj način se dobiva iznimno dobra kvaliteta površine te željena svojstva.[2]

Kod korištenja metala kao materijala kore dobivaju se izotropna svojstva dok kod kora u obliku laminata svojstva postaju anizotropna. No, obično su laminati simetrični i uravnoteženi – isti broj slojeva slaganih pod pozitivnim i negativnim kutovima – što pojednostavljuje njihovu mehaničku analizu. Bitno je napomenuti da mehanička svojstva kora od laminata kompozita ojačanih vlaknima uvelike ovisi o tipu vlakana, orijentaciji pojedinih slojeva i volumnom udjelu vlakna u matrici. Još jedan značajan konstituent koji utječe na mehanička svojstva kompozitnih kora jest materijal matrice. U najviše slučajeva materijal matrice je neka vrsta duromerne smole poput epoksidne smole, poliestera ili vinil estera koji su znatno manje kruti i čvrsti od vlakana s kojima

čine kompozitnu koru. Iako, u kompozitima visokog volumnog udjela vlakana, utjecaj materijala matrice na mehanička svojstva zanemarivo je malen.[3]



Slika 2.3 Oblici staklenog vlakna: a) isječene niti, b)kontinuirane niti, c) roving, d) tkanina [4]

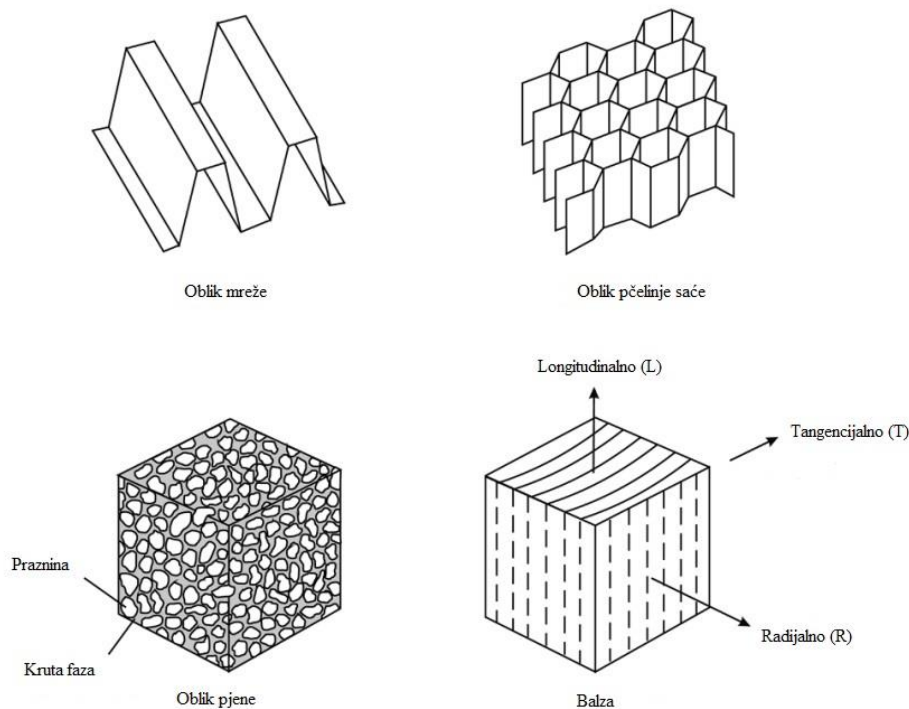
Kore sendvič kompozita dobivenog za ispitivanje sačinjene su od staklenim vlaknima ojačanog poliestera. Točnije, radi se o isječenim staklenim vlaknima u roving obliku koja ispunjavaju funkciju ojačala polimerne matrice kompozita, poliesterske smole. Roving oblik staklenog vlakna zapravo je istosmjerni snop određenog broja niti vlakna, a svrha takve proizvodnje jest poboljšanje rastezних svojstava. Komercijalno dostupni oblici opisanog staklenog vlakna najčešće su tkanja povezana emulzijom ili prahom (slika 2.4). Kvantitativna karakteristika koja se koristi za opis tkanja jest masa u površini (g/m^2).[4][5]



Slika 2.4 Tkanje staklenog vlakna [6]

2.2. Jezgra

Jezgre sendvič kompozita podijeljene su na mrežaste i saćaste jezgre, pjene i jezgre od balze. Bitno je istaknuti kako su najvažnija svojstva koja jezgra mora posjedovati smična krutost i smična čvrstoća. Nekad nije moguće, a ni od velike važnosti ispitivati samo jezgru bez prisutnosti kora budući da kore stabiliziraju jezgru, posebno kod mrežasto i saćasto strukturirane jezgre. Također, krutost mrežastih jezgara izuzetno je ovisna o geometriji i materijalu mreže te je iz tih razloga, vrlo teško navesti svojstva takvih jezgara (slika 2.5).[3]



Slika 2.5 Oblici jezgre sendvič kompozita [3]

Do nastanka sačastih struktura došlo je repliciranjem uzorka pčelinjih saća. Takva struktura omogućava visoku otpornost na pritisna i smična opterećenja uz minimalan prirast mase. Svojstva takvog sendviča ovise o veličini i rasporedu ćelija, debljini stijenki saća i o svojstvima materijala od kojih se izrađuju saće. Mehanička svojstva drukčija su u dva okomita smjera iste ravnine. Tome je tako radi strukture s dvostrukom stijenkom u jednom smjeru i jednostrukom u drugom. Takve jezgre mogu biti debljine od 3 do 50 mm. Za materijal saća nema jasnih ograničenja. Koristi se papir, polimeri i polimerni kompoziti te aluminij i njegove legure. Najviše se primjenjuje kompozit aramidnog vlakna impregniranog polimernom smolom (najčešće fenolnom) ili neka aluminijeva legura [3].

Polimerna saća uglavnom su od akrilonitril butadien stirena (ABS), polikarbonata (PC), polipropilena (PP) ili polietilen (PE). Aluminijska saća vodeća su sa svojom specifičnom čvrstoćom među materijalima za izradu sendviča. Niska cijena i dobra čvrstoća glavni su razlozi primjene ovog materijala.[2]

Pjene su vrlo učestali oblik materijala jezgre sendviča koji se sastoji od trodimenzionalnih ćelija. Najčešće korištene su polimerne pjene, ali postoji veliki interes i za metalne pjene kao i ugljične[3].

Mogu biti sačinjene od raznovrsnih polimera kao što su poli(vinil-klorid) (PVC), polistiren (PS), poliuretan (PU) i slični. Gustoća im se kreće od 30 kg/m^3 do 300 kg/m^3 . Dostupne debljine pjena su od 5 do 50 mm.[2]

Metalne pjene relativno su novi materijal koji se koristi i u sendvičima. Najviše se dobivaju od aluminijske i njegovih legura. Osim toga, prema potrebi mogu se iskoristiti i cink, bronca, čelik, nikel ili titanij. Metalne pjene karakteriziraju niska gustoća i time masa, visoka krutost, dobra izolacijska svojstva, negorivost i dobra udarna žilavost.[2]

Zbog svojih povoljnih mehaničkih svojstava uz vrlo nisku gustoću i strukturu zatvorenih ćelija, drvo balze također se koristi kao jezgra u sendvič kompozitima. U balzinom drvetu vlakna se protežu u longitudinalnom smjeru što rezultira anizotropnim svojstvima. Posljedično, vrijednosti čvrstoće i krutosti znatno su veće u longitudinalnom smjeru nego u radijalnom ili tangencijalnom. Kao jezgra sendviča, balza se isporučuje u željenoj debljini u elementima kockastog oblika. Kocke su u sendviču nasumično orijentirane čime se dobivaju izotropna svojstva jezgre kompozita. Jezgre od balza drveta dostupne su u gustoćama, između 100 i 300 kg/m^3 . [3]

PVC pjena jedna je od najraširenijih jezgara za sendvič konstrukcije. Uravnoteženih statičkih i dinamičkih svojstava i niske apsorpcije vode. K tome je upotrebljiva u velikom temperaturnom rasponu (od $-240 \text{ }^\circ\text{C}$ do $80 \text{ }^\circ\text{C}$) i kemijski je postojana. Radi svoje neosjetljivosti na stiren može se sigurno upotrijebiti kao jezgra sendviča s korama od poliesterske smole koje sadrže stiren. [8]

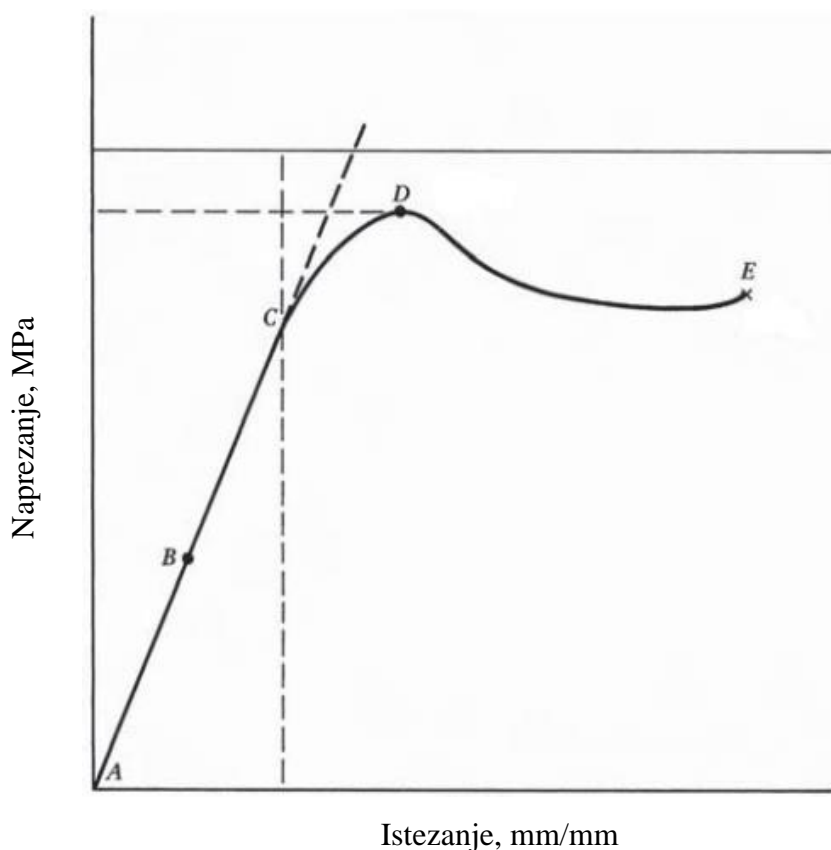
One su u pravilu mekane i vrlo niske gustoće što je i jedan od zahtjeva za jezgre sendviča. To se postiže namjerno induciranom poroznošću polimera kroz proizvodne procese poput mehaničkog pobuđivanja i upuhivanja nekog plina pod tlakom u rastaljeni polimer. Također je moguće umiješavanje pjenila u granulatu te zagrijavanje mješavine pri čemu se oslobađa CO_2 . Tako se dobivaju sitni mjehurići u rastaljenom polimeru koji se nakon očvršćivanja nazivaju ćelijama. Te ćelije mogu biti otvorene ili zatvorene, ekvialne ili izdužene. [1][7]

