

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Jakov Ratković

**Numeričko modeliranje lijepljenog spoja
kompozitnog poluvratila i čeličnog umetka**

Zagreb, 2020. godina.

Ovaj rad izrađen je uz pomoć Katedre za zrakoplovne konstrukcije pod vodstvom doc. dr. sc. Darka Ivančevića, mag. ing. aeroing. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2019./2020.

Jakov Ratković

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	[m]	- srednji polumjer sloja ljepila
E_a	[N/m ²]	- Young-ov modul ljepila
$E_{\check{c}}$	[N/m ²]	- Young-ov modul čelika
E_{ekv}	[N/m ²]	- Young-ov modul ekvivalentnog izotropnog materijala
G_a	[N/m ²]	- modul smicanja ljepila
G_i	[N/m ²]	- modul smicanja i -te spajane pozicije lijepljenog spoja
G_{ij}	[N/m ²]	- modul smicanja sloja kompozita u ravnini $i - j$
G_{ekv}	[N/m ²]	- modul smicanja ekvivalentnog izotropnog materijala
t_i	[mm]	- debljina i -te spajane pozicije lijepljenog spoja
J_i	[m ⁴]	- polarni moment tromosti presjeka i -te spajane pozicije lijepljenog spoja
K_a	[-]	- pogonski faktor (faktor udara)
l_1	[m]	- duljina kompozitne cijevi
l_a	[m]	- duljina lijepljenog spoja
m	[kg]	- masa
r_{1i}	[m]	- unutarnji polumjer spajane pozicije lijepljenog spoja 1
r_{1o}	[m]	- vanjski polumjer spajane pozicije lijepljenog spoja 1
r_{2i}	[m]	- unutarnji polumjer spajane pozicije lijepljenog spoja 2
r_{2o}	[m]	- vanjski polumjer spajane pozicije lijepljenog spoja 2
r_u	[m]	- unutarnji polumjer kompozitne cijevi
r_v	[m]	- vanjski polumjer kompozitne cijevi
R	[-]	- faktor ograničenja teorije ljusaka
R_a	[μ m]	- srednje aritmetičko odstupanje profila
R_e	[N/m ²]	- granica tečenja (razvlačenja) čelika
S_{ij}	[N/m ²]	- komponenta naprezanja unutar sučelja programskog paketa <i>Abaqus/Standard</i>
t_a	[m]	- debljina sloja ljepila
t_i	[m]	- debljina i -te spajane pozicije lijepljenog spoja

T	[Nm]	- nazivni okretni moment
x	[m]	- duljina na istoimenoj osi
α	$[\sqrt{1/m}]$	- faktor korišten u proračunu lijepljenog spoja
β	[-]	- faktor korišten u proračunu lijepljenog spoja
δ	$[m^{-1}]$	- faktor korišten u proračunu lijepljenog spoja
ν_a	[-]	- Poisson-ov faktor ljepila
ν_{ekv}	[-]	- Poisson-ov faktor ekvivalentnog izotropnog materijala
$\nu_{\check{c}}$	[-]	- Poisson-ov faktor čelika
ν_{ij}	[-]	- Poisson-ov faktor kompozitnog sloja u ravnini $i - j$
ψ	[-]	- faktor korišten u proračunu lijepljenog spoja
σ_{ekv}	$[N/m^2]$	- ekvivalentno naprezanje nosača tripoidnog križa
$\sigma_{ekv,max}$	$[N/m^2]$	- najveće ekvivalentno naprezanje
σ_f	$[N/m^2]$	- savojno (normalno) naprezanje
$\sigma_{f,DN}$	$[N/m^2]$	- dinamička savojna čvrstoća
τ_a	$[N/m^2]$	- smična čvrstoća ljepila
τ_{Al}	$[N/m^2]$	- smična čvrstoća ljepila u kontaktu s aluminijem
$\tau_{Al,\vartheta=49^{\circ}C,\varphi=80\%}$	$[N/m^2]$	- smična čvrstoća ljepila u kontaktu s aluminijem pri navedenim atmosferskim uvjetima
τ_{CFRP}	$[N/m^2]$	- smična čvrstoća ljepila u kontaktu s CFRP kompozitom
$\tau_{\check{c}}$	$[N/m^2]$	- smična čvrstoća ljepila u kontaktu s čelikom
$\tau_{\check{c},\vartheta=49^{\circ}C,\varphi=80\%}$	$[N/m^2]$	- smična čvrstoća ljepila u kontaktu s čelikom pri navedenim atmosferskim uvjetima
τ_t	$[N/m^2]$	- smično naprezanje (nosača tripoidnog križa)

SADRŽAJ

POPIS OZNAKA	III
SADRŽAJ	V
POPIS SLIKA	VII
POPIS TABLICA.....	IX
1. MOTIVACIJA.....	1
2. UVOD.....	2
2.1. Usporedba izvedbi poluvratila od čelika i kompozitnog materijala	2
2.2. Specifičnosti sklopa poluvratila izvedenog s kompozitnom cijevi.....	2
2.3. Moguće tehnike spajanja nosača tripoidnih križeva s kompozitnom cijevi.....	5
2.3.1. Mehaničko spajanje kompozitnih s ostalim pozicijama sustava.....	5
2.3.2. Adhezivno spajanje kompozitnih s ostalim pozicijama sustava	5
2.3.3. Mehaničko-adhezivno spajanje kompozitnih s ostalim pozicijama sustava.....	6
2.3.4. O odabiru adhezivne tehnike spajanja kao najpovoljnije opcije.....	6
2.4. Ulazni podaci i tijek optimizacijskog proračuna.....	7
3. MATERIJALI I METODE.....	10
3.1. Pregled literature u području istraživanja	10
3.1.1. Problemi i specifičnosti prilikom modeliranja i analize lijepljenih spojeva.....	10
3.1.2. Odabir geometrijskog oblika lijepljenog spoja	18
3.1.3. Utjecaj hrapavosti površina.....	18
3.1.4. Karakteristike razmatranog lijepljenog spoja	19
3.2. Tehničke karakteristike odabranog ljepila	20
3.3. Analitički proračun	21
3.3.1. Prikaz raspodjele naprezanja.....	24
3.4. Numerički proračun	25
3.4.1. Model kompozitne cijevi	25
3.4.2. Model nosača tripoidnog križa.....	25
3.4.3. Model sloja ljepila.....	27

3.4.3.1.	Mogućnosti numeričkog modeliranja lijepljenog spoja u Abaqus-u	27
3.4.3.2.	Posebnosti kohezivnih elemenata	28
3.4.3.3.	Kreiranje geometrije modela.....	30
3.4.3.4.	Svojstva materijala ljepila.....	31
3.4.3.5.	Mreža konačnih elemenata	31
3.4.4.	Definiranje interakcija i ograničenja sklopa svih pozicija	32
3.4.4.1.	Definicija sklopa numeričkog modela	32
3.4.4.2.	Modul Interaction – definiranje geometrijskih ograničenja i veza sklopa...	33
3.4.4.3.	Rubni uvjeti i opterećenje modela	34
3.4.5.	Prikaz numerički dobivene raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja	35
3.5.	Modifikacija spoja koristeći numerički proračun	36
3.5.1.	Ispitna grupa I	37
3.5.2.	Ispitna grupa II	38
3.5.3.	Ispitna grupa III.....	38
3.5.4.	Ispitna grupa IV	41
4.	REZULTATI	42
4.1.	Ispitna grupa I	42
4.2.	Ispitna grupa II	43
4.3.	Ispitna grupa III.....	44
4.4.	Ispitna grupa IV	45
4.5.	Optimirana geometrija spoja.....	47
4.6.	Raspodjela smičnog naprezanja u slučaju optimirane geometrije spoja.....	48
4.7.	Provjera stanja naprezanja u nosaču tripoidnog križa.....	49
5.	RASPRAVA.....	52
6.	ZAKLJUČAK.....	56
	LITERATURA.....	58
	SAŽETAK.....	60
	SUMMARY	61

POPIS SLIKA

Slika 1.	Natjecateljsko vozilo FSB RT06R (Vulpes R).....	4
Slika 2.	Položaj poluvratila na vozilu Vulpes R.....	4
Slika 3.	Sklop kompozitnog poluvratila	5
Slika 4.	Pojednostavljena shema realne konstrukcije sklopa poluvratila	7
Slika 5.	Model korišten prilikom numeričkog proračuna.....	7
Slika 6.	Usporedni prikaz eksperimentalno dobivene i pravcima aproksimirane krivulje smičnog naprezanja u ovisnosti o deformaciji [5].....	13
Slika 7.	Prikaz nosivosti spoja dobivenih a) analitički, b) numerički i c) eksperimentalno za različite debljine sloja ljepila [5]	13
Slika 8.	Usporedni prikaz eksperimentalno dobivene i pravcima aproksimirane krivulje smičnog naprezanja u ovisnosti o deformaciji [10].....	15
Slika 9.	Numerički (MKE) dobivena zaostala toplinska naprezanja u ovisnosti o debljini sloja ljepila [5].....	16
Slika 10.	Nosivost spoja za različite temperature sušenja spoja u ovisnosti o debljini sloja ljepila [5]	17
Slika 11.	Mogući načini adhezivnog spajanja opterećene kompozitne cijevi [2]	18
Slika 12.	Polovični prikaz predviđenog izgleda spoja u presjeku	20
Slika 13.	Utjecaj duljine lijepljenog spoja na raspodjelu smičnog naprezanja	24
Slika 14.	Profil NTK čijom rotacijom oko središnje osi nastaje geometrijski model, dimenzije u [m]	26
Slika 15.	Prostorni prikaz prizmatičnog kohezivnog konačnog elementa [19].....	29
Slika 16.	Mogućnosti deformiranja prizmatičnog kohezivnog konačnog elementa [19].....	30
Slika 17.	Profil sloja ljepila i njegova dubina izvlačenja, dimenzije u [m].....	30
Slika 18.	Mreža konačnih elemenata s definiranom orijentacijom na modelu sloja ljepila .	32
Slika 19.	Potpuno sklopljeni model.....	32
Slika 20.	Postavljanje međuveze između kompozitne cijevi i sloja ljepila	33
Slika 21.	Postavljanje međuveze između sloja ljepila i NTK.....	34
Slika 22.	Sklop sa prikazanim opterećenjem i rubnim uvjetom	34
Slika 23.	Numerički dobivena raspodjela smičnog naprezanja [Pa] u sloju ljepila	35

Slika 24.	Numerički dobivena raspodjela smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja	36
Slika 25.	Prikaz različitih završetaka lijepljenog spoja	39
Slika 26.	Raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja ispitne grupe I	42
Slika 27.	Raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja ispitne grupe II.....	43
Slika 28.	Raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja ispitne grupe III.....	44
Slika 29.	Raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja ispitne grupe IV	45
Slika 30.	Particija na modelu sloja ljepila	46
Slika 31.	Optimirani profil NTK, dimenzije u [mm].....	47
Slika 32.	Optimirani profil sloja ljepila, dimenzije u [mm]	47
Slika 33.	Numerički dobivena raspodjela smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja optimirane geometrije.....	49
Slika 34.	Numerički dobivena raspodjela ekvivalentnog naprezanja [Pa] u nosaču tripoidnog križa	50
Slika 35.	Dvije moguće raspodjele konačnih elemenata na otvorenom kraju modela sloja ljepila	53
Slika 36.	Model sloja ljepila bez vrha konusa na otvorenom kraju spoja	54
Slika 37.	Nejednolika raspodjela smičnog naprezanja u cirkularnom smjeru modela sloja ljepila	55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Dimenzije i svojstva kompozitne cijevi i čeličnog nosača tripoidnog križa [1]	8
Tablica 2. Brojčane vrijednosti veličina relevantnih za lijepljeni spoj	23
Tablica 3. Prikaz parametara pojedinih simulacija ispitne grupe I	37
Tablica 4. Prikaz parametara pojedinih simulacija ispitne grupe II	38
Tablica 5. Prikaz parametara pojedinih simulacija ispitne grupe III	39
Tablica 6. Prikaz parametara pojedinih simulacija ispitne grupe IV	41
Tablica 7. Usporedba numerički dobivenih vrijednosti smičnog naprezanja u karakterističnim točkama na spoju inicijalne i optimizirane geometrije	56
Tablica 8. Usporedba mase NTK početne i optimirane geometrije	57

1. MOTIVACIJA

U današnje doba iznimno velike konkurencije, kada se besprijekorno funkcioniranje sklopova, sustava i proizvoda u cjelini podrazumijeva, proizvođači se okreću inovativnim rješenjima, tehnologijama i materijalima iz brojnih strateških razloga – kako bi ponudili više za jednaku cijenu, povećali dobit uz zadržavanje potpune funkcionalnosti proizvoda i slično. U području strojarstva, a pogotovo tehnike motornih vozila, uporabom inovativnih materijala moguće je ostvariti jedan od glavnih ciljeva ove grane industrije, a kojemu teže svi kompetentni proizvođači – smanjenje ukupne mase vozila.