3. MEHANIČKA SVOJSTVA I ISPITIVANJE SENDVIČ KONTRUKCIJA

3.1. Uobičajena ispitivanja

3.1.1. Rastezna svojstva

Rastezna čvrstoća smatra se jednim od, ako ne i najvažnijim, kvalitativnim faktorom materijala. Iz tog razloga je uobičajeno da se u dokumentaciji taj podatak pojavljuje među prvima, a određuje se rasteznim ispitivanjem. Rastezno ispitivanje je mjerenje sposobnosti materijala da se odupre silama koje izazivaju deformaciju i puknuće. Mjerenjem se bilježi sila u ovisnosti o produljenju do puknuća te se u ovisnosti o dimenzijama ispitnih tijela određuje naprezanje i deformacija (slika 3.1). Uređaj na kojem se odvija rastezno ispitivanje zove se kidalica. Sastoji se od pokretne i nepomične čeljusti u koje se pričvršćuje ispitno tijelo koje se rastezno opterećuje (najčešće pomoću hidrauličkog pogona).[8]



Slika 3.1 Dijagram ovisnosti naprezanja o istezanju [8]

Na slici 3.1 točkama su označena karakteristična područja krivulje naprezanje-istezanje. Na području između točke A i C deformacija je u elastičnom području što znači da je naprezanje

proporcionalno istezanju i deformacija je reverzibilna, to jest nakon rasterećenja tijelo poprima početne dimenzije. U točki C završava područje proporcionalnosti naprezanja i istezanja dok u točki D više nema prirasta naprezanja uz rast istezanja. Deformacija od D nadalje je plastična, a završava točkom E gdje nastupa lom.[8]

Ploče sendviča teško je rastezno ispitati u ravnini ploče. Radi nejednolikih svojstava po poprečnom presjeku koji su posljedica heterogene konstrukcije, osim prihvata, kompleksno je odrediti distribuciju naprezanja po presjeku. Međutim, pomoću prikladnih steznih čeljusti sendvič se može opteretiti okomito na njegovu longitudinalnu os (slika 3.2). Takvim ispitivanjem dobivaju se podaci o jačini veze između kora i jezgre sendviča.[9]

Osim rasteznog ispitivanja cijelog sendviča, moguće je rasteznom ispitivanju podvrgnuti samo koru sendviča i tako dobiti rasteznu čvrstoću vanjskih slojeva.



Slika 3.2 Rastezno ispitivanje sendviča okomito na slojeve ojačanja [10]

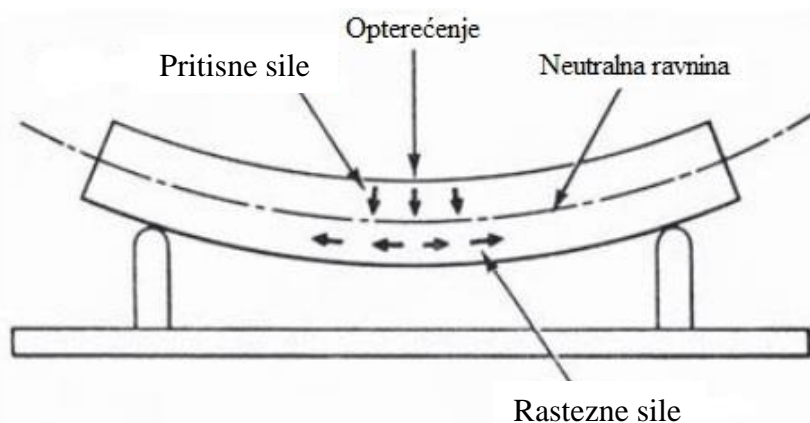
3.1.2. Pritisna svojstva

Pritisna svojstva materijala definirana su njegovom otpornošću pritiskom opterećenju. Drugim riječima, element je podvrgnut sporom pritiskom opterećenju jednolikog prirasta i promatra se njegovo ponašanje uslijed istog. Kidalica, osim za rastezno, može poslužiti i za pritisno ispitivanje. Iako postoje mnogi primjeri u eksploataciji gdje je materijal opterećen pritiskim silama, ipak je svojstvo pritiskne čvrstoće malog značenja zbog raznih vanjskih utjecaja poput temperature i brzine opterećenja i zato se rijetko uzima u obzir kod konstrukcije dijelova.[8]

Sendviči se na pritisno opterećenje mogu ispitati u ravnini ili okomito na ravninu kora (bočno). Funkcionalna razlika isključivo je u položaju ispitnog elementa u čeljustima kidalice.

3.1.3. Savojna svojstva

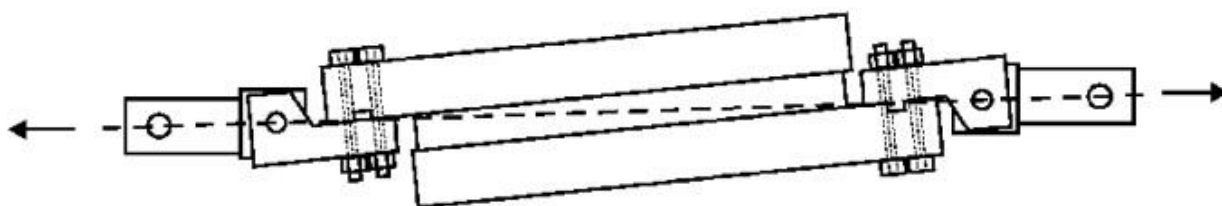
Savojno ispitivanje provodi se kako bi se dobile informacije o reakciji materijala na savojno opterećenje te je iz tog razloga od velikog značenja konstruktorima kao i proizvođačima samog materijala. Savojna čvrstoća je sposobnost materijala da se odupre silama koje djeluju u sredini ispitnog tijela okomito na njegov longitudinalni smjer pružanja i tako ga nastoji saviti. Dva su karakteristična načina ispitivanja: ispitivanje u tri točke i ispitivanje u četiri točke. Polimeri i polimerni kompoziti se u pravilu ispituju u tri točke, dok se ispitivanje u četiri točke primjenjuje kod materijala koji se vrlo malo deformiraju poput keramike. Naprezanja koja su prisutna kod savojnog opterećenja kombinacija su pritiskog i rasteznog opterećenja. Ispod neutralne ravnine koja se nalazi u blizini središnje ravnine, u materijalu dolazi do rasteznog naprezanja jer se donji dio nastoji proširiti, dok u gornjem dijelu nastaje pritisno što znači da ga se nastoji stisnuti (slika 3.3). Međutim, kod sendviča je moguće pomoću savojnog ispitivanja osim podataka o savijanju cijelog sendviča dobiti i podatke o jezgri i vezivna svojstva između kora i jezgre. Takvi specifični izračuni izvode se prema odgovarajućim normama.[8]



Slika 3.3 Sile u ispitnom tijelu kod savojnog ispitivanja [8]

3.1.4. Smična svojstva

Kako je već detaljnije pojašnjeno u odlomku 2.2., jezgra je onaj element sendviča koji preuzima smična opterećenja te su zato od velike važnosti smična svojstva jezgre. Zato je vrlo korisno ispitati sendvič konstrukciju smično. Ispitivanje je moguće provesti na cijelom sendviču, iako je bolje ispitati samostalnu jezgru (slika 3.4). Kod ispitivanja cijelog sendviča može doći do popuštanja vezivnog sredstva između kora i jezgre i tako ugroziti rezultate ispitivanja.



Slika 3.4 Čeljusti za smično ispitivanje sendviča/jezgre [3]

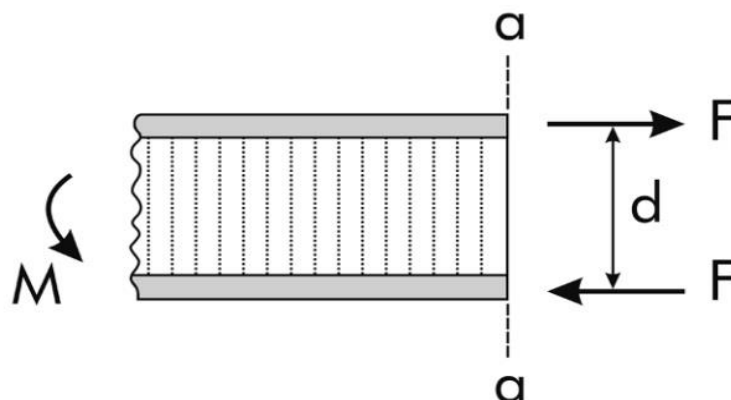
3.2. Mehanika – opterećenje sendviča[3]

Za izbor odgovarajućih materijala kora i jezgre važno je poznavanje i razumijevanje mehanike sendvič struktura. U tu svrhu teorijski su opisani uobičajeni slučajevi opterećenja i popuštanja sendviča. Razumijevanje individualnih uloga kora i jezgre u osiguravanju krutosti i čvrstoće u sendviču, konstruktoru omogućuje odabir materijala koji će zadovoljavati uvjete mase i pouzdanosti strukture. Iako se sendvič konstrukcije u eksploataciji gotovo isključivo u obliku ravne ili zakrivljene ploče, ispitna tijela su u obliku kvadra.

3.2.1. Naprezanja u korama i jezgri¹

Općenito su materijali jezgre popustljivi i nemaju velik doprinos savojnoj krutosti sendviča. Pošto je obično kora puno tanja u odnosu na debljinu jezgre, moment savijanja M uravnotežen je unutrašnjim rasteznim i pritiskim silama u korama. Za slučaj simetričnog sendviča sile su jednake.

¹ Moguće nepoklapanje oznaka s izvornom literaturom u svrhu ujednačenja svih oznaka u radu.



Slika 3.5 Moment savijanja poništen spregom sila kora [3]

Na slici 3.5 prikazan je moment pri savijanju simetričnog sendviča. Zanimare li se savojna naprezanja u jezgri, ravnoteža elementa sendviča sa slike 3.5 daje srednje savojno naprezanje u korama:

$$\sigma = \frac{M}{bdh_f} \quad (3.1)$$

gdje je b širina sendviča, a d je definiran kao udaljenost između središta kora:

$$d = h_c + h_f \quad (3.2)$$

gdje je h_c debljina jezgre, a h_f je debljina jedne kore.

Očituje se da je σ rastezno ili pozitivno u gornjoj kori i pritisno ili negativno u donjoj za prikazano opterećenje. Prema tome se zaključuje da kore moraju posjedovati dobra rastezna i pritisna svojstva za savojno opterećenje.

Ako se sendvič optereti savojnim momentom koji se mijenja duljinom ispitnog tijela, ravnotežnom analizom očituje se pojava smične sile V koja djeluje okomito na os ispitnog tijela (slika 3.6).