Pogonske osovine, odnosno vratila – poluvratila, elementi su vozila kod kojega je ostvariva značajna ušteda na masi prelaskom s konvencionalnog (npr. čelik, aluminij, titan) na kompozitni materijal – ugljičnim vlaknima ojačanu smolu (eng. *CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer*).

Iz tog razloga, uz mogućnost ostvarivanja dodatnih bodova na službenim Formula Student natjecanjima za inovativnost, u završnom radu [1] je provedeno konstruiranje i proračun kompozitnih poluvratila za natjecateljsko vozilo FSB Racing Team-a RT06R (Vulpes R). Tijekom izrade završnog rada [1], lijepljeni je spoj između same kompozitne cijevi i čeličnih umetaka koji nose tripoidne križeve uočen kao potencijalni izvor problema. Kako je u [1] pokazano, navedeni lijepljeni spoj kritičan je dio sklopa poluvratila te samim time ograničava najmanje moguće dimenzije sklopa, a time i njegovu masu. Osim toga, dostupnu literaturu koja obrađuje lijepljene spojeve čini jedino skupina teoretskih i eksperimentalnih članaka, a među razmatranjima koja su u njima iznesena postoje brojne nesuglasice. Iz svega navedenoga proizašla je motivacija za daljnje istraživanje lijepljenih spojeva koje je provedeno u ovom radu, a koje uključuje detaljnu teoretsku, analitičku i numeričku analizu lijepljenog spoja kompozitnog poluvratila i čeličnog umetka s ciljem odabira najpovoljnijih parametara kojima se taj spoj može izvesti.

2. UVOD

2.1. Usporedba izvedbi poluvratila od čelika i kompozitnog materijala

Glavne i najveće prednosti kompozitnih materijala nad metalima su njihova viša specifična čvrstoća i specifična krutost [2], odnosno čvrstoća i krutost po jedinici mase. Ostvariva ušteda na masi poluvratila ima i dodatan pozitivan utjecaj na dinamiku vozila, jer kako poluvratila rotiraju, smanjuje se i njihov dinamički moment tromosti, a uz to raste i fleksijska kritična brzina vrtnje. Također, kompozitni materijali imaju i vrlo dobra prigušna svojstva [2], ne korodiraju te su otporniji od čelika zamoru i puzanju [2].

Međutim, kompozitni su materijali od čelika znatno osjetljiviji na promjenu temperature [2] u smjerovima različitim od smjera pružanja vlakana. Uz to je važno još napomenuti da je kompozitni materijal vrlo krhak i osjetljiv na udarce [2], a posebno su opasna jedva vidljiva oštećenja nastala kao posljedica udara, tzv. BVID (eng. *Barely Visible Impact Damage*) [3].

Iz svega navedenog vidi se da kompozitni materijal ima svoje prednosti i mane u usporedbi s čelikom, a za ovu svrhu vrlo je pogodan uz potrebu za razmjernim oprezom prilikom skladištenja i rukovanja gotovim cijevima te spajanja pozicija u sklop.

2.2. Specifičnosti sklopa poluvratila izvedenog s kompozitnom cijevi

Korištenjem kompozitnih materijala, u većini slučajeva, poluvratilo nije moguće napraviti iz jednog dijela. Sami tripoidni križevi kojima se snaga, odnosno opterećenje, preko cijevi prenosi s prijenosnika na kotače i u suprotnom smjeru, zbog specifičnosti uvjeta opterećenja i geometrije napravljeni su iz metala. Stoga je potrebno osmisliti način spajanja, tj. prijenosa opterećenja sa kompozitne cijevi na tripoidne križeve.

Stvaranjem spojeva nosača tripoidnih križeva (u nastavku NTK) s kompozitnom cijevi, ovisno o načinu spajanja, zbog same prirode ili mogućih nesavršenosti spoja, nastaju kritične točke u sklopu, a time i osjetljivost čitavog sklopa. Stoga je određenu pažnju potrebno posvetiti i odabiru optimalnog načina spajanja navedenih pozicija, o čemu će biti više riječi pod točkom 2.3.

Lijepljeni spoj, koji je u ovom slučaju odabran kao najpovoljnija tehnika spajanja, čak ograničava najmanje moguće dimenzije sklopa jer se upravo u materijalu ljepila, na rubovima

lijepljenog spoja, javljaju izrazite koncentracije smičnog naprezanja. Raspodjela ovog kritičnog, smičnog naprezanja ovisi o brojnim parametrima kao što su vrsta materijala, obrada spajanih površina, krutost spajanih pozicija te sama izvedba spajanja, ali najznačajniji je faktor srednji polumjer spoja – što je on manji, naprezanja su veća.

Prilikom izrade završnog rada [1], inicijalno je slijed provođenja proračuna sklopa poluvratila zamišljen s polaskom od dimenzioniranja same kompozitne cijevi prema zadanim, odnosno traženim karakteristikama, nakon čega bi dobivene dimenzije kompozitne cijevi bile korištene kao ulazni podaci u daljnjem proračunu – proračunu nosača tripoidnih križeva i samog lijepljenog spoja.

Međutim, kako se u [1] uspostavilo tijekom prve iteracije, dolaskom do proračuna lijepljenog spoja, za zadano opterećenje i najmanje moguće dimenzije cijevi (uvjetovane čvrstoćom same cijevi), zbog stanja nastalog naprezanja navedeni spoj nije moguće izvesti.

Dakle, proračunski je postupak iteracijski, a upravo lijepljeni spoj predstavlja kritičan dio konstrukcije, odnosno ograničava najmanje moguće dimenzije sklopa. Drugim riječima, zadovoljavanje čvrstoće lijepljenog spoja prva je i krajnja stavka svakog iteracijskog prolaska.

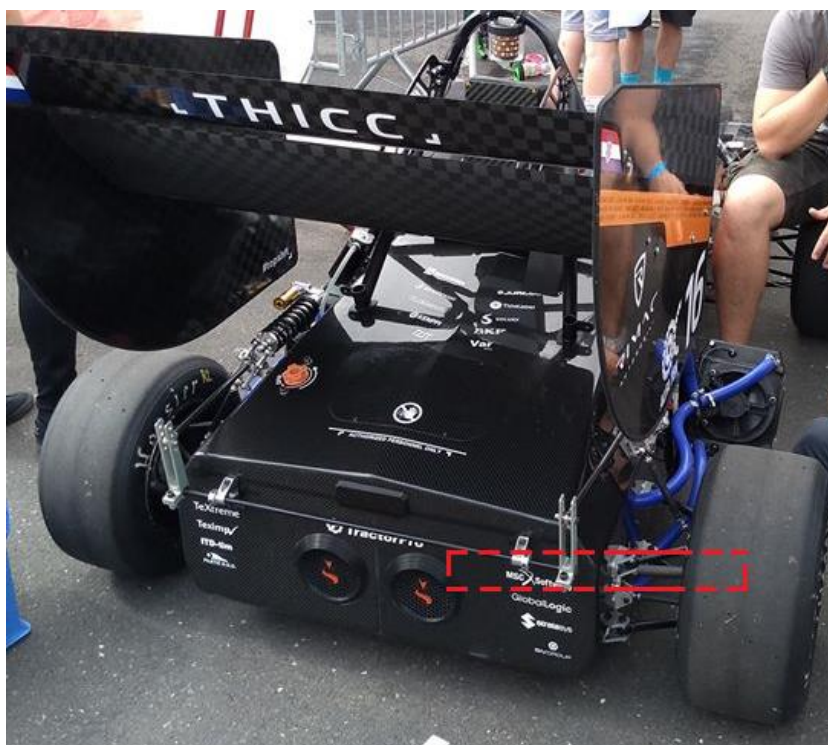
Proračun je iteracijski jer se iz analitičkog izraza za raspodjelu smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja ne mogu direktno odrediti potrebne dimenzije za zadovoljavanje uvjeta čvrstoće spoja. Dimenzije koje su ovdje varijable jesu srednji polumjer sloja ljepila a , debljina sloja ljepila t_a i duljina spoja l_a . Osim navedenih veličina vezanih uz samo ljepilo, na raspodjelu smičnog naprezanja utječu i elastičnost (u vidu modula smicanja G_1 i G_2) te dimenzije poprečnih presjeka (u vidu njihovih polarnih momenata tromosti J_1 i J_2) lijepljenih pozicija. Promjenom dimenzija vezanih za sloj ljepila, nužno se mijenjaju i dimenzije lijepljenih pozicija, koje pak opet utječu na raspodjelu smičnog naprezanja.

Iz svega navedenoga lako je zaključiti da je korisno posvetiti se optimizaciji, tj. prilagodbi geometrije spajanih pozicija, kako bi se smična naprezanja, tj. njegove koncentracije na rubovima smanjile, odnosno kako bi se omogućila izrada pouzdanog sklopa poluvratila koristeći elemente minimalnih mogućih dimenzija, a samim time i minimalne moguće mase.

Slikom 1. prikazano je natjecateljsko vozilo FSB RT06R, tzv. Vulpes R, za koje su zamišljena navedena poluvratila, a na slici 2. je crvenom bojom označen njihov položaj na vozilu.

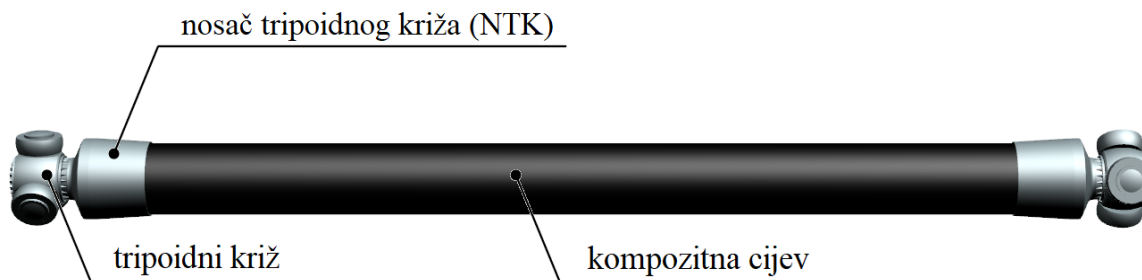


Slika 1. Natjecateljsko vozilo FSB RT06R (Vulpes R)



Slika 2. Položaj poluvratila na vozilu Vulpes R

Slikom 3. je dan prikaz sklopa kompozitnog poluvratila s označenim pozicijama.



Slika 3. Sklop kompozitnog poluvratila

2.3. Moguće tehnike spajanja nosača tripoidnih križeva s kompozitnom cijevi

2.3.1. Mehaničko spajanje kompozitnih s ostalim pozicijama sustava

Ovaj način spajanja obuhvaća dvije opcije: spajanje zakovicama ili sličnim elementima koji oblikom prenose opterećenje i spajanje vijcima. U slučaju spajanja vijcima, opterećenje se prenosi trenjem koje osigurava normalna sila u vijku.

Prednost ovog načina spajanja je jednostavnost i nepostojanje potrebe za opsežnom pripremom spajanih pozicija, a uz to, inicijalno dobiven spoj je vrlo siguran [4]. Dodatne su pogodnosti rastavljivost spoja (osim u slučaju spajanja zakovicama) i vrlo jednostavna kontrola njegove ispravnosti [4].

Velik je problem kod ovakvog načina spajanja što se naknadnim bušenjem provrta i drugih oblika za prijenos opterećenja u kompozitnoj poziciji unose značajne koncentracije naprezanja, uz to moguće je uzrokovati lom vlakana – što ima za posljedicu narušavanje integriteta konstrukcije, a moguće je i narušavanje interlaminarnih veza [2].

Također, korišteni vijci (ili zakovice) za ovakav način spajanja moraju biti od materijala otpornih na koroziju jer se njihovim kontaktom s ugljičnim vlaknima na mjestu provrta povećava opasnost od galvanske korozije [4]. Pored toga, na ovaj način spojeni metalni dijelovi podložni su zamoru [4].

2.3.2. Adhezivno spajanje kompozitnih s ostalim pozicijama sustava

Adhezivno spajanje podrazumijeva spajanje pozicija lijepljenim spojem.