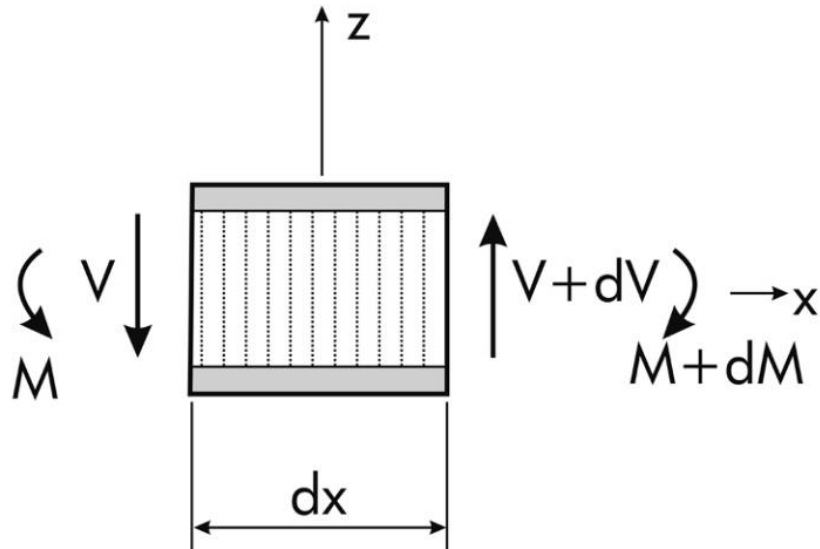
$$V = \frac{dM}{dx} \quad (3.3)$$

Prema slici 3.7 dobiva se izraz za smično naprezanje u jezgri sendviča. Horizontalna sila koja je posljedica djelovanja naprezanja σ s lijeve strane elementa je

$$F_1 = \sigma b h_f = \frac{M}{d} \quad (3.4)$$

dok je sila s desne strane elementa

$$F_2 = \frac{M + dM}{d}. \quad (3.5)$$



Slika 3.6 Pojava smične sile uslijed promjenljivog momenta po duljini ispitnog tijela [3]

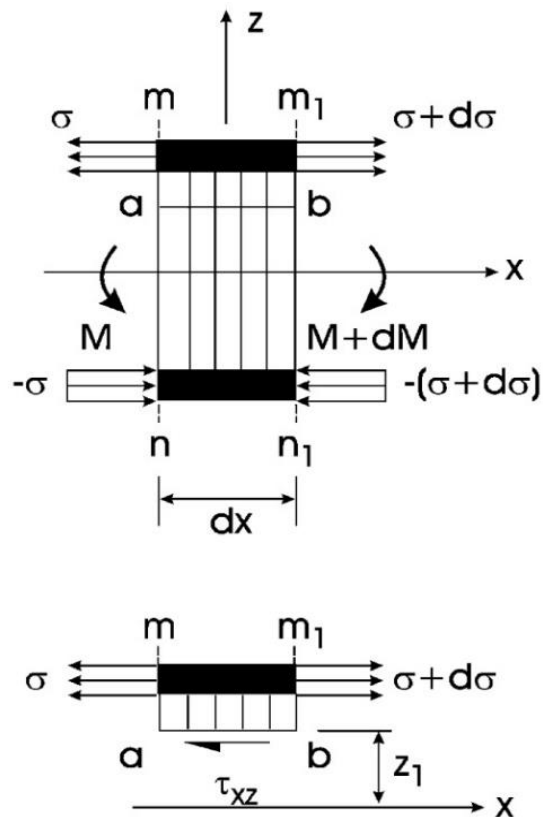
Kao posljedica smičnog naprezanja koje djeluje na površini jezgre na dijelu ab je

$$F_3 = \tau_{xz} b dx. \quad (3.6)$$

Očituje se kako je gornja površina $m-m_1$ bez smičnog naprezanja. Prema tome vrijedi

$$\tau_{xz} = \frac{dM}{dx} \frac{1}{bd} = \frac{V}{bd}. \quad (3.7)$$

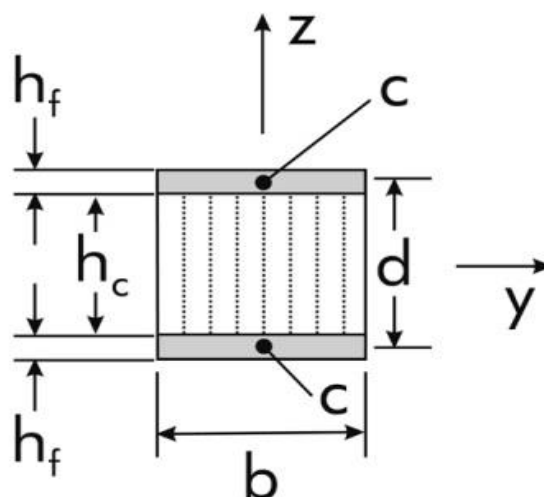
Izraz (3.7) pokazuje kako je smično naprezanje u jezgri jednoliko i neovisno o z koordinati ako se pretpostavi da su kore tanke i jezgra popustljiva. Dakle, u svrhu izbjegavanja smične deformacije kompletnog sendviča potrebno je odabrati materijal jezgre zadovoljavajućeg smičnog modula.



Slika 3.7 Elementi promatrani kod proračuna smičnog naprezanja [3]

3.2.2. Savojna krutost ispitnog tijela sendviča²

Ukupna savojna krutost $E_x I$ ispitnog tijela sendviča dobiva se iz teorema paralelnih osi gdje se izražava pomoću debljina konstituenata i modula elastičnosti.



Slika 3.8 Poprečni presjek grede sendviča [3]

² Moguće nepoklapanje oznaka s izvornom literaturom u svrhu ujednačenja svih oznaka u radu.

Kod simetričnog elementa prikazanog na slici 3.8 prema teoremu paralelnih osi dobiva se

$$E_x I = E_x^c I_c + 2E_x^f I_f \quad (3.8)$$

gdje su I_j moment tromosti jezgre i I_k moment tromosti svake kore obzirom na središnju os.

$$I_c = \frac{bh_c^3}{12} \quad (3.9)$$

$$I_f = \frac{bh_f^3}{12} + \frac{bh_f d^2}{4}. \quad (3.10)$$

Tim putem dobiva se savojna krutost ispitnog tijela sendviča u ovisnosti o širini:

$$\frac{E_x I}{b} = \frac{E_x^c h_c^3}{12} + E_x^f \left(\frac{h_f^3}{6} + \frac{h_f d^2}{2} \right), \quad (3.11)$$

pojednostavljeno:

$$D_x = E_x^f h_f d^2 \left[\frac{h_c^3}{12h_f d^2} \left(\frac{E_x^c}{E_x^f} \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{h_f}{d} \right)^2 + \frac{1}{2} \right]. \quad (3.12)$$

U jednadžbi (3.12) D_x predstavlja savojnu krutost.

Pošto se od sendvič konstrukcija osim da budu čvrste također zahtjeva i da budu lagane, kod dobivanja optimalne krutosti i gustoća se mora uzeti u obzir. Masa sendviča m , podijeljena širinom i duljinom ispitnog tijela dobiva se kao:

$$\frac{m}{bl} = 2h_f \rho_f + h_c \rho_c \quad (3.13)$$

gdje su ρ_k i ρ_j gustoće kora i jezgre sendviča. Prema tome se dobiva srednja ili efektivna gustoća sendviča:

$$\rho^{sr} = 2 \frac{h_f}{h} \rho_f + \frac{h_c}{h} \rho_c \quad (3.14)$$

gdje je h cjelokupna debljina ispitnog tijela sendviča:

$$h = 2h_f + h_c. \quad (3.15)$$

S porastom omjera debljine jezgre i debljina kora snižava se vrijednost gustoće, a time i savojna krutost sendviča. Doprinos jezgre savojnoj krutosti sendviča prikazan je prvim izrazom u uglatim zagradama u jednadžbi (3.12). Zbog modula elastičnosti koji je malen u odnosu na modul kora sendviča doprinos jezgre relativno je malen te se zbog toga zanemaruje. Drugi član bi imao značajan doprinos kada bi se koristile debele kore kod konstrukcije sendviča. Međutim, radi zadovoljavanja uvjeta minimalnog prirasta mase i on se otpisuje. Ovako se ustanovljuje granica odnosa debljina jezgre i debljina kora:

$$\frac{h_c}{h_f} \geq 5,35. \quad (3.16)$$

Kore su tanke u slučaju kada je ispunjen uvjet iz (3.16), čime izraz za savojnu krutost poprima oblik:

$$D_x = \frac{E_x^f h_f d^2}{2}. \quad (3.17)$$

Ovim izrazom ističu se najvažniji faktori koji uzajamno ostvaruju visoku savojnu krutost, a to su visoki modul elastičnosti kora (E_x^f) i velika udaljenost među središnjim osima kora (d). U slučaju kad ne postoji nužan zahtjev minimalne mase, bolje je upotrijebiti deblje kore. Međutim, jedan od glavnih razloga primjene sendvič konstrukcija upravo je visoka čvrstoća uz mali prirast mase. Prema tome, optimalna primjena sendviča je uz tanke kore visokog modula elastičnosti i jezgre niske gustoće.

4. NORME ZA ISPITIVANJE SENDVIČ KONSTRUKCIJA

Kako bi ispitivanja mogla biti usporediva između različitih laboratorija i univerzalna u komercijalnoj upotrebi, postoje preporučena pravila i uvjeti pod kojima se ispitivanja provode. Ta pravila i uvjeti jednom riječju nazivaju se norme. Norme su utemeljile organizacija poput ASTM (e. American Society for Testing and Materials), ISO (e. International Organization for Standardization), DIN (njem. Deutsches Institut für Normung) i ostale.[11]

Stoga se norme koriste i kod ispitivanja mehaničkih svojstva materijala. U nastavku su opisane norme za ispitivanje sendvič konstrukcija.

4.1. ASTM C297 – plošna rastezna čvrstoća sendvič konstrukcija [9]

Kod sendvič konstrukcije ključna je povezanost između kora i jezgre kako bi se održala stabilnost kora i ravnomjeran prijenos opterećenja s kora na jezgru. Ova norma može se iskoristiti za dobivanje podataka o čvrstoći i kvaliteti povezanosti kora s jezgrom. Veličine koje se dobivaju su plošna rastezna čvrstoća jezgre, vezivnog materijala sendviča ili samih kora. Ispitivanje nije ograničeno oblikom jezgre. Može se ispitivati jezgra s kontinuiranom vezivnom površinom (balza ili pjene) kao i s diskontinuiranom (saće). Takvo ispitivanje vidljivo je na slici 3.2.

4.1. ASTM C364 – pritisna čvrstoća sendvič konstrukcije opterećenjem paralelnim s ravninom kora [12]

Ovom normom opisuje se ispitivanje koje nam daje bočnu tlačnu čvrstoću sendviča u svrhe konstruiranja, istraživanja, razvoja i osiguravanja kvalitete. Provodi se obrnuto nego što je prikazano na slici 3.2. Čeljusti osiguravaju sendvič bočno i ispitno tijelo se tlačno opterećuje na kidalici. Moguće je ispitivati kontinuirano i diskontinuirano povezane jezgre.

4.2. ASTM C365 – plošna pritisna čvrstoća jezgre sendviča [13]

U ovom ispitivanju dobivaju se podaci o deformiranju uslijed opterećenja te se računa pritisno naprezanje iz odgovarajuće sile raspoređene na površinu. Ova norma najčešće se koristi za kompozite u zrakoplovnoj industriji. Ispitivanje izgleda isto kao na slici 3.2, samo je suprotan smjer opterećenja.

4.3. ASTM C273 – smična svojstva jezgre sendvič kompozita [14]

Smična svojstva jezgre temeljna su svojstva kod konstruiranja sendvič kompozita. Ovom metodom izučava se ponašanje sendviča ili jezgre pri opterećenju paralelnom s ravninom kora. Konstruira se krivulja sila-progib, a iz sila se računaju karakteristična naprezanja dok se smični modul dobiva iz dijagrama naprezanje-deformacija. Smična svojstva jezgre moguće je dobiti i normom C393. Međutim, točniji su rezultati primjenom norme ASTM C273, čije je provođenje prikazano na slici 4.1, uz uvjet da se ispituje samo jezgra bez kora.