Glavne prednosti ovog načina spajanja su vrlo dobra nosivost i distribucija opterećenja preko relativno velike površine čime su izbjegnute veće koncentracije naprezanja [2], [4]. Pored toga, adhezivni je spoj manje podložan zamoru te je relativno čvrst [4].

Uz to, masa sklopa ne raste značajno, a sam spoj moguće je optimizirati ovisno o načinu opterećenja i geometrijskim karakteristikama spajanih pozicija [2]. Također, ljepilo djeluje u sklopu kao izolacija i brtvilo [2].

Jedan je od glavnih nedostataka adhezivnog spajanja potrebna vrlo opsežna priprema spajanih dijelova [2], [4]. Uz to, posebnu je pažnju potrebno posvetiti nanošenju ljepila i sušenju spoja koje može potrajati i nekoliko dana. Problem predstavlja i potrebna detaljna kontrola lijepljenog spoja koju je vrlo teško izvesti (osim otkrivanja velikih defekata koji rezultiraju katastrofalnim lomom) [4].

Nadalje, promjena temperature i općenito uvjeti okoline znatno utječu na nosivost adhezivnog spoja [2]. Nedostatak je također i nemogućnost rastavljanja spoja jednom nakon spajanja.

2.3.3. Mehaničko-adhezivno spajanje kompozitnih s ostalim pozicijama sustava

Tehnika mehaničko-adhezivnog spajanja zasigurno osigurava najveću nosivost svih vrsta opterećenja, a može se ostvariti ili kombinacijom lijepljenog spoja i vijaka, ili spajanjem kompozitne cijevi sa specijalno izrađenim metalnim pozicijama i ljepilom sa dodacima [4]. Međutim, ovakve modele prenošenja opterećenja analitički je praktički nemoguće opisati, a i numeričko opisivanje vrlo je zahtjevno. Uz to, korištenje ove opcije financijski je nepovoljno jer je potrebno izraditi složene pozicije, pripremati kompozitni dio i zatim koristiti ljepila sa precizno određenom količinom specijaliziranih aditiva.

2.3.4. O odabiru adhezivne tehnike spajanja kao najpovoljnije opcije

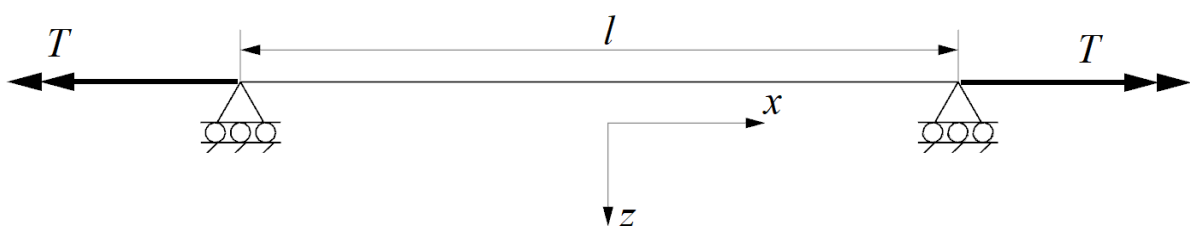
S obzirom na sve navedeno u danom pregledu postojećih tehnika spajanja, vidljivo je da je praktički jedina izvediva opcija korištenje adhezivnog spajanja koje ima svoje prednosti iako zahtjeva pažljivu i opsežnu pripremu spoja.

2.4. Ulazni podaci i tijek optimizacijskog proračuna

Primarni je zahtjev na sklop poluvratila, kao što je već rečeno, najmanja moguća masa.

Kako će poluvratila povezivati prijenosnik s kotačima pomoću tripoidnih zglobova, ona će biti opterećena samo na uvijanje momentom torzije. Sva ostala opterećenja s kotača na ostatak vozila prenose se sponama ovjesa, a eventualna aksijalna sila koja bi se pojavila radi slobodnog hoda tripoidnih križeva u svojim žljebovima bit će zanemarive veličine.

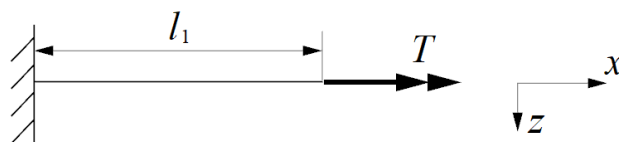
Slikom 4. prikazana je pojednostavljena shema sklopa jednog poluvratila kao grede na dva pomična oslonca s ucrtanim opterećenjem.



Slika 4. Pojednostavljena shema realne konstrukcije sklopa poluvratila

U prikazanom trenutku konstrukcija se čini statički neodređenom, ali manjim aksijalnim pomakom (10-ak mm) sklopa poluvratila na bilo koju stranu unutar žlijeba tripoidne glavčine on dolazi u kontakt s odstoynim prstenima koji sprječavaju veće pomake i ispadanje poluvratila iz sustava.

Shema na slici 4. predstavlja realne rubne uvjete, međutim, prilikom numeričkog proračuna, radi jednostavnosti i boljeg podudaranja s analitičkim rješenjima, korišten je konzolni model. Konzolni model sadrži uklještenje na jednoj i opterećenje na drugoj strani, čime se razmatra rubni uvjet, odnosno lijepljeni spoj samo jedne strane. Uzimanjem uz to u razmatranje samo manjeg dijela kompozitne cijevi (l_1), moguće je ostvariti značajno smanjenje broja konačnih elemenata proračunskog modela. Ovakav je model prikazan slikom 5.



Slika 5. Model korišten prilikom numeričkog proračuna

Kako su rubna područja poluvratila, u kojima se nalaze lijepljeni spojevi, u neposrednoj blizini lokalnih izvora topline – mehaničkog prijenosnika s jedne i kočionog diska s druge

strane – potrebno je napomenuti da je predviđen rad lijepljenih spojeva u uvjetima povišene temperature.

Dakle, kvalitativni su zahtjevi, odnosno ulazni podaci proračuna već navedeni, a kako je opterećenje čisto torzijsko, preostali su kvantitativni ulazni podaci za proračun:

$$\begin{aligned}
 T &= 480 \text{ Nm} && - \text{ nazivni moment torzije na izlasku iz prijenosnika (reduktora),} \\
 K_a &= 1,2 && - \text{ pogonski faktor (faktor udara), } i \\
 l_1 &= 0,15 \text{ m} && - \text{ odabrana duljina kompozitne cijevi za numerički proračun.}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Korisno je još napomenuti, zbog kasnijeg prikaza konačno dobivenih predviđenih napreznja koja su blizu smičnoj čvrstoći ljepila, da je ovako odabran pogonski faktor, u usporedbi s njegovim ostalim vrijednostima korištenim prilikom proračuna mehaničkog pogona vozila, vrlo visok.

Radi jednostavnosti, u ovom radu iteracijski postupak koji je proveden u [1] nije prikazan, već su korištene konačne dimenzije kompozitne cijevi koje su rezultat posljednjeg koraka iteracije, a koje su prihvaćene, dakle, tek nakon što je potvrđena zadovoljenost samog lijepljenog spoja. Konačne dimenzije kompozitne cijevi koje su dobivene i odabrane u [1], a koje su potrebne tijekom proračuna lijepljenog spoja, prikazane su tablicom 1. U istoj tablici dane su informacije o korištenom kompozitnom materijalu te inicijalno odabrane, iz uvjeta njegove čvrstoće, dimenzije čeličnog NTK koje će poslužiti prilikom početnog, analitičkog proračuna lijepljenog spoja.

Tablica 1. Dimenzije i svojstva kompozitne cijevi i čeličnog nosača tripoidnog križa [1]

Kompozitna cijev $[\pm 45]_{2s}$; materijal: T700/DT120 (F.A.W. 300 g/m², V_f 65%)			
r_u	[mm]	17	unutarnji polumjer kompozitne cijevi
r_v	[mm]	19,4	vanjski polumjer kompozitne cijevi
G_{xy}	[N/mm ²]	32596,49	modul smicanja u ravnini $x - y$
Čelični NTK; materijal: Böhler K600 (ISO/EN: X45NiCrMo16)			
$r_{\check{c},u}$	[mm]	19,7	unutarnji polumjer čeličnog NTK
$r_{\check{c},v}$	[mm]	20,5	vanjski polumjer čeličnog NTK
$G_{\check{c}}$	[N/mm ²]	80769,23	modul smicanja čelika
σ_{ekv}	[N/mm ²]	1080	dozvoljeno ekvivalentno naprezanje

U analitičkom dijelu proračuna bit će prikazan samo jedan od brojnih modela koji su služili za konačno određivanje dimenzija sklopa. Vrijednosti naprezanja koje su tim proračunom dobivene ne zadovoljavaju uvjet čvrstoće, a poslužile su samo kako bi se mogao kasnije validirati numerički model pomoću kojega je konačno spoj modificiran, odnosno postignuto je zadovoljavajuće stanje naprezanja. Numerički je model kreiran unutar komercijalnog programskog paketa za numeričke analize metodom konačnih elemenata (*FEM*) *Abaqus/Standard*.

Potvrđivanjem ispravnosti numeričkog modela, može se u daljnjim razmatranjima vezanim uz optimizaciju spoja napustiti vrlo zahtjevan i složen analitički proračun koji ustvari, kako je pod točkom 3.1.1. u nastavku pojašnjeno, niti ne opisuje realne uvjete valjano.

Dimenzije kompozitne cijevi nisu u optimizacijskom procesu mijenjane, već se nastoji zadovoljavajuće stanje naprezanja postići posebnim oblikovanjem i dimenzioniranjem čeličnog umetka (NTK) i sloja ljepila.

U nastavku je najprije dan pregled važnih stavki vezanih uz lijepljeni spoj, a zatim su prikazana svojstva odabranog ljepila. Nakon toga slijedi analitički, a potom i numerički proračun čvrstoće lijepljenog spoja. Konačno, predstavljene su i ispitne grupe u kojima je numerički ispitan utjecaj pojedinih parametara na raspodjelu smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja, a iz kojih su izvedeni zaključci pomoću kojih je spoj optimiziran.

3. MATERIJALI I METODE

3.1. Pregled literature u području istraživanja

Kako ne postoji mogućnost samostalnog ispitivanja ponašanja lijepljenog spoja u uvjetima čistog torzijskog opterećenja, prilikom pretraživanja i oslanjanja na literaturu u vezi lijepljenih spojeva, važno je u obzir uzeti i provedena eksperimentalna ispitivanja.

3.1.1. Problemi i specifičnosti prilikom modeliranja i analize lijepljenih spojeva

Lijepljeni spojevi područje su strojarstva koje još uvijek nije u potpunosti shvaćeno, odnosno do današnjeg dana vode se brojne rasprave oko razumijevanja pojedinih detalja o mehaničkom odzivu i stanju napreznja pojedinih elemenata spoja. Kao primjer može se navesti činjenica da još uvijek postoje nesuglasice o vrijednostima inženjerskih konstanti elastičnosti materijala ljepila kroz debljinu sloja [5]. Neki autori tvrde da je ljepilo znatno kruće u graničnim zonama, u neposrednoj blizini površina spajanih pozicija koje su napravljene od drugih materijala, dok drugi tvrde da su svojstva jednaka kroz čitavu debljinu sloja [5]. Navedeni primjer dovoljan je dokaz o nemogućnosti potpuno točnog numeričkog modeliranja lijepljenih spojeva u svrhu njihovog analiziranja, a samim time i postizanja točnih rezultata.

Kao drugi primjer mogla bi se navesti problematika raspodjele napreznja kroz debljinu sloja ljepila. U starijim je razmatranjima i, zbog jednostavnosti, u velikoj većini čak i modernijih izvedenih analitičkih izraza, pretpostavljeno jednoliko stanje napreznja kroz debljinu sloja ljepila. Kasnije je pokazano, numeričkim analizama u [6], da u stvarnosti postoje veliki gradijenti napreznja kroz debljinu sloja ljepila čak i u slučajevima slojeva ljepila manje debljine, pa ih se stoga ni u kojem slučaju ne bi smjelo smatrati konstantnima.

Postoje brojni načini opisivanja konstitutivnog ponašanja materijala ljepila, odnosno ovisnosti njegovog smičnog napreznja o deformaciji, prema kojima se razlikuju dvije proturječne teorije o korištenoj debljini sloja ljepila. Neki od ovih modela ponašanja materijala ljepila prema [4] i [5] su linearno elastični, bi-linearno elastični, elastično-plastični za djelomično opterećenje i elastično-idealno plastični model te njihove razne kombinacije. Prema teoriji izloženoj u [6], najveća nosivost lijepljenog spoja postiže se korištenjem što veće debljine sloja ljepila, a prema drugoj upravo suprotno – korištenjem njegove što manje debljine [5], o

čemu je više rečeno u nastavku. U [7] je pokazano da karakterizacija materijala ljepila kao linearno elastičnog ima tendenciju preuveličavanja koncentracije naprezanja na (po dužini) rubnim dijelovima spoja.

Na krajevima lijepljenih spojeva nastaju koncentracije naprezanja koje su, prema [8], posljedica rubnih uvjeta i različitog deformiranja spajanih pozicija zbog razlike u njihovim krutostima. Hart-Smith u [9] također je zaključio da su koncentracije naprezanja na rubovima lijepljenih spojeva rezultat razlike u krutosti između samog sloja ljepila i lijepljenih pozicija. Iako ta tvrdnja ima smisla, pokazalo se da na samome rubu postoje i singularnosti naprezanja. Ove singularnosti često se nazivaju rubnim efektima, trodimenzionalne su prirode, a predstavljaju rezultat postojanja i interakcije određenih geometrijskih i materijalnih diskontinuiteta kroz debljinu spoja [6].

U velikoj većini starijih prihvaćenih istraživanja, korištena su linearno elastična svojstva ljepila, iako ona u stvarnosti imaju izraženo nelinearno ponašanje [10]. Nelinearno ponašanje materijala, iako bi približilo analizirani model stvarnom slučaju, a što bi rezultiralo točnijim rješenjima, praktički je nemoguće implementirati u teoretske analize kako bi se odredili analitički izrazi za dobivanje raspodjela pojedinih naprezanja. Stoga se u postojećim teorijama i izvedenim izrazima materijal ljepila smatra linearno elastičnim. Teoretska su se razmatranja i analitički izrazi kroz godine istraživanja nadopunjavali, ispravljali, proširivali te smanjivali broj zanemarenih varijabli i uvedenih pretpostavki.

Trenutno najprihvaćeniji izraz za raspodjelu smičnog naprezanja $\tau_{\theta r}$, koje predstavlja najznačajniju komponentu naprezanja, a koje u slučaju čistog torzijskog opterećenja i dovodi do popuštanja, razvili su Addams i Peppiatt u [8]. U navedenom analitičkom izrazu koriste se linearno elastična svojstva ljepila, a zanemarene su deformacije u ravnini $r - \theta$ u lijepljenim pozicijama i ravnini $z - \theta$ u sloju ljepila. Upravo taj izraz bit će korišten i u ovom radu.

Kako bi se izvedeni izrazi mogli koristiti, u slučaju promatranja aksijalnog opterećenja spoja istih karakteristika koji su razmatrali Lubkin i Reissner u [11], morao je biti zadovoljen drugi Goland - Reissner-ov kriterij, a geometrijske karakteristike spoja morale su ležati unutar granica teorije ljusaka, što je definirano, uz prilagođenu notaciju, prema [8] sa izrazom:

$$R = \frac{t_i}{2 \cdot a} \leq 0,1, \quad (3.1)$$

gdje je R faktor ograničenja, t_i je debljina stijenke i -te spajane pozicije, a $2 \cdot a$ je srednji promjer sloja ljepila.

Goland i Reissner pokazali su u [12], metodama energije deformiranja, da se naprezanja u lijepljenim pozicijama τ_{zr} i σ_r , odnosno njihovi radovi, u nekim slučajevima mogu zanemariti u odnosu na radove istih naprezanja u sloju ljepila, pa se stoga njihov utjecaj zanemaruje ako vrijedi:

$$\beta = \min \left(\frac{t_a \cdot G_i}{G_a \cdot t_i} \right) \geq 10; \quad i = 1, 2. \quad (3.2)$$

U izrazu (3.2) t_a je debljina sloja ljepila, G_i je modul smicanja i -te spajane pozicije, G_a je modul smicanja ljepila, a t_i je, kako je već navedeno, debljina stijenke i -te spajane pozicije.

Kako je u teoriji, koja je u [8] razvijena, zanemareno tangencijalno naprezanje $\tau_{\theta r}$ koje se javlja u spajanim pozicijama, ograničenja koja postoje u toj teoriji analogna su onima koja su netom pojašnjena i vrijede za ranije spomenuto razmatranje aksijalnog opterećenja.

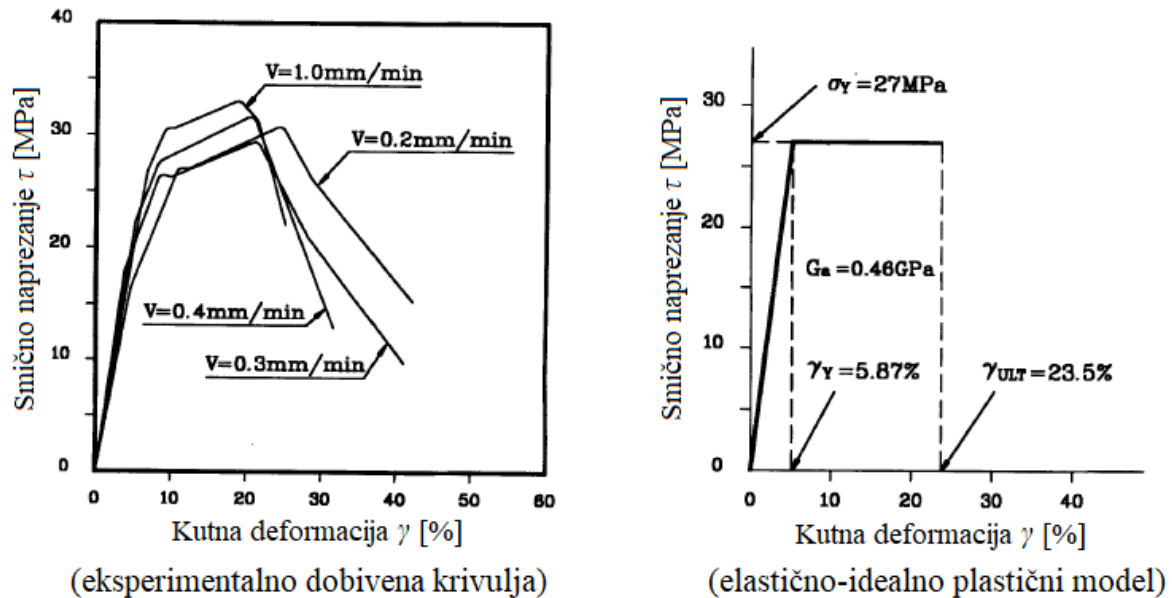
Međutim, u [8] je dokazano da se, uz pretpostavku o linearnoj promjeni navedenih naprezanja – što je jedno od unaprjeđenja postojeće teorije od koje je taj rad nastao ([13]) – navedene granice, u smislu drugog Goland - Reissner-ovog kriterija, mogu proširiti na sljedeći način:

$$\beta = \min \left(\frac{t_a \cdot G_i}{G_a \cdot t_i} \right) > 3. \quad (3.3)$$

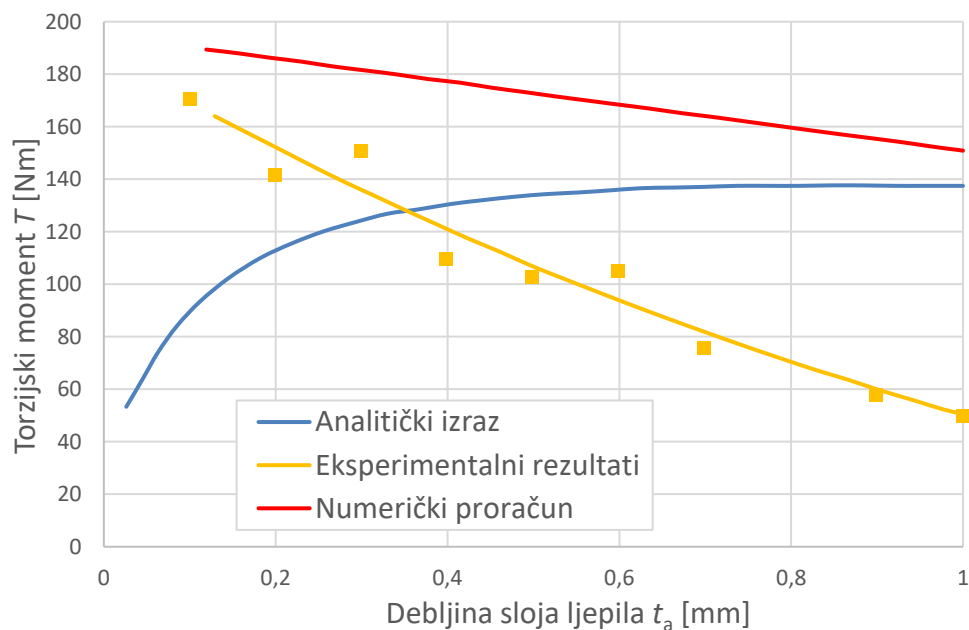
U [14] je provedeno, varijacijskim metodama komplementarne energije, daljnje razmatranje stanja naprezanja lijepljenog spoja opterećenog momentom torzije, uzimanjem u obzir i naprezanje $\tau_{\theta r}$, koje je u [8] zanemareno. Na taj je način dobivena točnija raspodjela razmatranog smičnog naprezanja u sloju ljepila, pa je stoga u [14] zaključeno da je koncentracija naprezanja dobivena raspodjelom prema [8] veća nego što ona u stvarnosti jest.

Prema [5], u radu [8], kako su korištena linearno elastična svojstva materijala ljepila, do popuštanja lijepljenog sloja dolazi kada smično naprezanje dosegne smičnu čvrstoću. Međutim, ljepila korištena za ovakve namjene najčešće su ojačana dodacima za očvršćivanje koji njegova svojstva modificiraju na način da ona počinju izražavati izrazito nelinearna svojstva, pa bi stoga takva modificirana svojstva trebala biti uključena u numeričke modele [5]. Na taj način, popuštanje lijepljenog spoja određeno je dolaskom vrijednosti smične deformacije do vrijednosti lomne deformacije [5]. U [5] je stoga provedeno ispitivanje lijepljenog spoja koristeći između ostaloga i, u numeričkoj analizi, elastično-idealno plastičan konstitutivan model za opis materijal ljepila. Slikom 6. prikazane su, usporedno, stvarna, eksperimentalno dobivena krivulja ovisnosti smičnog naprezanja o smičnoj deformaciji i pravcima aproksimirana krivulja koja je poslužila prilikom numeričkih proračuna.

Slikom 7. dan je prikaz nosivosti razmatranog spoja, za različite vrijednosti debljine sloja ljepila, dobiven sljedećim načinima: a) analitičkim izrazom koji je izveden u [8] i koristi linearno elastični model za materijal ljepila, b) numeričkom analizom (FEM) koja koristi elastično-idealno plastični model materijala ljepila i c) eksperimentalno.