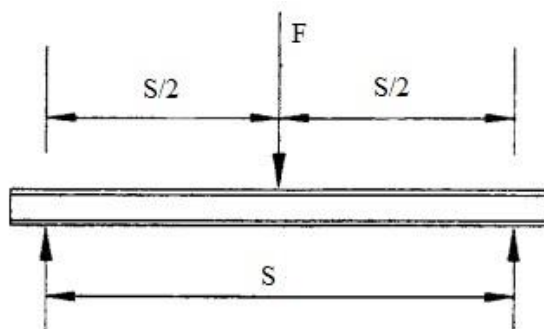


Slika 4.1 Ispitivanje jezgre sendviča prema ASTM C273 [3]

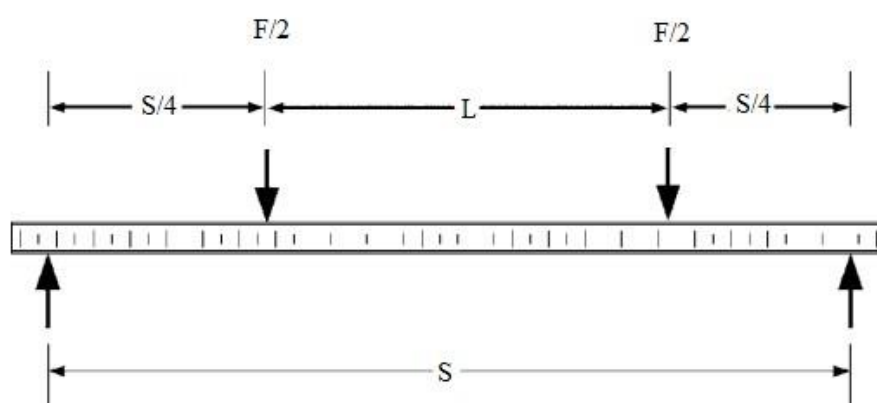
4.4. ASTM C393 – ispitivanje smičnih svojstava jezgre savijanjem ispitnog tijela sendviča [15]

Ovom normom dobivaju se smična svojstva jezgre sendvič konstrukcije podvrgnute savijanju tako što primijenjeni momenti uzrokuju savijanje kora. Oblici jezgre koje se može ispitati ovom normom uključuju one sa kontinuiranom vezom (balza i pjene) kao i diskontinuiranom (pčelinje saće). Moment savijanja primjenjuje se bočno, a mjeri se sila u odnosu na progib. Prihvatljivi oblici popuštanja su isključivo smično popuštanje jezgre ili popuštanje veziva između kora i jezgre. Rezultat kada popušta kora prije navedenih dvaju oblika se odbacuje. Veličine koje je moguće dobiti pomoću ove norme uključuju savojnu krutost sendviča, smičnu čvrstoću i modul jezgre i pritisnu ili rasteznu čvrstoću kore (iako se rastezna čvrstoća kore u najčešće dobiva drugim

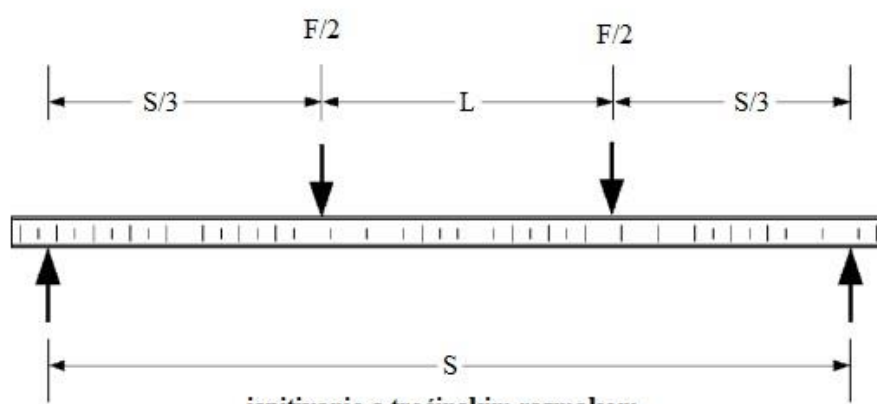
odgovarajućim normama). Rezultati se mogu primijeniti u svrhu konstruiranja, karakterizacije materijala, istraživanja i razvoja te kao sredstvo kontroliranja kvalitete gotovih sendvič ploča. Najčešći uzroci narušavanja preciznosti rezultata su loši uvjeti izrade sendviča, ali i oblikovanja ispitnih tijela. U tim se slučajevima potkradaju greške u jezgri koje nepovoljno djeluju na gustoću jezgre. Te greške pojavljuju se u obliku šupljina i sličnih diskontinuiteta, van-ravninskih zakrivljenja i hrapavost površine. Kod izrezivanja ispitnih tijela potrebno je paziti da se ne naruši strukturni integritet samog kompozita te da se ne stvore lokalni koncentratori naprezanja (zarezi, greške na površini). Ispitno tijelo se pozicionira na dva potporna oslonca i opterećuje s jednim ili dva trna, ovisno o konfiguraciji. Razlikujemo standardnu i nestandardnu konfiguraciju (slika 4.2). Standardna konfiguracija podrazumijeva opterećenje ispitnog tijela između tri oslonca gdje je razmak među dva potporna oslonca 150 mm i trn za opterećenje djeluje okomito na tijelo točno između njih. Nestandardna konfiguracija je bilo koji drugi raspored oslonaca koji odstupa od standardnog. Primjenjuju se radi kontinuiteta s prošlim inačicama ove norme, u slučajevima gdje je potrebno odstupanje od standardne konfiguracije radi postizanja prihvatljivog mehanizma popuštanja sendviča ili za dobivanje podataka opterećenja u ovisnosti o deformaciji za potrebe norme D7250/D7250M (savojna i smična krutost ispitnog tijela).



a) ispitivanje standardnom konfiguracijom



ispitivanje s četvrtinskim razmakom



ispitivanje s trećinskim razmakom

b) ispitivanja nestandardnom konfiguracijom

Slika 4.2 Ispitne konfiguracije [15]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom radu bilo je potrebno ispitati sendvič konstrukcije i odrediti njihova mehanička svojstva kao i svojstva njihovih kora i jezgara. Sendviči su izrađeni u tvrtki Špigula d.o.o. u Splitu. Kore su izrađene od poliestera ojačanog staklenim vlaknima dok ulogu jezgre obnaša mekana polimerna pjena. Sendviči su ispitani savojnim opterećenjem, dok su kore zasebno ispitane rastezno. Primjenom normi HRN ISO 527 – 4 i ASTM C393 dobivena su mehanička svojstva kora, jezgara i sendvič konstrukcija. Na kraju je preostalo uz izračunate vrijednosti mehaničkih svojstava i prethodno izrađen računalni alat usporediti svojstva sendviča obzirom na dimenzije njihovih kora i jezgara.

5.1. Materijali jezgre i kora

Ispitana su dva sendviča (slika 5.4) načinjena od ekspanzirane PVC jezgre i kora od poliestera ojačanog staklenim vlaknima. Jezgre sendviča razlikuju se prvenstveno po debljini, dok se kore razlikuju po debljini i sadržaju vlakana. Tanji sendvič sastoji se od tanje jezgre i tanjih kora. Tanje kore imaju 2,2% veći udio vlakana u odnosu na kore debljeg sendviča.

5.1.1. Polimer ojačan staklenim vlaknom

Matrica koju ojačavaju opisana staklena vlakna je poliesterska smola na bazi ortoftalne kiseline. Radi se o poliesterskoj smoli za naštrcavanje koja pri izradi kompozita ima nisku emisiju stirena. Karakterizira je brzo očvršćivanje te se zato često koristi kao materijal za naštrcavanje za potrebe brzog kalupljenja pri čemu ne gubi na međuslojnoj adheziji. Prije izrade kompozita smolu je potrebno držati pri okolišnoj temperaturi dok se ne izjednače temperature, a potom u smolu umiješati 1 do 2% masenog udjela katalizatora. Vrijeme početka očvršćivanja ovisi o udjelu katalizatora i temperaturi, a prikazano je u tablici 5.1.[16]

Tablica 5.1 Vrijeme do početka očvršćivanja poliesterske smole u minutama ovisno o temperaturi i katalizatoru [16]

		Količina katalizatora u odnosu na smolu	
		1%	2%
Temperatura	15 °C	62	41
	20 °C	39	29
	25 °C	25	20

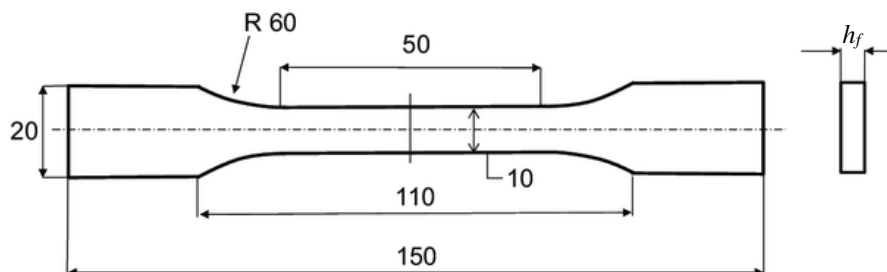
Ispravan tijek očvršćivanja poliesterske smole uvjetovan je pravilnim temperaturno – vremenskim režimima, a to je obično pri 20 °C prvih 24 sata i nakon toga u peći pri 80 °C još 3 sata. Na taj način dobiva se u potpunosti očvrsnuta smola čija svojstva su prikazana u tablici 5.2.[16]

Tablica 5.2 Svojstva potpuno očvrsnute neojačane poliesterske smole [16]

Svojstvo	Kvantitativna vrijednost	Mjerna jedinica
Barcol tvrdoća	42	
Temperatura savijanja pod opterećenjem 1,80 MPa	67	°C
Apsorpcija vode tijekom 24 sata na 23 °C	15	mg
Rastezna čvrstoća	50	MPa
Modul elastičnosti	3800	MPa
Produljenje kod loma	1,5	%
Volumno skupljanje pri polimerizaciji	8,3	%

Komercijalno ime smole koja čini matricu staklenim vlaknima ojačanog kompozita jest Crystic® 2-446PA proizvođača Scott Bader d.o.o. iz Zagreba. Maseni udio vlakana određen je žarenjem kompozita pri 600 °C tijekom 4 sata, pri čemu dolazi do razgradnje polimera i ostaju samo vlakna. Vaganjem preostalih vlakana i usporedbom s masom prije žarenja dobiven je maseni udio vlakana deblje kore koji iznosi 33,12 % dok za tanju koru iznosi 35,30 %.

Ispitno tijelo propisano normom prikazano je na slici 5.1.



Slika 5.1 Ispitno tijelo 1B [17]

5.1.2. Polimerna pjena

Jezgra dobivenog sendvič kompozita je Termanto PVC ekspanzirana pjena. Iako se radi o kemijskom hibridu poli(vinil – klorida) i poliuretana, radi jednostavnosti nazivaju se PVC pjenama. Termanto pjena komercijalni je naziv pjene proizvođača Prochima srl iz Italije koju karakteriziraju zatvorene ćelije i umrežena molekulska struktura koji uzajamno ostvaruju dobra mehanička svojstva, tvrdoću i visoku krutost sendviča u kojem služi kao jezgra. Isto tako, manje su podložne omekšavanju i puzanju pri višim temperaturama. Najviše se primjenjuje u brodogradnji.[8]

5.2. Ispitivanje mehaničkih svojstava sendvič konstrukcije

U radu su ispitana rastezna svojstva kora sendviča kao i smična svojstva jezgre i krutost sendviča.