Slika 6. Usporedni prikaz eksperimentalno dobivene i pravcima aproksimirane krivulje smičnog naprezanja u ovisnosti o deformaciji [5]

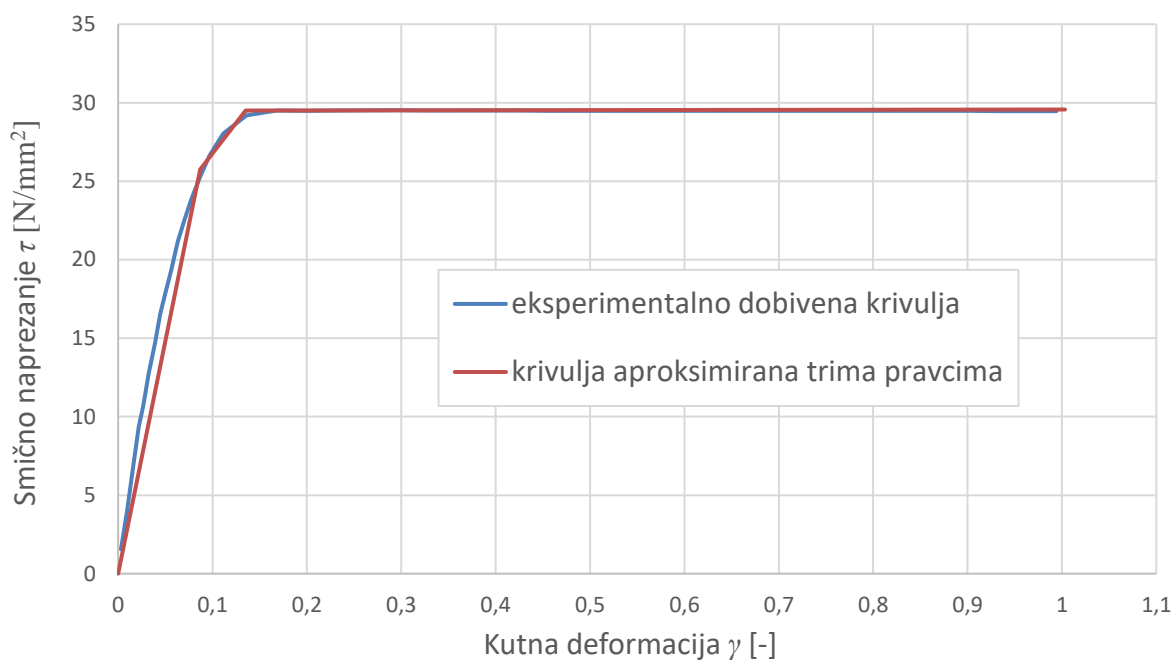


Slika 7. Prikaz nosivosti spoja dobivenih a) analitički, b) numerički i c) eksperimentalno za različite debljine sloja ljepila [5]

Vidljivo je prema slici 7. da porastom debljine sloja ljepila, analitičko rješenje u kojemu su korištena linearno elastična svojstva materijala pokazuje porast nosivosti, zbog smanjenja koncentracije naprezanja u području gdje je prisutan utjecaj rubnih efekata, dok numerički model, koji koristi elastično-idealno plastična svojstva materijala ljepila pokazuje gotovo linearan pad nosivosti spoja. Ovo ponašanje je posljedica činjenice da se ljepilo, dolaskom do određene vrijednosti kutne deformacije, počinje ponašati potpuno plastično, bez loma, ako se ne dostigne vrijednost deformacije loma niti na jednom kraju lijepljenog spoja [5]. Autori navode da bi možda nosivost u numeričkom modelu ostala konstantna, ali se za potrebe provođenja eksperimentalnih ispitivanja, kako bi se povećala debljina sloja ljepila, srednji polumjer spoja smanjivao jer je jednostavnije bilo obraditi čelični umetak (unutarnja spajana pozicija) na manju dimenziju nego kompozitnu cijev (vanjska spajana pozicija) na veću, pa su se, radi vjerodostojnosti, odnosno mogućnosti uspoređivanja numeričkih s eksperimentalnim rezultatima, na taj način kreirali i modeli za numerički proračun.

Iz slike 7. se može zaključiti, uspoređujući rješenja dobivena načinima *a)* i *b)* s eksperimentalno dobivenima *c)*, da se niti za jedan od korištenih modela ne može reći da daje potpuno zadovoljavajuće rezultate, međutim, vidljivo je da numerički model, *b)*, u kojemu su korištena elastično-savršeno plastična svojstva materijala barem pokazuje odgovarajući trend nosivosti s obzirom na promjenu debljine sloja ljepila.

Radi daljnjih razmatranja i korištenja te tvrdnje kao polazne u ovom radu, korisno bi još bilo napomenuti, a što je također vidljivo iz slike 7. i navedeno u [5], da linearno elastični model materijala ljepila podcjenjuje nosivost stvarnog spoja za manje debljine sloja ljepila. U slučaju ljepila korištenog u [5], prema slici 7. vidljivo je da je ova granica na otprilike 0,35 mm. U [10], gdje je provedeno eksperimentalno ispitivanje i potom dano numeričko rješenje metodom konačnih elemenata (MKE), potvrđen je zaključak koji je u istom radu, u uvodnom dijelu, naveden kao važan prethodno donesen zaključak od strane brojnih drugih istraživača u njihovim radovima, među kojima je i rad [5]. Spomenuti je zaključak da se podudaranje numeričkih rješenja s eksperimentalnim rezultatima može ostvariti samo i jedino korištenjem nelinearnog materijalnog konstitutivnog modela ljepila u numeričkoj analizi. Slikom 8. prikazane su, usporedno, stvarna, eksperimentalno dobivena krivulja ovisnosti smičnog naprezanja o kutnoj deformaciji i trima pravcima aproksimirana krivulja koja je poslužila prilikom numeričkih proračuna. Ovakav opis materijala kombinacija je ranije navedenih, a moglo bi ga se nazvati bi-linearno - idealno plastični model.



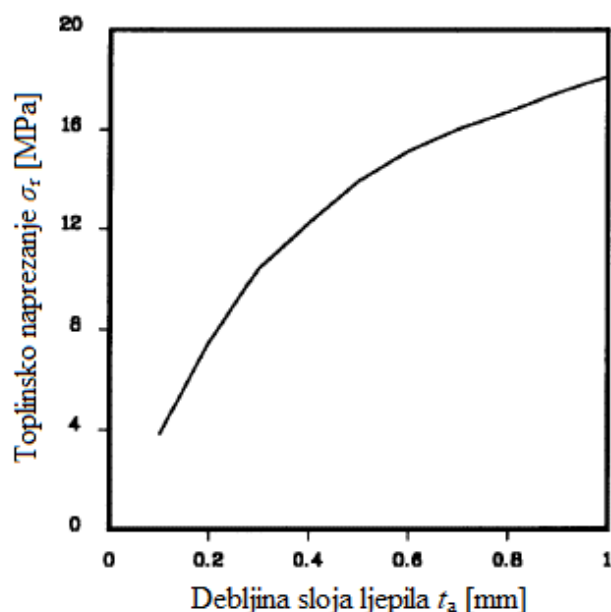
Slika 8. Usporedni prikaz eksperimentalno dobivene i pravcima aproksimirane krivulje smičnog napreznja u ovisnosti o deformaciji [10]

Prema [10], na ovaj način, za ispitivane spojeve ostvarena su vrlo dobra podudaranja numeričkih rezultata s eksperimentalnima – odstupanja su bile unutar 10%. U [10] je također donesen zaključak da nosivost spoja opada porastom debljine sloja ljepila, odnosno raste smanjivanjem debljine sloja ljepila.

S obzirom na rezultate i zaključke iz [5] i [10] te prema ostalim izvorima koji su u ovim radovima navedeni, može se zaključiti da prilikom pokušaja točnijeg određivanja nosivosti lijepljenih spojeva ustvari nije efikasno koristiti analitičke izraze dobivene teoretskim razmatranjima, jer ona pretpostavljaju linearno elastična svojstva materijala ljepila, što nije slučaj u realnim uvjetima.

U [5] su razmatrana i zaostala toplinska napreznja u ljepilu. Naime, kako bi se smanjila viskoznost ljepila i skratilo vrijeme potrebno za sušenje spoja, lijepljeni se spojevi često suše na povišenim temperaturama, što može rezultirati pojavom značajnih zaostalih toplinskih napreznja. Stoga je u [5] promatran utjecaj temperature sušenja spoja, odnosno razlike u temperaturi spajanja pozicija i sušenja samog spoja, te utjecaj debljine sloja ljepila na pojavu zaostalih toplinskih napreznja. Slikom 9. dan je prikaz numerički dobivenih zaostalih vlačnih toplinskih napreznja u sloju ljepila, u ovisnosti o debljini sloja ljepila, za razliku u

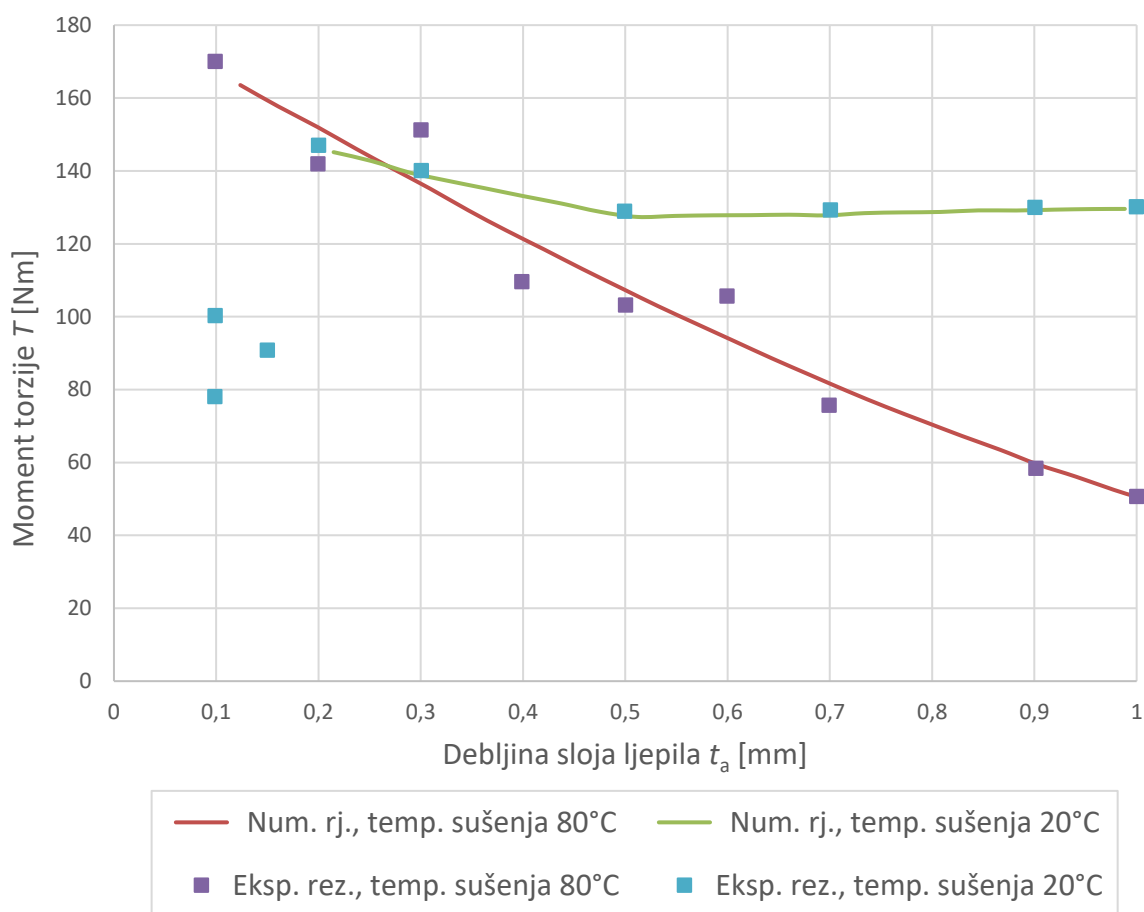
temperaturi spajanja pozicija (20°C) i sušenja spoja (80°C) od 60°C. U nastavku je dokazana vjerodostojnost provedene numeričke analize zaostalih toplinskih naprezanja.



Slika 9. Numerički (MKE) dobivena zaostala toplinska naprezanja u ovisnosti o debljini sloja ljepila [5]

Iz slike 9. je vidljivo da zaostala vlačna toplinska naprezanja rastu s povećanjem debljine sloja ljepila. Štoviše, za debljinu sloja ljepila od 1 mm zaostala toplinska naprezanja iznose gotovo jednu trećinu vlačne čvrstoće promatranog ljepila [5]. Dakle, u slučaju korištenja većih debljina sloja ljepila zaostala bi se toplinska naprezanja svakako trebala uzeti u obzir prilikom proračuna [5].

U svrhu daljnje analize i pokušaja smanjivanja toplinskih naprezanja, provedena su kako numerička tako i eksperimentalna ispitivanja i za slučaj spajanja pozicija te sušenja spoja na istoj temperaturi: 20°C, odnosno za slučaj kada nema spomenute razlike u temperaturama spajanja i sušenja. Na slici 10. su prikazane numerički dobivene krivulje i eksperimentalno dobiveni rezultati za odgovarajuće postavke, za navedena dva slučaja razlika u temperaturi – odnosno, kako je na slici 10. označeno, za različite temperature sušenja. U oba slučaja pozicije su spajane na sobnoj temperaturi (20°C).