5.2.1. Rastezno ispitivanje kora

U svrhu dobivanja rastezne čvrstoće provedeno je rastezno ispitivanje kora sendviča. Dobivene su dvije kore od kojih svaka odgovara jednom dobivenom sendviču te se razlikuju po debljini. Od svake od njih izrezano je i označeno šest ispitnih tijela. Radi mogućih grešaka i diskontinuiteta u ispitnim tijelima pri određivanju svojstava računa se prosjek. Standardnom devijacijom dobivaju se informacije o rasipanju podataka. Ispitivanje je provedeno prema normi HRN EN ISO 527 – 4 Plastika – Određivanje rastezних svojstava – 4. dio: Uvjeti ispitivanja izotropnih i ortotropnih plastičnih kompozita ojačanih vlaknima . Cijela ISO 527 norma služi kao smjernica za određivanje rastezних svojstava polimera i polimernih kompozita, dok postoji više varijanti norme s obzirom na specifični materijal koji se ispituje. U ovom slučaju ispituje se prema inačici 4 (527 – 4) namijenjene ispitivanju izotropnih i ortotropnih plastičnih kompozita ojačanih vlaknima.[18]

Uzorak od šest ispitnih tijela prikazan je na slici 5.2. Potrebno je obratiti pažnju kod izrezivanja i brušenja da ne dođe do prekomjernog zagrijavanja materijala ili velikih mehaničkih oštećenja koja bi mogla djelovati kao koncentratori naprezanja. Iz tog razloga potrebno je koristiti sredstvo za hlađenje i olakšano odnošenje odvojene čestice, obično vodu. Nakon obrade uzorke je potrebno dobro osušiti kako vlaga ne bi utjecala na rezultate ispitivanja.[18]

Prema tome, za potrebe ispitivanja uzorci su izrezani dijamentnom pločom uz hlađenje vodom i potom sušeni pri sobnoj temperaturi nešto više od 24 sata.



Slika 5.2 Izrezana ispitna tijela kore sendviča

Ispitivanje je provedeno na univerzalnoj kidalici Shimadzu AGS – X koja je priključena na računalo na kojem se preko računalnog programa Trapezium X mjeri produljenje u odnosu na primijenjenu rasteznu silu. Za mjerenje produljenja korišten je nasadni ekstenzometar koji se uz cijelu konfiguraciju ispitivanja može vidjeti na slici 5.3. Prije početka ispitivanja potrebno je unijeti točne dimenzije ispitnih tijela. Točnost instrumenta kojim se mjere ispitna tijela mora biti 0,01 mm ili bolja. Nakon mjerenja uzorak se steže u čeljusti kidalice i postavlja se ekstenzometar koji mjeri produljenje ispitnog tijela tokom opterećivanja. Osim produljenja, pomoću računalnog programa Trapezium X bilježi se primijenjena sila. Brzina ispitivanja za ispitna tijela tipa 1B iznosi 2 mm/min.[18]



Slika 5.3 Opterećeno ispitno tijelo kore sendvič kompozita

5.2.2. Savojno ispitivanje ispitnog tijela sendviča

U odlomku 4.4. navodi se kako je norma ASTM C273 najprikladnija za dobivanje smičnih svojstava jezgre kompozita. Međutim, kako bi to bilo moguće potrebno je ispitivanje provesti sa samim materijalom jezgre bez kora. Samostalni materijal jezgre sendviča nije dobiven stoga je za dobivanje smičnih svojstava jezgre odabrana norma ASTM C393 u kojoj se ispitivanje provodi savijanjem ispitnog tijela sendvič konstrukcije. Uz smična svojstva jezgre istom normom dobivaju se i podaci o krutosti sendviča.[15]

Norma propisuje dimenzije ispitnog tijela sendviča za savojno ispitivanje. Ispitivanje se provodi po standardnoj konfiguraciji pa je ispitno tijelo u obliku 75 mm širokog i 200 mm dugačkog kvadra. Debljina ispitnog tijela definirana je debljinom samog sendviča. Mjerni instrument mora imati točnost $\pm 0,254$ mm za duljinu i širinu i $\pm 0,025$ mm za debljinu ispitnog tijela. Izrezivanje ispitnih tijela izvodi se slično kao i kod ispitnih tijela kora: uz obavezno korištenje sredstva za

hlađenje i odvođenje odvojene čestice te sušenje čitavog uzorka nakon obrade kako bi se izbjegle nepravilnosti koje bi djelovale kao koncentratori naprezanja.[15]



Slika 5.4 Ispitna tijela tanjeg i debljeg sendviča

Za potrebe ispitivanja pripremljeno je i označeno šest ispitnih tijela debljeg sendviča i pet tanjeg sendviča (slika 5.4). Ispitivanje se također provelo na Shimadzu AGS X kitalici uz Trapezium X računalni program. Konfiguracija opterećenja je u tri točke od kojih je razmak između dva 25 mm dugačka potporna oslonca 150 mm dok točno između njih pritisno djeluje trn opterećenja (slika 5.5). Takva konfiguracija shematski je prikazana na slici 4.2 pod a). Oslonci i trn moraju biti kruti i takve geometrije da dopuštaju slobodnu rotaciju ispitnog tijela sendviča oko njih bez pružanja dodatnog otpora. Radi sprječavanja lokalnog oštećenja uslijed koncentriranog naprezanja na osloncima i trnu koriste se gumeni jastučići. Brzina ispitivanja mora biti dostatna za uzrokovanje popuštanja ispitnog tijela sendviča unutar 3 – 6 min. Ispitivanje je provedeno brzinom 2 mm/min. Po početku ispitivanja kontinuirano se mjeri sila u odnosu na progib sve do popuštanja jezgre ili veziva između jezgre i kora.[15]



Slika 5.5 Opterećeno ispitno tijelo sendviča

5.3. Rezultati ispitivanja³

5.3.1. Rezultati rasteznog ispitivanja kora

Mehanička svojstva kora sendviča izračunata su prema izrazima iz norme HRN EN ISO 527 – 4.

Izraz za modul elastičnosti je:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (5.1)$$

gdje je σ_2 naprezanje pri istezanju ε_2 koje iznosi 0,25%. Isto tako vrijedi i za σ_1 i ε_1 , samo što ε_1 iznosi 0,05%. Vrijednosti navedenih naprezanja iščitana su iz dijagrama generiranih računalnim programom Trapezium X.

Rastezna čvrstoća dobiva se pomoću izraza 5.2:

$$\sigma_{fm} = \frac{F_{max}}{A} \quad (5.2)$$

gdje je F_{max} maksimalna rastezna sila kojom je opterećeno ispitno tijelo, dok za A vrijedi:

$$A = h_f \cdot w_f. \quad (5.3)$$

³ Moguće nepoklapanje oznaka s izvornom literaturom u svrhu ujednačenja svih oznaka u radu.

Analogno izrazu (5.2), slijedi izraz za naprezanje pri lomu:

$$\sigma_{fk} = \frac{F_k}{A}. \quad (5.4)$$

Konačno istežanje prije loma ispitnog tijela računa se:

$$\varepsilon_k = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (5.5)$$

gdje je ΔL_0 produljenje ispitnog tijela, a L_0 početna mjerna duljina ispitnog tijela.

Dimenzije ispitnih tijela kao i izmjerene sile i produljenja tanje kore prikazane su u tablici 5.3. Početna mjerna duljina ispitnog tijela L_0 iznosi 50 mm.

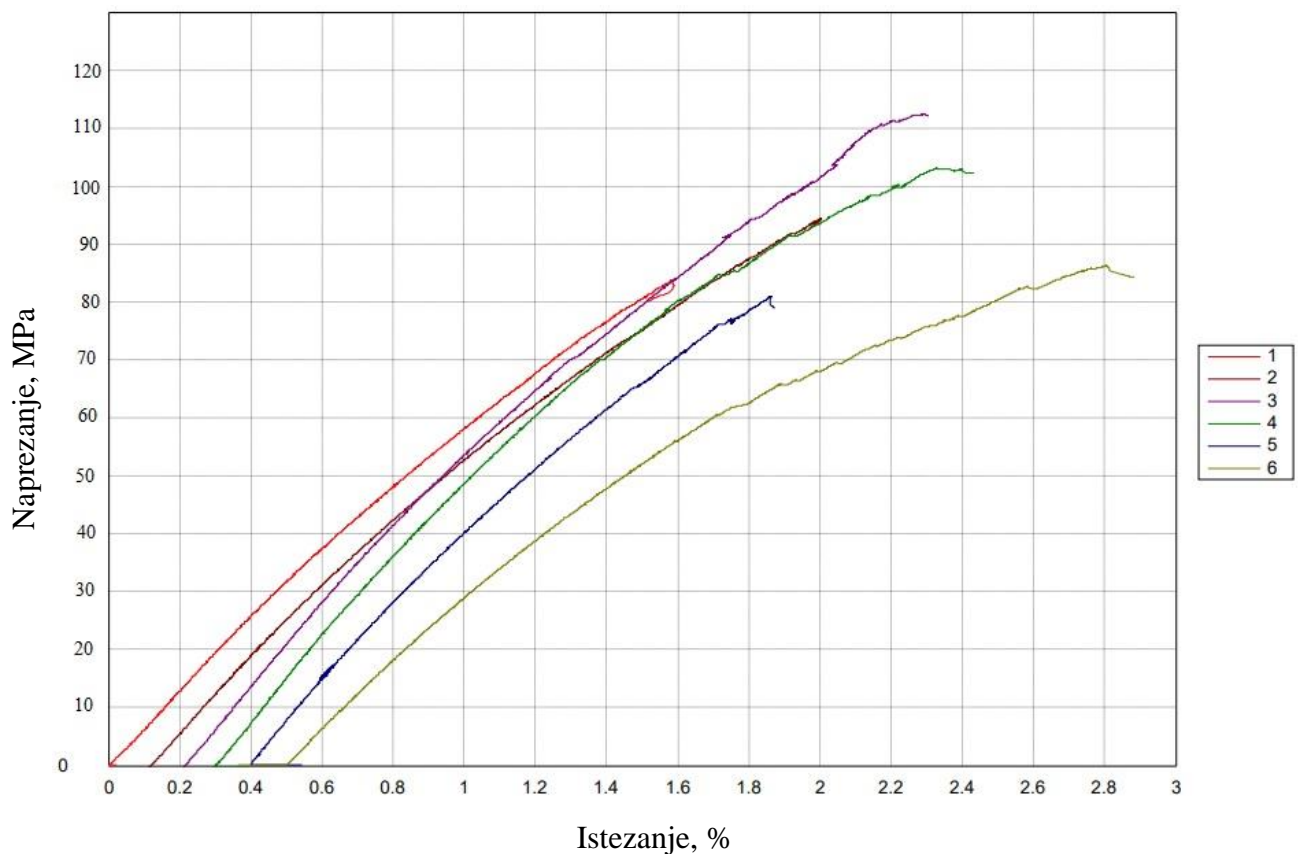
Tablica 5.3 Izmjerene vrijednosti tanje kore

Ispitno tijelo	Debljina ispitnog tijela kore h_f , mm	Širina ispitnog tijela kore w_f , mm	Maksimalna sila F_{max} , N	Sila kidanja F_k , N	Produljenje ΔL_0 , mm
1	1,76	9,74	1435,39	1372,63	0,76
2	2,12	10,40	2080,69	2039,28	0,93
3	1,98	9,58	2130,62	2124,39	1,05
4	2,08	9,54	2044,49	2026,46	1,07
5	2,20	10,26	1827,73	1781,96	0,74
6	2,16	10,06	1873,71	1833,01	1,19

Uvrštavanjem izraza iz tablice 5.3 u izraze (5.1) – (5.5) dobivaju se svojstva prikazana u tablici 5.4, dok se na slici 5.6 nalazi pripadajući dijagram naprezanje – istežanje. Vrijednosti granica razvlačenja $\sigma_{fp0,2}$ iščitane su iz dijagrama isto kao i naprezanja za računanje modula elastičnosti u izrazu (5.1).