Slika 10. Nosivost spoja za različite temperature sušenja spoja u ovisnosti o debljini sloja ljepila [5]

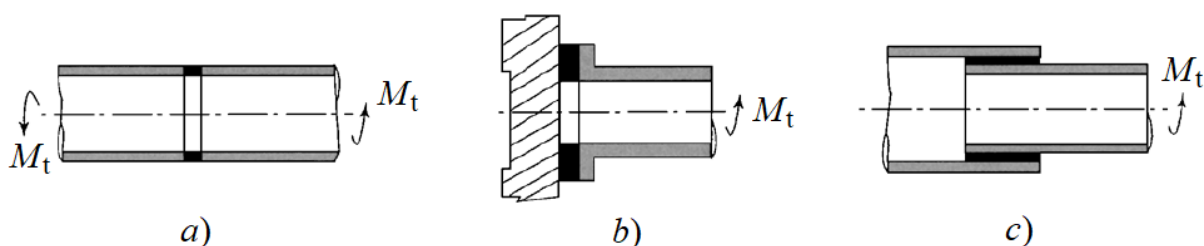
Iz slike 10. je vidljivo da je za debljine sloja ljepila veće od 0,3 mm nosivost spoja veća kada je spoj sušen na sobnoj temperaturi (20°C), a ta razlika postaje još izraženija za debljine sloja ljepila preko 0,5 mm [5]. Iz slike je također vidljivo i da je numerička analiza u boljoj suglasnosti sa eksperimentalnim rezultatima za spojeve sušene na temperaturi od 20°C [5].

Međutim, kako je iz slike 10. vidljivo, prema eksperimentalnim rezultatima nosivost spojeva s debljinom sloja ljepila manjom od 0,2 mm koji su sušeni na 20°C drastično pada, te je do loma došlo na međuspoju [5]. Daljnjim razmatranjem ovog fenomena autori su došli do zaključka da, zbog njegove veće viskoznosti pri temperaturi od 20°C, ljepilo u slučaju njegove male predviđene debljine (< 0,2 mm) ne može adekvatno penetrirati u mikroneravnine spajanih pozicija, čime bi se ostvarile dovoljne adhezivne sile, odnosno postigao zadovoljavajući lijepljeni spoj [5].

Iz svega navedenoga, lako je zaključiti da bi se lijepljeni spojevi, za postizanje optimalnih rezultata, trebali konstruirati na način da je debljina sloja ljepila što manja, a sam spoj trebao bi se sušiti na povišenoj temperaturi.

3.1.2. Odabir geometrijskog oblika lijepljenog spoja

Slikom 11. shematski su prikazani teoretski mogući načini adhezivnog spajanja kompozitne cijevi s NTK.



Slika 11. Mogući načini adhezivnog spajanja opterećene kompozitne cijevi [2]

Slikom 11. pod *a*) prikazani način adhezivnog spajanja nije ispravan jer je površina ljepila koja prenosi opterećenje nedostatna. Način spajanja prikazan slikom 11. pod *b*) omogućava povećanje nosive površine lijepljenog spoja ali u samom sloju ljepila deformacije neće biti jednake u radijalnom smjeru [2]. Uz to, ovaj oblik spoja zahtijevao bi, kao što je iz slike vidljivo, komplicirani oblik ruba kompozitne cijevi. Oblik spoja dan na slici 11. pod *c*) predstavlja optimalan oblik ovakvog spoja – nosiva površina dovoljno je velika, a deformacije u sloju ljepila bit će izjednačene. Ovaj spoj naziva se jednostruki preklopni (eng. *Lap joint*, *Single lap joint*) i odabran je kao najpovoljnija opcija.

3.1.3. Utjecaj hrapavosti površina

Odgovarajućom obradom površina spajanih pozicija moguće je utjecati na nosivost lijepljenog spoja. Postizanjem odgovarajuće hrapavosti površina metodama odvajanja čestica i zatim čišćenjem lijepljenih površina utječe se na mogućnost disperzije ljepila u pore lijepljenih površina kapilarnim silama, a samim time i na ostvarivanje adhezivnih sila te nosivost spoja. Radi potencijalne izrade pozicija, korisno je stoga spomenuti i razmatranja vezana uz hrapavost površine, iako hrapavost za potrebe kako analitičkog, tako i numeričkog modeliranja nema nikakav značaj zbog nemogućnosti njezinog implementiranja u proračunske modele. Prema [10] i [15], najveća nosivost jednostrukih preklopnih lijepljenih

spojeva opterećenih na torziju postiže se obradom površina na srednje aritmetičko odstupanje profila u rasponu $R_a = 1,5 \dots 2,0 \mu\text{m}$.

U [10] se predlaže, za poboljšanje nosivosti lijepljenog spoja, prije nanošenja samog ljepila, uranjanje spajanih površina u smjesu dušične kiseline i etilnog alkohola u volumnim udjelima 1 : 9 i zatim držanje u trajanju do pet minuta. Na taj način nastaju nove mikroneravnine koje pomažu mehaničkom vezivanju ljepila i spajanih pozicija.

3.1.4. Karakteristike razmatranog lijepljenog spoja

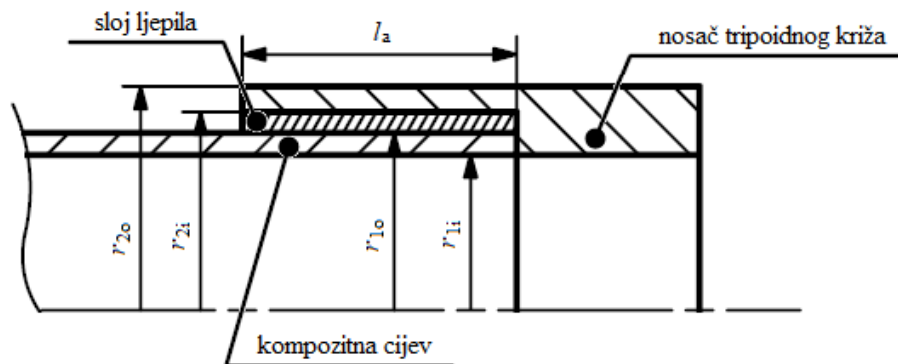
Dakle, zbog svih zaključaka koji su ranije navedeni, a prethodno dobiveni od strane brojnih autora, prilikom odabira parametara lijepljenog spoja poželjno je debljinu sloja ljepila održati što je manjom moguće, prilikom čega je njena najmanja vrijednost ograničena zahtjevom za potpunim prekrivanjem površina slojem ljepila.

Potrebno je naglasiti da se sva provedena istraživanja, koja su ovdje poslužila kao generalne smjernice, moraju uzeti u obzir s određenim oprezom. Naime, niti u jednom istraživanju nije korištena potpuno identična kombinacija materijala onoj koja se koristi u razmatranom slučaju, a što može biti od određenog značaja na rezultate ispitivanja, odnosno neposredno i na nosivost spojeva. Uz to, razlike u načinu proizvodnje spajanih pozicija, obradi i pripremi površina te izradi (sklapanju) samog spoja također su varijable koje je teško kvantificirati, odnosno uzeti u obzir tijekom konstruiranja.

Kada bi za to postojale mogućnosti, za ostvarivanje najtočnijih rezultata numeričke analize, odnosno predviđanja nosivosti spoja, idealno bi bilo nekom od standardiziranih metoda ispitivanja mehaničkih svojstava ljepila, npr. ASTM 3165-07, odrediti krivulju ovisnosti deformacija i naprezanja za smično opterećenje pozicija. Pritom bi ispitivani spoj trebao biti lijepljen odabranim ljepilom i sastavljen od pozicija napravljenih iz predviđenih materijala – ugljičnim vlaknima ojačanog kompozita oznake T700/DT120 i čelika K600 proizvođača Böhler, čiji je ekvivalent prema ISO/EN normi: X45NiCrMo16. Uz pomoć dobivene krivulje mogla bi se u odabrani programski paket, *Abaqus/Standard*, unijeti nelinearna svojstva ljepila, koja bi vjerodostojno opisivala ponašanje stvarnog materijala, aproksimiranjem eksperimentalno dobivene krivulje određenim brojem pravaca.

U ovom proračunu pretpostavljeno je linearno elastično ponašanje materijala ljepila čime se, s obzirom na odabranu debljinu sloja ljepila (koja će biti dana sljedećom točkom), ostaje na strani sigurnosti, odnosno, nosivost spoja dobivena na ovaj način je podcijenjena.

Slikom 12. dan je, u presjeku, polovični prikaz predviđenog izgleda spoja. Na skici su označene spajane pozicije i kotirane veličine koje ulaze u analitički proračun. Na slici 12. prikazano lijevo rubno područje lijepljenog spoja u nastavku je zvano slobodnim rubom, a desno rubno područje zatvorenim krajem lijepljenog spoja.



Slika 12. Polovični prikaz predviđenog izgleda spoja u presjeku

3.2. Tehničke karakteristike odabranog ljepila

Za lijepljenje spojeve, zbog njegove vrlo visoke smične čvrstoće i postojanosti pri povišenim temperaturama, odabrano je akrilno ljepilo DP8405NS Green proizvođača Scotch Weld / 3M. Mehanička svojstva ljepila koje će u proračunu biti korišteno su prema [16] kako slijedi:

$$\begin{aligned} E_a &= 1344,48 \text{ MPa,} \\ \tau_{\xi} &= 25,51 \text{ MPa, i} \\ \tau_{\text{CFRP}} &= 29,65 \text{ MPa,} \end{aligned} \quad (3.4)$$

gdje je E_a modul elastičnosti, τ_{ξ} smična čvrstoća prilikom lijepljenja s čelikom, a τ_{CFRP} smična čvrstoća prilikom lijepljenja s ugljičnim vlaknima ojačanom polimernom smolom. Korisno je napomenuti da su izrazom (3.4) dane čvrstoće prema [16] dobivene za debljinu sloja ljepila $t_a = 0,254 \text{ mm}$. Iz gornjih podataka vidljivo je također da će kritična biti čvrstoća ljepila u kontaktu s čelikom, pa će stoga upravo ona biti korištena u proračunu.

Za uporabu navedenog ljepila u kontaktu s čelikom nisu pronađeni podaci o smičnoj čvrstoći u ovisnosti o temperaturi. Stoga će, u svrhu ovog istraživanja, kao referentna ovisnost poslužiti u [16] dana ovisnost smične čvrstoće korištenog ljepila o temperaturi za kontakt s aluminijem. Za slučaj okolišnih uvjeta koji najbolje odgovaraju predviđenima tijekom rada poluvratila, smična čvrstoća ljepila u kontaktu s aluminijem je prema [16]:

$$\tau_{\text{Al}, \vartheta=49^\circ\text{C}, \varphi=80\%} = 0,85 \cdot \tau_{\text{Al}}. \quad (3.5)$$

Kako su predviđena temperatura rada i relativna vlažnost zraka ustvari niže od vrijednosti navedenih u izrazu (3.5), a uz to je već odabran velik faktor sigurnosti kroz faktor udara, bit će bez korekcije korišten postotak čvrstoće dan u (3.5). Konačno, smična čvrstoća ljepila u kontaktu sa čelikom, u uvjetima povišene temperature i relativne vlažnosti zraka, odabrana je kao:

$$\tau_{\zeta, \vartheta=49^{\circ}\text{C}, \varphi=80\%} = 0,85 \cdot \tau_{\zeta} = 0,85 \cdot 25,51 = 21,7 \text{ MPa.} \quad (3.6)$$

Kako se prema [8] prilikom analitičkog (a i numeričkog) proračuna ljepilo smatra izotropnim linearno elastičnim materijalom, za potpuni opis materijala ljepila nedostaje još njegov Poisson-ov faktor. Ova veličina za odabrano ljepilo nije dostupna, pa je prema [17] kao generička vrijednost za ljepila na akrilnoj bazi odabrano:

$$\nu_a = 0,4. \quad (3.7)$$

Prema [16], optimalna i preporučena debljina sloja odabranog ljepila je u granicama:

$$0,127 \text{ mm} < t_a < 0,508 \text{ mm}, \quad (3.8)$$

uz napomenu da se više smične čvrstoće postižu manjom debljinom sloja.

Također je, kao preporuka za čišćenje prilikom pripreme površina, za plastične materijale i čelike navedeno korištenje čistog izopropilnog alkohola [16].

3.3. Analitički proračun

Prije opisa proračunske procedure su predstavljeni korišteni izrazi i veličine koje se u njima javljaju.