Tablica 5.4 Izračunate vrijednosti mehaničkih svojstava tanjih kora

Ispitno tijelo	σ_1 , MPa	σ_2 , MPa	E , MPa	σ_{fm} , MPa	σ_{fk} , MPa	$\sigma_{fp0,2}$, MPa	ϵ_k , %
1	2,8	16,7	6950	83,73	80,07	12,3	1,52
2	1,7	16,3	7300	94,37	92,49	12,1	1,86
3	2,2	17,2	7500	112,33	112,00	12,2	2,1
4	3,4	18,9	7750	103,03	102,12	14,8	2,14
5	4,2	18,2	7000	80,97	78,95	14,9	1,48
6	3,0	16,1	6550	86,23	84,36	12,1	2,38
Prosječna vrijednost	2,88	17,23	7175	93,44	91,67	13,07	1,91

**Slika 5.6** Dijagram naprezanje – istezanje tanje kore

Na isti način dobivaju se svojstva deblje kore.

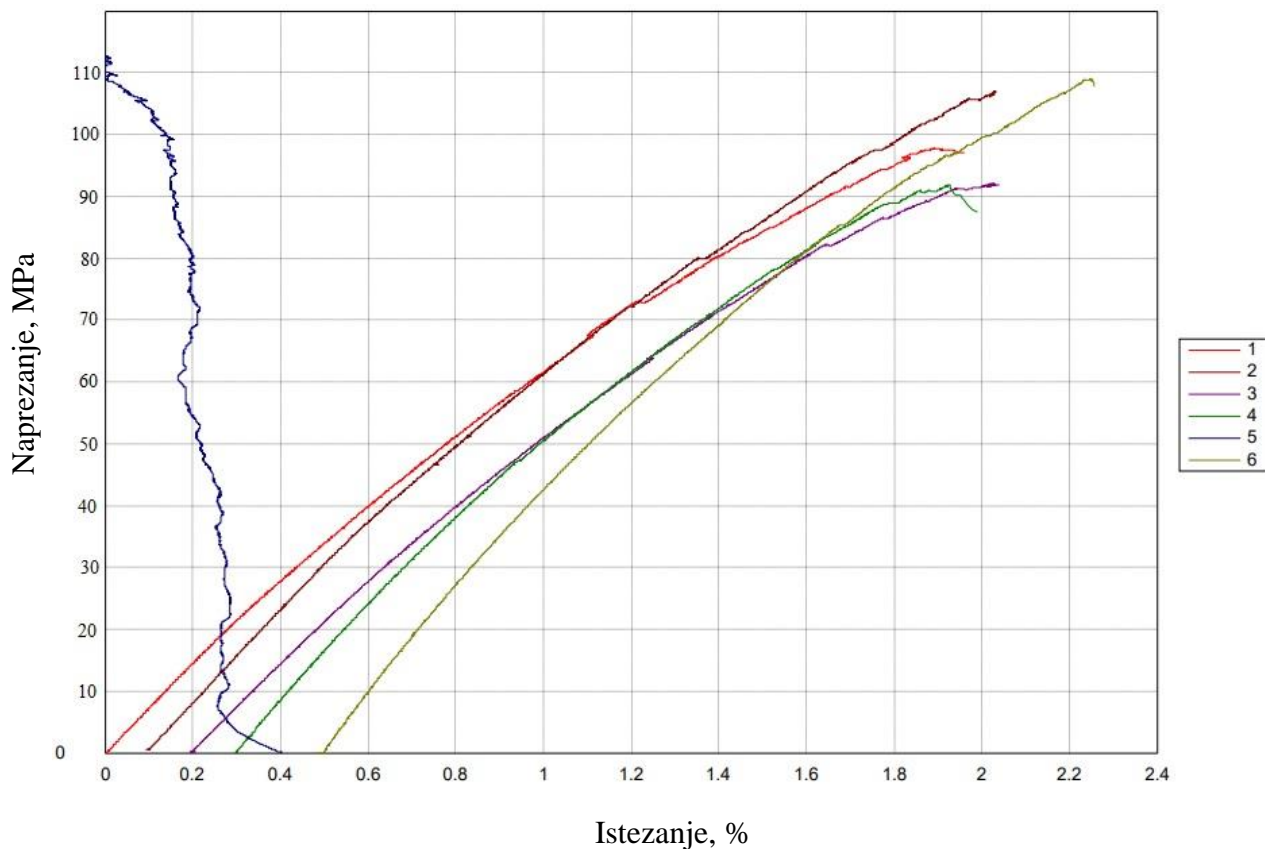
Tablica 5.5 Izmjerene vrijednosti deblje kore

Ispitno tijelo	Debljina h_f , mm	Širina w_f , mm	Maksimalna sila F_{max} , N	Sila kidanja F_k , N	Produljenje ΔL_0 , mm
1	2,34	9,72	2222,85	2206,31	0,98
2	2,40	10,10	2591,60	2569,53	0,96
3	2,58	9,88	2347,74	2341,60	0,92
4	2,50	9,80	2251,01	2139,93	0,85
5	2,22	10,04	2512,14	2491,01	-0,21
6	2,16	9,20	2165,23	2140,78	0,88

Tablica 5.6 Izračunate vrijednosti mehaničkih svojstava deblje kore

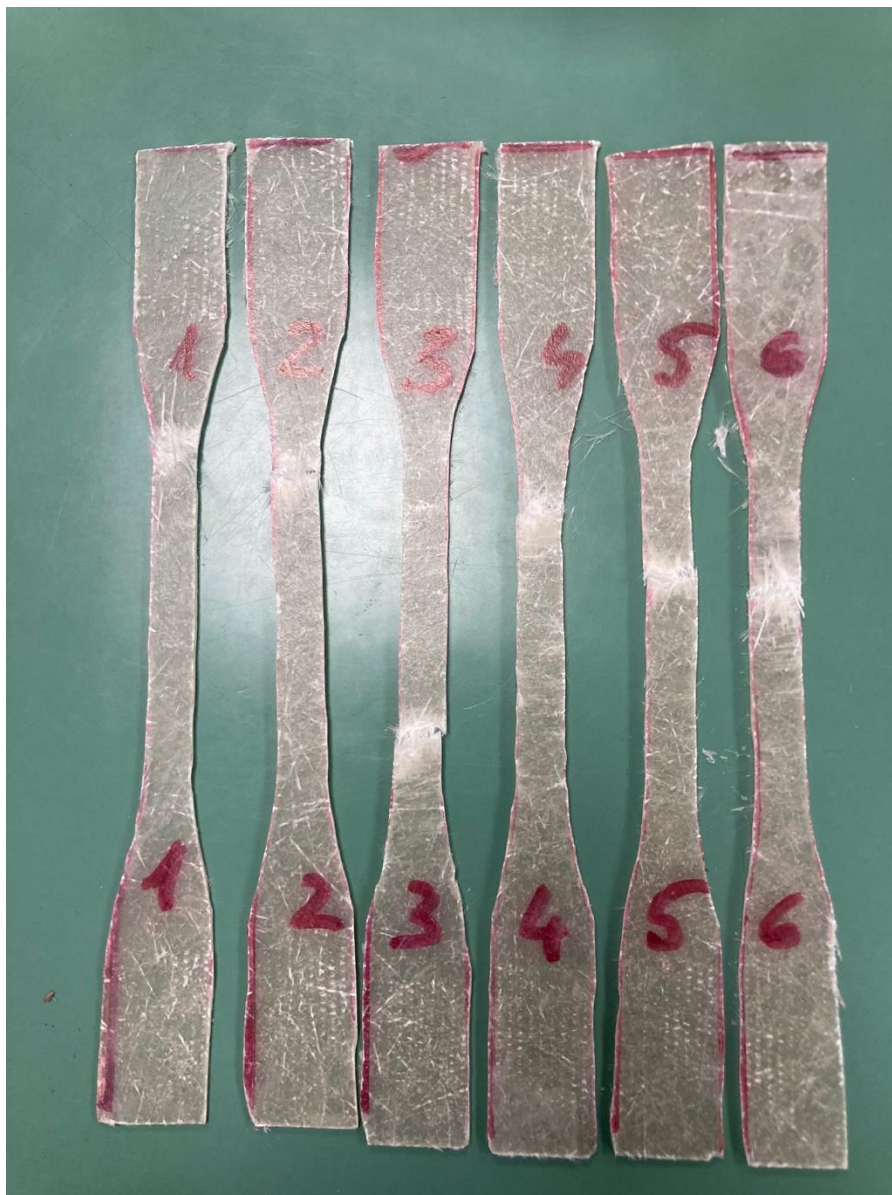
Ispitno tijelo	σ_1 , MPa	σ_2 , MPa	E , MPa	σ_{fm} , MPa	σ_{fk} , MPa	$\sigma_{fp0,2}$, MPa	ε_k , %
1	3,8	18,1	7150	97,73	97,00	13,9	1,96
2	4,3	19,3	7500	106,91	106,00	16,4	1,92
3	4,0	17,9	6950	92,10	91,86	13,9	1,84
4	4,2	20,3	8050	91,88	87,34	16,7	1,70
5	/	/	/	/	/	/	/
6	4,8	22,6	8900	108,96	107,73	18,2	1,76
Prosječna vrijednost	4,22	19,64	7710	99,52	97,99	15,82	1,84

Izmjere ispitnog tijela 5 nisu valjane što je vidljivo kod njegova produljenja u tablici 5.5 i na samom dijagramu na slici 5.7.



Slika 5.7 Dijagram naprezanje – istezanje deblje kore

Na slici 5.8 prikazane su ispitna tijela nakon ispitivanja. Važno je zamijetiti različite lokacije nastanka loma. Ispitno tijelo mora puknuti u sredini, gdje je smanjivanjem poprečnog presjeka definirano područje najvećih naprezanja. Lom može nastati na mjestu diskontinuiteta u polimernoj matrici, lokalno različitog volumnog udjela staklenog vlakna ili na mjestima površinskih nesavršenosti nastalih pri izradi kompozita (lice kore) ili pri rezanju i obradi neposredno prije ispitivanja (rubovi, bridovi).



Slika 5.8 Ispitna tijela kore sendvič kompozita nakon ispitivanja

5.3.2. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnih tijela sendviča

Izrazi za mehanička svojstva i uvjeti za izvođenje savojnog ispitivanja ispitnih tijela sendviča dani su normom ASTM C393/C393M. Slijede izrazi koji djeluju kao uvjeti za dimenzioniranje ispitnih uzoraka. Odnos debljina kora i jezgre mora zadovoljiti:

$$\frac{h_f}{h_c} \leq 0,10. \quad (5.6)$$

Razmak između potpornih oslonaca mora zadovoljiti:

$$S \leq \frac{2 \cdot k \cdot \sigma_{fm} \cdot h_f}{\tau_m} + L \quad (5.7)$$

gdje je S razmak između potpornih oslonaca, k predstavlja faktor čvrstoće kora koji osigurava popuštanje jezgre (preporučena vrijednost 0,75), L razmak između trnova za opterećivanje (u ovom slučaju 0) i τ_{cm} je procijenjena smična čvrstoća jezgre. Ovaj izraz se može i preokrenuti tako da postoji zahtjev na smičnu čvrstoću jezgre umjesto na razmak potpornih oslonaca:

$$\tau_m \leq \frac{2 \cdot k \cdot \sigma_{fm} \cdot h_f}{S - L} \quad (5.8)$$

Pritisna čvrstoća materijala jezgre mora zadovoljiti:

$$\sigma_p \geq \frac{2 \cdot (h_c + h_f) \cdot \sigma_{fm}}{(S - L) \cdot l_{pj}} \quad (5.9)$$

gdje je σ_p pritisna čvrstoća materijala jezgre, h_c je debljina jezgre i l_{pj} je širina pritisnih jastučića.