Prema [8], uz manje izmjene izvorne notacije, izraz za raspodjelu smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja u sloju ljepila, prilikom opterećenja momentom torzije glasi:

$$\tau_a = \frac{T \cdot \alpha}{2 \cdot \pi \cdot a^2} \left[\left(\frac{1 - \psi(1 - \cosh(\alpha \cdot l_a))}{\sinh(\alpha \cdot l_a)} \right) \cdot \cosh(\alpha \cdot x) - \psi \cdot \sinh((\alpha \cdot x)) \right], \quad (3.9)$$

gdje su pojedini faktori:

$$\delta = \frac{2 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot r_{10} \cdot G_a}{G_1 \cdot J_1 \cdot t_a}, \quad (3.10)$$

$$\psi = \frac{G_2 \cdot J_2 \cdot r_{10}}{G_1 \cdot J_1 \cdot r_{2i} + G_2 \cdot J_2 \cdot r_{10}}, \quad (3.11)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\delta}{\psi}}. \quad (3.12)$$

Ostali su članovi koji se pojavljuju u izrazima (3.9), (3.10) i (3.11), redosljedom pojavljivanja:

$$a = \frac{r_{1o} + r_{2i}}{2} \quad - \text{srednji polumjer sloja ljepila, [mm];} \quad (3.13)$$

$$r_{1o} = r_v \quad - \text{vanjski polumjer unutarnje spajane pozicije (kompozitne cijevi), [mm];} \quad (3.14)$$

$$r_{2i} = r_{u,\check{c}} \quad - \text{unutarnji polumjer vanjske spajane pozicije (čeličnog NTK), [mm];} \quad (3.15)$$

$$t_a \quad - \text{debljina sloja ljepila, [mm];} \quad (3.16)$$

$$l_a \quad - \text{odabrana duljina lijepljenog spoja, [mm];} \quad (3.17)$$

$$x \quad - \text{duljina na primarnoj koordinatnoj osi (u smjeru pružanja cijevi i samog lijepljenog spoja), [mm];} \quad (3.18)$$

$$G_a = \frac{E_a}{2 \cdot (1 + \nu_a)} \quad - \text{modul smicanja ljepila, [N/mm}^2\text{];} \quad (3.19)$$

$$G_1 = G_{xy} \quad - \text{modul smicanja unutarnje spajane pozicije, [N/mm}^2\text{];} \quad (3.20)$$

$$G_2 \quad - \text{modul smicanja vanjske spajane pozicije, [N/mm}^2\text{];} \quad (3.21)$$

$$J_1 = \pi \frac{r_{1o}^4 - r_{1i}^4}{2} \quad - \text{polarni moment tromosti unutarnje spajane pozicije, [mm}^4\text{];} \quad (3.22)$$

$$J_2 = \pi \frac{r_{2o}^4 - r_{2i}^4}{2} \quad - \text{polarni moment tromosti vanjske spajane pozicije, [mm}^4\text{];} \quad (3.23)$$

$$r_{1i} = r_u \quad - \text{unutarnji polumjer unutarnje spajane pozicije lijepljenog spoja, [mm] i} \quad (3.24)$$

$$r_{2o} = r_{v,\check{c}} \quad - \text{vanjski polumjer vanjske spajane pozicije lijepljenog spoja, [mm].} \quad (3.25)$$

Brojčane vrijednosti navedenih veličina definiranih prethodnim izrazima (3.13) – (3.25) prikazane su tablicom 2. Potrebno je ovdje napomenuti da sada, prije nastavljanja s proračunom, treba provjeriti zadovoljenost ranije prikazanih uvjeta danih pod (3.1) i (3.2), odnosno (3.3), kako bi se izraz (3.9) mogao koristiti. Određivanjem vrijednosti ovih kriterija za predviđene geometrijske karakteristike obaju spajanih pozicija, zaključuje se da su one kritične za unutarnju spajanu poziciju – kompozitnu cijev, stoga su u tablici 2. prikazane samo vrijednosti kriterija dobivene za uvjete, tj. geometrijske karakteristike kompozitne cijevi.

Tablica 2. Brojčane vrijednosti veličina relevantnih za lijepljeni spoj

a	[mm]	19,55
r_{1o}	[mm]	19,4
r_{2i}	[mm]	19,7
t_a	[mm]	0,3
l_a	[mm]	30
G_a	[N/mm ²]	395,44
G_1	[N/mm ²]	32596,49
G_2	[N/mm ²]	80769,23
J_1	[mm ⁴]	91303,87
J_2	[mm ⁴]	40835,76
r_{1i}	[mm]	17
r_{2o}	[mm]	20,5
β	[-]	10,3
R	[-]	0,0614

Dakle, usporedbom vrijednosti faktora β i R iz tablice 2. s graničnim vrijednostima danim izrazima (3.1) i (3.3), vidljivo je da su oba navedena uvjeta zadovoljena, odnosno predviđene su geometrijske karakteristike spoja takve da se izraz (3.9) može koristiti u proračunu.

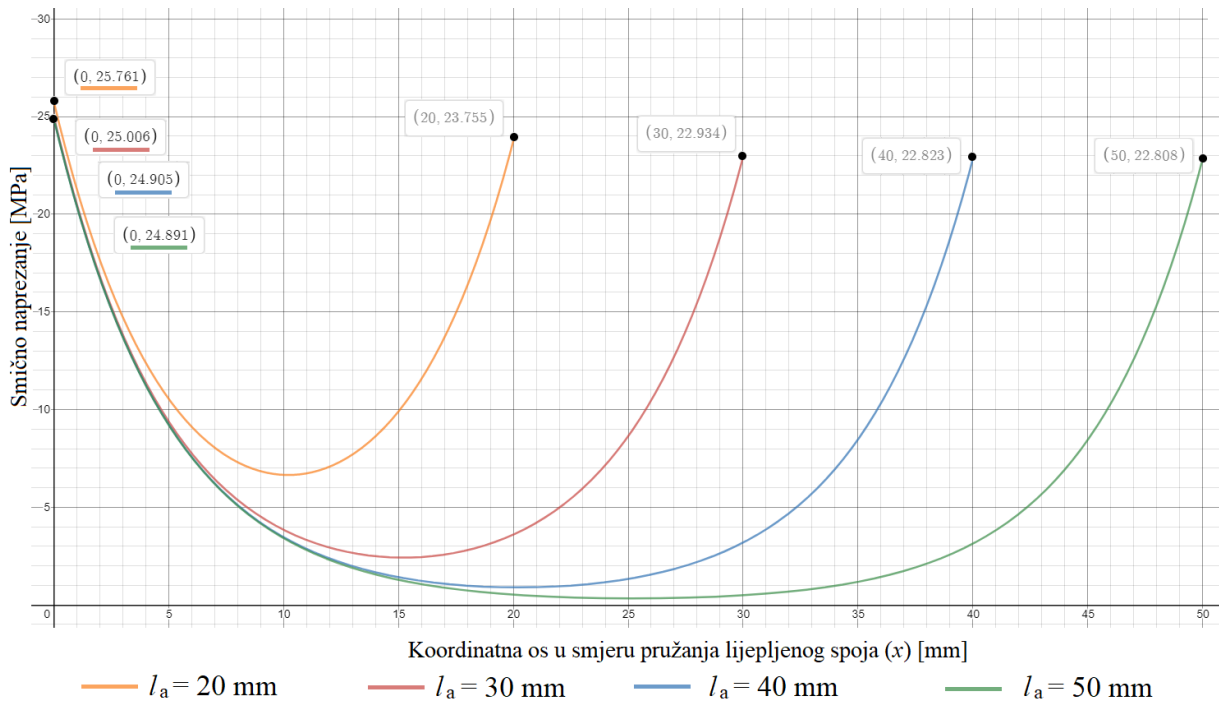
Radi jednostavnosti prilikom prethodnog provođenja iteracija, izraz (3.9), odnosno sve veličine koje u njega ulaze, uvedeni su u proračunski model napravljen unutar programskog paketa *Microsoft Excel*, čime su sve varijable povezane te je omogućeno praćenje promjena u raspodjeli smičnog naprezanja variranjem pojedinih dimenzija.

Za prikaz same raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja korištena je internetska stranica *Desmos* [18]. Ovako dobiveni rezultati prikazani su pod točkom 3.3.1.

Dobivanje raspodjele pomoću spomenutog online programa vrlo je jednostavno. U za to predviđeno polje navedene stranice potrebno je unijeti čitavu funkciju danu izrazom (3.9) sa svim brojčanim vrijednostima koje su unesene i izračunate u spomenutom dokumentu programskog paketa *Microsoft Excel*, prilikom čega veličina x ondje ostaje kao varijabla kojom se program koristi za ispisivanje raspodjele.

3.3.1. Prikaz raspodjele naprezanja

Slikom 13. dan je krivuljom crvene boje grafički prikaz izraza (3.9) s uvrštenim svim odabranim bročanim vrijednostima koje su ranije prikazane izrazima (3.10) – (3.25). Pored ove raspodjele, na slici 13. prikazane su i raspodjele naprezanja za druge duljine lijepljenog spoja, iz čega je vidljiv utjecaj duljine lijepljenog spoja na raspodjelu smičnog naprezanja.



Slika 13. Utjecaj duljine lijepljenog spoja na raspodjelu smičnog naprezanja

Upravo pomoću ovako dobivenih raspodjela, varijacijom vrijednosti pojedinih dimenzija, odnosno parametara spoja, dobiveni su sljedeći zaključci koji se mogu pronaći i u [1], [5], [6]:

- na rubovima lijepljenog spoja javljaju se značajne koncentracije naprezanja,
- lijepljene spojeve neispravno je dimenzionirati pomoću poznatog izraza za srednju (prosječnu) vrijednost smičnog naprezanja koje u realnim uvjetima ne postoji, već se čitav lijepljeni spoj dimenzionira s obzirom na rubne vrijednosti naprezanja,
- duljina lijepljenog spoja, u određenim granicama, ne utječe značajno na raspodjelu naprezanja, odnosno nosivost spoja.

Iz slike 13. vidljivo je da daljnjim povećanjem duljine lijepljenog spoja (iznad odabranih 30 mm) naprezanja na rubovima spoja ne opadaju značajno već se najveća razlika vidi u naprezanjima na sredini spoja, što je zaključeno i u [6]. Kako je prosječno naprezanje za odabranu duljinu zadovoljavajuće nisko, a s obzirom na posljedično povećanje mase sklopa,

povećanje duljine lijepljenog spoja neće rezultirati optimizacijom spoja. Iz slike je također vidljivo i da smanjenjem duljine lijepljenog spoja rubna naprežanja značajnije rastu, a uz to se i prosječno naprežanje znatno povećava, pa stoga ni smanjenje duljine ne donosi odgovarajuće prednosti.

3.4. Numerički proračun

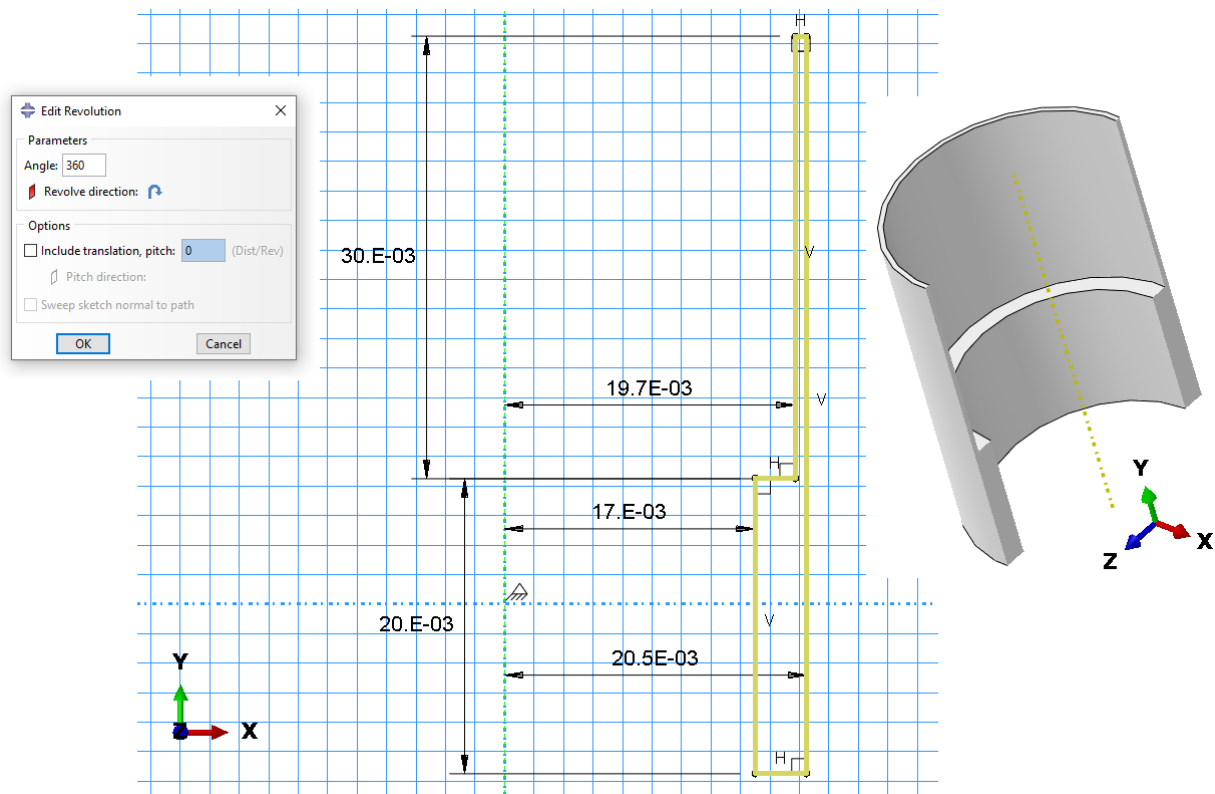
Numeričke analize bit će provedene koristeći komercijalni programski paket *Abaqus/Standard*. Radi jednostavnosti, u ovom radu detaljno je iznesen jedino postupak modeliranja sloja ljepljiva i njegovih interakcija sa spajanim pozicijama.