U nastavku slijede izrazi za računanje mehaničkih svojstava:

$$\tau_{cm} = \frac{F_{max}}{(h + h_c) \cdot b} \quad (5.10)$$

gdje je τ_{cm} smična čvrstoća jezgre sendviča, h debljina sendviča i b širina ispitnog tijela. Također se računa i naprezanje u korama:

$$\sigma_f = \frac{F_{max} \cdot S}{2 \cdot h_f \cdot (h + h_c) \cdot b} \quad (5.11)$$

gdje je σ_f naprezanje u korama. Dimenzije uzoraka tanjeg ispitnog tijela sendviča kao i izmjerene sile i progibi dani su u tablici 5.7. Razmak potpornih oslonaca S isti je za sve uzorke i iznosi 150 mm, kao i širina pritisnih jastučića l_{pj} koja iznosi 25 mm. U računu se koriste prosječne vrijednosti debljine kora tanjeg i debljeg sendviča. Korištene su debljine kore $h_f = 2,40$ mm za deblju koru i $h_f = 2,05$ mm za tanju. Opterećeno ispitno tijelo sendviča prikazano je na slici 5.4.

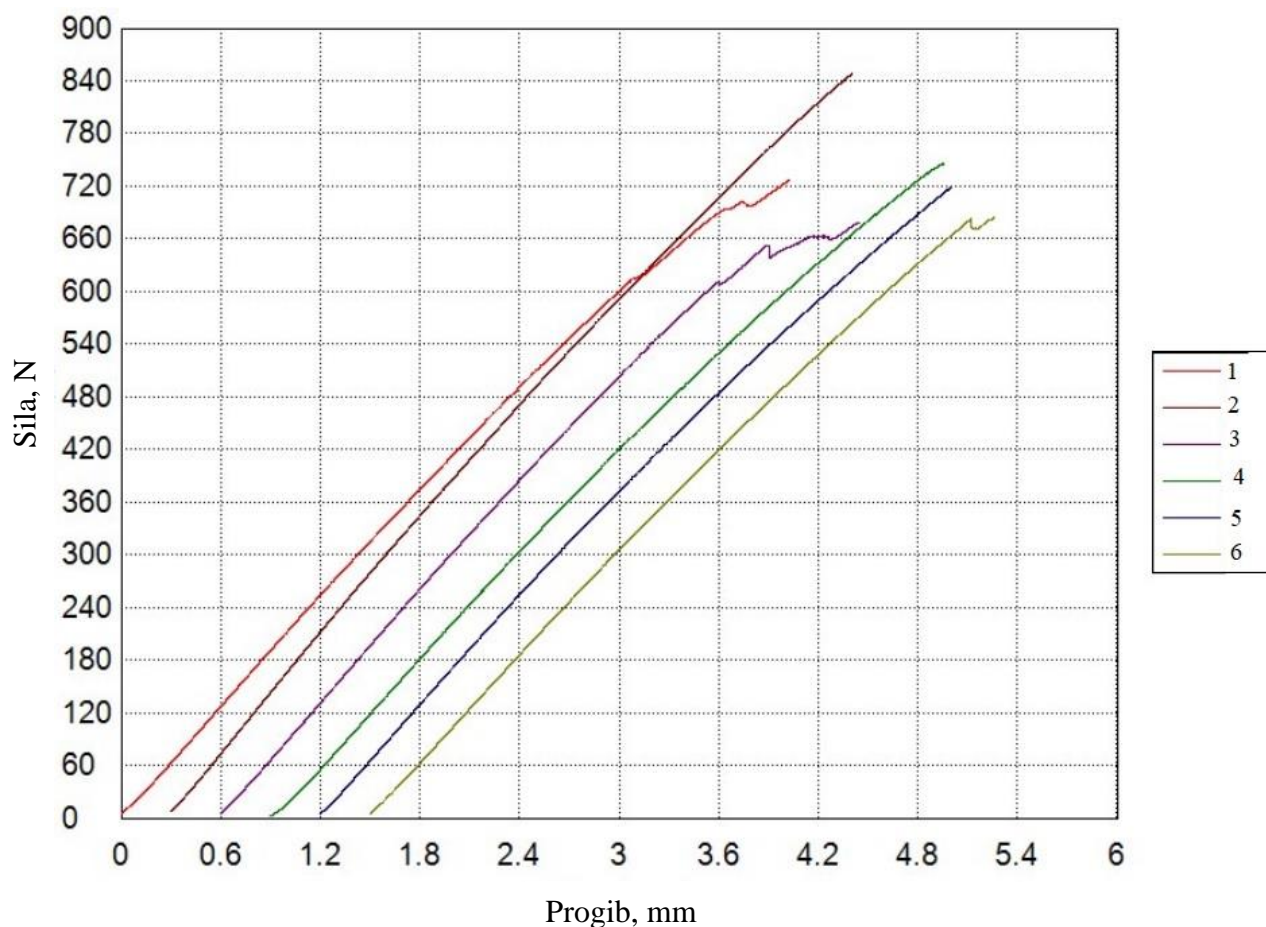
Tablica 5.7 Izmjerene vrijednosti debljeg ispitnog tijela sendviča

Ispitno tijelo	Maksimalna sila F_{max} , N	Progib f , mm	Debljina sendviča h , mm	Debljina kore h_f , mm	Debljina jezgre h_c , mm	Širina ispitnog tijela b , mm
1	726,48	4,02	24,56	2,40	19,76	71,90
2	848,26	4,10	24,26	2,40	19,46	75,34
3	678,06	3,85	24,30	2,40	19,50	74,00
4	745,26	4,05	24,82	2,40	20,02	72,12
5	719,40	3,81	24,44	2,40	19,64	74,62
6	684,15	3,76	24,87	2,40	20,07	74,80
Prosječno	733,60	3,93	24,54	2,40	19,74	73,80

Uvrštavanjem vrijednosti iz tablice 5.7 u izraze (5.10) i (5.11) dobivaju se svojstva prikazana u tablici (5.8) te slika 5.9 prikazuje pripadajući dijagram sila – progib.

Tablica 5.8 Izračunate vrijednosti mehaničkih svojstava debljeg sendviča

Ispitno tijelo	Smična čvrstoća jezgre τ_{cm} , MPa	Naprezanje u korama σ_f , Mpa
1	0,228	7,124
2	0,258	8,048
3	0,209	6,538
4	0,231	7,202
5	0,219	6,835
6	0,204	6,360
Prosječno	0,225	7,018



Slika 5.9 Dijagram sila – progib debljeg ispitnog tijela sendviča

Na isti način dobivaju se svojstva tanjeg ispitnog tijela sendviča.

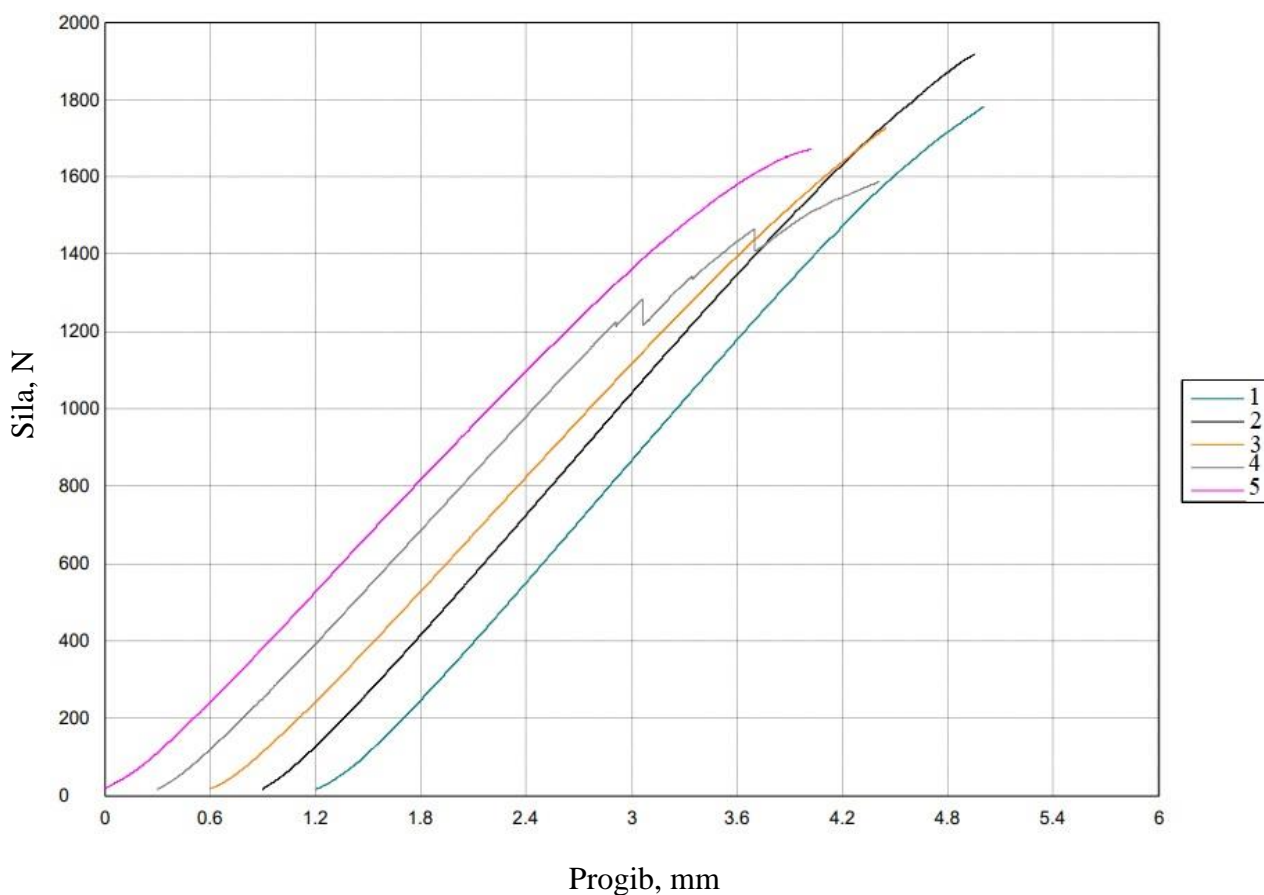
Tablica 5.9 Izmjerene vrijednosti tanjeg ispitnog tijela sendviča

Ispitno tijelo	Maksimalna sila F_{max} , N	Progib f , mm	Debljina sendviča h , mm	Debljina kore h_f , mm	Debljina jezgre h_c , mm	Širina uzorka b , mm
1	1729,96	4,98	17,38	2,05	13,28	80,10
2	1596,58	4,17	17,10	2,05	13,00	77,10
3	2047,59	5,50	17,42	2,05	13,32	80,08
4	2169,85	6,05	17,32	2,05	13,22	81,30
5	1780,88	3,80	17,30	2,05	13,20	81,98
Prosječno	1864,97	4,90	17,30	2,05	13,20	80,11

Uvrštavanjem vrijednosti iz tablice 5.9 u izraze (5.10) i (5.11) dobivaju se svojstva prikazana u tablici (5.10) te slika 5.10 prikazuje pripadajući dijagram sila – progib.

Tablica 5.10 Izračunate vrijednosti mehaničkih svojstava tanjeg sendviča

Ispitno tijelo	Smična čvrstoća jezgre τ_{cm} , MPa	Naprezanje u korama σ_f , MPa
1	0,704	25,771
2	0,688	25,170
3	0,832	30,431
4	0,874	32,772
5	0,712	26,709
Prosječno	0,762	28,171



Slika 5.10 Dijagram sila – progib tanjeg ispitnog tijela sendviča



Slika 5.11 Ispitno tijelo debljeg sendviča nakon ispitivanja

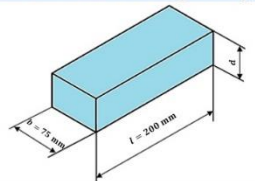
Na slici 5.11 prikazano je ispitno tijelo debljeg sendviča nakon popuštanja. Očituju se pukotine u jezgri ispitnog tijela sendviča. Popuštanje je nastupilo u jezgri sendviča što je jedan od prihvatljivih načina popuštanja sendviča za normu ASTM C393.

5.4. Program za izračun podataka iz norme ASTM C393/C393M⁴

Računalni alat za lakše korištenje norme ASTM C393/C393M izrađen je u okviru završnog rada Ispitivanje mehaničkih svojstava sendvič konstrukcija, Lucija Lončar, FSB, Zagreb 2022. Sučelje programa prikazano je na slici 5.12. Programirani su izrazi od (5.6) do (5.11) iz odlomka 5.3.2. te su ukomponirani podaci dani normom. Ulazni podaci uključuju očekivanu rasteznu čvrstoću vanjskih slojeva kao i njihovu debljinu, debljinu jezgre i maksimalnu silu prije loma ispitnog tijela. Također se unose smična i pritiska čvrstoća materijala jezgre, a izlazni podaci su preporučena debljina kora i jezgre kao i njezina smična čvrstoća.

⁴ Moguće nepoklapanje oznaka s oznakama u računalnom alatu u svrhu ujednačenja svih oznaka u radu

Standardna konfiguracija



Podatci dani u normi:

L (razmak između opterećenja kod standardnog ispitivanja) = 0

k (faktor čvrstoće vanjskih slojeva koji osigurava lom jezgre) = 0,75

lpad (širina pritisnog jastučića) = 25 mm

S (razmak između potpornih oslonaca) = 150 mm

b (širina epruvete) = 75 mm

Ulazni podaci:

cfm - očekivana vlačna čvrstoća vanjskih slojeva, MPa

l - debljina vanjskih slojeva, mm

c - debljina jezgre, mm

Fmax - maksimalna sila prije loma, N

Fe - sila tečenja pri 2% smične deformacije, N

b - širina epruvete, mm

l - duljina epruvete, mm

d - debljina epruvete, mm

Debljina epruvete mora biti jednaka debljini sendviča.

Podatci o materijalu jezgre:

τ_c (smična čvrstoća materijala jezgre), MPa =

σ_c (vlačna čvrstoća materijala jezgre), MPa =

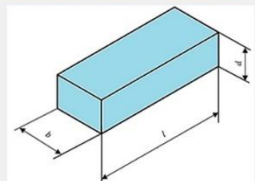
l' (preporučena debljina vanjskih slojeva), mm \geq

c' (preporučena debljina jezgre), mm \leq

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

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

Nestandardna konfiguracija



Uvjeti:

$2d \leq b \leq 6d$

$b \geq 3$ širina ćelije jezgre

$b \leq S/2$

$l = S + 50$ mm, 50 mm $>$ $0,5d$

$l = S + 0,5d$, $0,5d >$ 50 mm

d (debljina sendviča), mm =

S (razmak potpornih oslonaca), mm =

w (širina ćelije jezgre), mm =

l (duljina epruvete), mm =

b (širina epruvete), mm \leq

b (širina epruvete), mm \geq

Slika 5.12 Sučelje programa za lakše korištenje norme ASTM C393/C393M

Za ulazne podatke iskorištene su prosječne vrijednosti iz rezultata rasteznog ispitivanja kora i savojnog ispitivanja ispitnih tijela sendviča. Podaci o materijalu jezgre preuzeti su iz literature. Tablica 5.11 prikazuje ulazne podatke za dva sendviča.

Tablica 5.11 Ulazni podaci programa za deblji i tanji sendvič

	σ_{fm} , MPa	h_f , mm	h_c , mm	F_{max} , N
Deblji sendvič	99,52	2,40	19,74	733,60
Tanji sendvič	93,44	2,05	13,20	1864,97

Za smičnu čvrstoću materijala jezgre odabrana je veličina 1,70 MPa, a za pritisnu čvrstoću 1,97 MPa. Obje su veličine preuzete iz literature.[19]

Vrijednosti izračunate u programu prikazane su u tablici 5.12.

Tablica 5.12 Programom izračunate vrijednosti debljeg i tanjeg sendviča

	Preporučena debljina kore h_f' , mm	Preporučena debljina jezgre h_c' , mm	Smična čvrstoća jezgre τ_{cm} , MPa
Deblji sendvič	1,71	20,02	0,221
Tanji sendvič	1,82	19,91	0,815

6. ZAKLJUČAK

Sendvič konstrukcije razvile su se kao konkurentan tehnički materijal radi zadovoljavajućih uporabnih svojstava uz malu masu i često nisku cijenu. Njihova svojstva posljedica su njihove heterogene strukture te se iz istog razloga ispituju drukčije od homogenih materijala.

Bilo je potrebno proučiti norme koje se koriste za ispitivanje mehaničkih svojstava sendvič konstrukcija. Uz to su dobivene dvije sendvič ploče i dvije kore različitih debljina kod kojih je trebalo ispitati mehanička svojstva.

Podaci o materijalima iz literature kao i rezultati ispitivanja unijeti su u program za lakše korištenje norme ASTM C393/C393M. Usporedbom rezultata ispitivanja s izlaznim podacima programa očituje se da bi deblji sendvič pokazao optimalna svojstva pri manjoj debljini kora i jezgre dok bi tanji sendvič imao optimalna svojstva pri većim debljinama kora i jezgre (Tablica 5.12). Svojstva dobivena ispitivanjem debljeg i tanjeg sendviča prikazana su u tablici 6.1.

Tablica 6.1 Svojstva dobivena ispitivanjem debljeg i tanjeg sendviča

	Rastezna čvrstoća kore σ_{fm} , MPa	Maseni udio vlakana u kori	Smična čvrstoća jezgre τ_{cm} , MPa	Naprezanje u korama σ_f , MPa
Deblji sendvič	99,52	33,12%	0,225	7,018
Tanji sendvič	93,44	35,30%	0,762	28,171

Rastezna čvrstoća deblje kore je 6,11% viša, bez obzira što tanja kora ima veći udio vlakana u polimernoj matrici kompozita. Budući da se radi o heterogenom materijalu i nesavršenim ispitnim tijelima, ova mala razlika može biti i posljedica nesavršenosti. S druge strane, kod savojnog ispitivanja sendviča sendvič s tanjom jezgrom pokazao je daleko bolja mehanička svojstva od sendviča s debljom jezgrom. Budući da su im rastezne čvrstoće približno iste, kore tanjeg sendviča mogu preuzeti značajno veće tlačno i smično opterećenje.

Maseni udio vlakana u kori tanjeg sendviča veći je za 2,18% te se zato očekuje viša čvrstoća kako se i dobilo kod ispitivanja, no razlika u maksimalnim silama mnogo je veća od očekivane. Mogući uzrok tome su utori na korama koji ulaze u jezgru sendviča i narušavaju kontinuiranost jezgre. Na slici 5.4 primjećuje se da deblji sendvič ima znatno veće navedene utore te se oni nalaze na obje kore dok su kod tanjeg sendviča samo na jednoj kori i značajno manji. Ostali potencijalni uzroci uključuju nemogućnost mjerenja točne debljine kora i jezgara, nejednakost u gustoći i strukturi

jezgara dvaju sendviča radi nedostatnih podataka od proizvođača i površinske greške na ispitnim tijelima koje mogu uzrokovati koncentraciju naprezanja pri opterećenju. Koncentracija naprezanja može uzrokovati neadekvatan mehanizam popuštanja i tako narušiti rezultate ispitivanja.

LITERATURA

- [1] Filetin T, Kovačiček F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. U Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2013.
- [2] Schauerperl Z.: Kompozitni materijali – nastavni materijali, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2020.
- [3] Carlsson LA, Kardomateas GA. Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites. Springer, Dordrecht; 2011.
- [4] Chawla K. K.: Composite Materials: Science and Engineering, Third Edition, Springer, New York, 2012.
- [5] Roving tkanje staklenog vlakna | [članak s interneta], [pristupljeno 25.1.2023.]. Dostupno na: <https://www.jamestowndistributors.com/product/fiberglass-and-building-materials/fiberglass-woven-roving>
- [6] Roving tkanje staklenog vlakna | [slika s interneta], [pristupljeno 25.1.2023.]. Dostupno na: <https://www.easycomposites.co.uk/450g-emulsion-bound-chopped-strand-mat>
- [7] Podaci o Termanto PVC pjenu | [dokument s interneta], [pristupljeno 29.1.2023.]. Dostupno na: <https://www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-to-composites.pdf>
- [8] Shah V.: Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis, Third Edition, Wiley, New Jersey, 2007.
- [9] ASTM C297/C297M-16 Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions 2017.
- [10] Okomito rastezno ispitivanje sendviča | [slika s interneta], [pristupljeno 4.1.2023.]. Dostupno na: <https://www.admet.com/testing-applications/testing-standards/astm-c297-sandwich-construction-tensile-testing/>
- [11] standard | [definicija s interneta], [pristupljeno 9.1.2023.]. Dostupno na: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/standard#:~:text=standard%20applies%20to%20any%20definite,or%20measure%20established%20by%20authority.&text=criterion%20may%20apply%20to%20anything,rule%20or%20principle%20or%20not>.
- [12] ASTM C364/C364M-16 Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions 2016.

-
- [13] ASTM C365/C365M-22 Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores 2022.
- [14] ASTM C273/C273M-20 Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials 2020.
- [15] ASTM C393/C393M-11 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure 2011.
- [16] Podaci o matrici kore sendviča | [dokument s interneta], [pristupljeno 29.1.2023.]. Dostupno na: <https://www.scottbader.com/business/composites/#crystic-resins-grp>
- [17] Dimenzije ispitnog tijela tipa 1B | [slika s interneta], [pristupljeno 14.2.2023.]. Dostupno na <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532031587X?via%3Dihub>
- [18] HRN EN ISO 527 – 4:1997 Plastics – Determination of Tensile Properties – Part 4: Test Conditions for Isotropic and Orthotropic Fibre – Reinforced Plastic Composites
- [19] Mehanička svojstva PVC pjene | [podaci s interneta], [pristupljeno 9.2.2023.]. Dostupno na: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e19bc7065d1c4836a89d41ff23d47413