3.4.1. Model kompozitne cijevi

Za analizu lijepljenog spoja koristit će se model kompozitne cijevi s 3D geometrijom (*Continuum Shell* pristup). Opis modeliranja kompozitne cijevi nadilazi predviđeni opseg ovoga rada, pa stoga ovdje nije prikazan. Svi potrebni podaci koji opisuju ponašanje kompozitnog sloja sastavljenog od ugljičnih vlakana T700 i epoksidne smole DT120 preuzeti su iz [1], gdje se nalazi i detaljan opis načina modeliranja kompozitne cijevi. Dimenzije, odnosno vanjski i unutarnji promjer cijevi već su dani tablicom 1., a odabrana duljina modela koji ju predstavlja već je navedena pod (2.1). Za modeliranje kompozitne cijevi korišteni su konačni elementi SC8R prosječne veličine 2,5 mm pomoću kojih je generirana mreža od ukupno 2806 elemenata.

3.4.2. Model nosača tripoidnog križa

Kreiranje modela pozicije od izotropnog, homogenog materijala, zbog jednostavnosti postupka, također je izostavljeno. Slikom 14. prikazan je profil koji će, rotacijom oko središnje osi stvoriti potreban model. Na slici 14. je, uz sam profil prikazan i njegovom rotacijom oko središnjice nastao model, u uzdužnom presjeku.



Slika 14. Profil NTK čijom rotacijom oko središnje osi nastaje geometrijski model, dimenzije u [m]

Ovaj način kreiranja geometrijskog modela rotacijom oko središnje osi korišten je, radi praktičnosti, i kasnije prilikom modeliranja NTK i sloja ljepila kao složenijih geometrijskih tijela.

U ovom, inicijalnom, dijelu istraživanja korištene su dimenzije geometrije koje su definirane u tablici 1., a duljina dijela na kojem se ostvaruje lijepljeni spoj uzeta je kako je prethodno određeno i prikazano izrazom (3.17).

Donji dio profila prikazan slikom 14. simulira na pojednostavljen način ozubljenje kojim se sa njegovog nosača opterećenje prenosi na tripoidni križ. Na navedeni donji dio profila, točnije na donju, ravnu površinu kreiranog cilindričnog modela, postavljen je rubni uvjet uklještenja.

Samo ozubljenje za prijenos torzijskog opterećenja sa nosača na tripoidni križ definirano je kupljenim tripoidnim križevima pa ono stoga, radi jednostavnosti, nije ovdje provjereno niti uključeno u proračunski model.

Za opisivanje NTK korištena je mreža od 13200 konačnih elemenata C3D8R prosječne veličine 1 mm.

3.4.3. Model sloja ljepila

3.4.3.1. Mogućnosti numeričkog modeliranja lijepljenog spoja u Abaqus-u

Korištenjem programskog paketa *Abaqus/Standard* lijepljeni spoj, odnosno sam sloj ljepila, moguće je modelirati na dva načina, tj. dvama pristupima [19].

U slučaju korištenja vrlo tankog sloja ljepila (npr. u kombinaciji sa steznim spojem), kada se njegovu debljinu može zanemariti, moguće je modeliranju pristupiti korištenjem tzv. *Cohesive Interaction Behavior / Cohesive Contact* [19]. Na ovaj način nije potrebno stvoriti fizički model sloja ljepila, a same spajane pozicije modeliraju se kao da između njih ne postoji ljepilo – površine predviđene za lijepljenje su modelirane na identičnu dimenziju. U [20] i [21] su provedene numeričke analize koristeći ovaj pristup, a podudaranje rezultata s eksperimentalno dobivenima je zadovoljavajuće.

Iako jednostavniji, ovaj pristup ne dozvoljava korištenje različitih gustoća mreža konačnih elemenata [19], a uz to ne omogućuje niti analizu lijepljenih spojeva složenije geometrije – npr. spoja s promjenjivom debljinom sloja ljepila, koji je razmatran kasnije u ovom radu.

Drugi pristup obuhvaća kreiranje geometrijskog modela samog sloja ljepila i korištenje kohezivnih elemenata. Zatim, kako bi se u potpunosti definirao model, provodi se, uz neke specifičnosti, postupak analogan onome koji bi se koristio za opisivanje standardnog modela konačnih elemenata. Ovaj pristup korišten je u [22], gdje je dokazano vrlo dobro predviđanje nosivosti.

Ovaj pristup omogućuje korištenje različitih gustoća mreža konačnih elemenata na spajanim pozicijama i promjenjivu debljinu sloja ljepila [19].

Različita gustoća mreža konačnih elemenata omogućuje točnije određivanje stanja naprezanja u samom ljepilu (gušća mreža), i uz veću računalnu učinkovitost smanjivanjem broja konačnih elemenata spajanih pozicija.

Kako je odabrana debljina ljepila znatno veća od nule, uz navedene prednosti koje on osigurava, u ovom je istraživanju odabran drugi pristup modeliranju lijepljenih spojeva, pomoću kohezivnih elemenata.

3.4.3.2. Posebnosti kohezivnih elemenata

Modeliranje sa kohezivnim elementima sastoji se prema [19] od:

- odabira odgovarajućeg tipa kohezivnih elemenata,
- uključivanja kohezivnih elemenata u model (sklop) aproksimiran mrežom konačnih elemenata, njihovo povezivanje sa okolnim pozicijama i razumijevanje tipičnih problema koji se javljaju prilikom modeliranja s kohezivnim konačnim elementima,
- definiranja inicijalne geometrije kohezivnih elemenata,
- definiranja mehaničkog konstitutivnog ponašanja kohezivnih elemenata.

Abaqus/Standard u svojoj bazi podataka nudi brojne kohezivne elemente za modeliranje ponašanja adhezivnih spojeva, međuslojeva kompozita, brtvenih masa, lomova kamenja i mnogih drugih problema u kojima su integritet i čvrstoća spojnih zona predmet razmatranja [19]. Razmatranje širenja pukotina (lomova) također je moguće [19].

Konstitutivni odziv ovih elemenata ovisi o specifičnoj primjeni te je osnovan na određenim pretpostavkama o stanju deformacija i naprezanja koje odgovaraju pojedinim područjima primjene [19]. Tako se mehanički konstitutivni odziv, odnosno ponašanje kohezivnih elemenata prema [19] može definirati:

- konstitutivnim modelom baziranim na odzivu kontinuuma – modeliranje adhezivnih slojeva konačne debljine,
- konstitutivni model osnovan na stanju jednoosnog naprezanja – modeliranje brtvi i/ili malih adhezivnih površina,
- konstitutivni model definiran direktno u smislu odnosa naprezanje-razdvajanje – definiranje konstitutivnog odziva kohezivnih elemenata za opis adhezivnih slojeva zanemarive debljine.

Prilikom korištenja kohezivnih elemenata za opis pozicije konačne debljine, moguće je koristiti bilo koji model materijala u bazi podataka *Abaqus-a*, a moguće je i ručno unijeti specijalan model ponašanja materijala [19].

Barem jedna – gornja ili donja – površina kohezivnih elemenata mora biti povezana s okolnim pozicijama razmatranoga sklopa [19]. U većini primjena prikladno je definirati veze s okolnim pozicijama na obje površine kohezivnih elemenata. S odgovarajućim pozicijama u sklopu mogu se povezati zajedničkim čvorovima mreža konačnih elemenata te koristeći

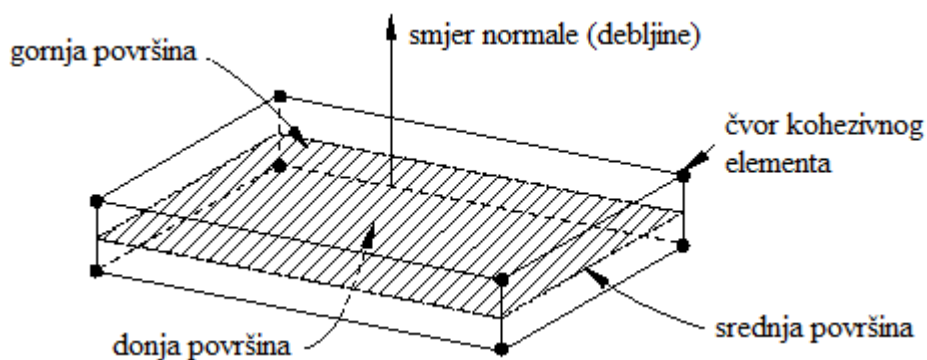
ograničenja tipa *Tie* primijenjena na same geometrijske modele ili mreže konačnih elemenata koje navedene modele opisuju [19]. Prilikom njihovog korištenja u svrhu razmatranja brtvenog djelovanja, interakcija s ostalim pozicijama sklopa može se opisati definiranjem kontakta. Važno je još napomenuti kako je prilikom diskretizacije neke pozicije kohezivnim konačnim elementima nužno i potrebno koristiti samo jedan sloj ovih elemenata kroz debljinu [19].

Početna geometrija kohezivnih elemenata je prema [19] definirana:

- povezanošću čvorova konačnog elementa i njihovom pozicijom u prostoru,
- smjerom slaganja koji može biti korišten za definiranje smjera normale,
- veličinom početne konstitutivne debljine elementa, koja može biti zadana preko geometrijske debljine definirane položajem čvorova konačnog elementa ili direktnim unošenjem njezine veličine.

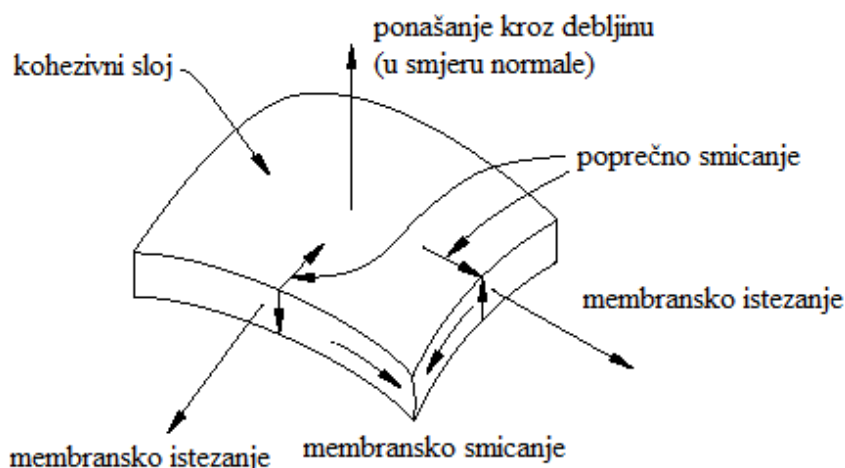
Kohezivni elementi bez stupnjeva slobode koji odgovaraju djelovanju tlaka fluida na poroznu stijenu spremnika (eng. *Pore pressure*) mogu biti korišteni u svim vrstama analiza koje razmatraju naprezanja i pomake [19]. Iako nemaju stupnjeva slobode osim pomaka u čvorovima, mogu biti korišteni i u analizama povezujući pozicije definirane konačnim elementima koji opisuju temperaturne pomake, kako bi simulirali mehanički lom međuslojeva u određenim uvjetima [19].

Slikom 15. prikazan je prizmatični 3D konačni element koji je korišten i u ovom istraživanju.



Slika 15. Prostorni prikaz prizmatičnog kohezivnog konačnog elementa [19]

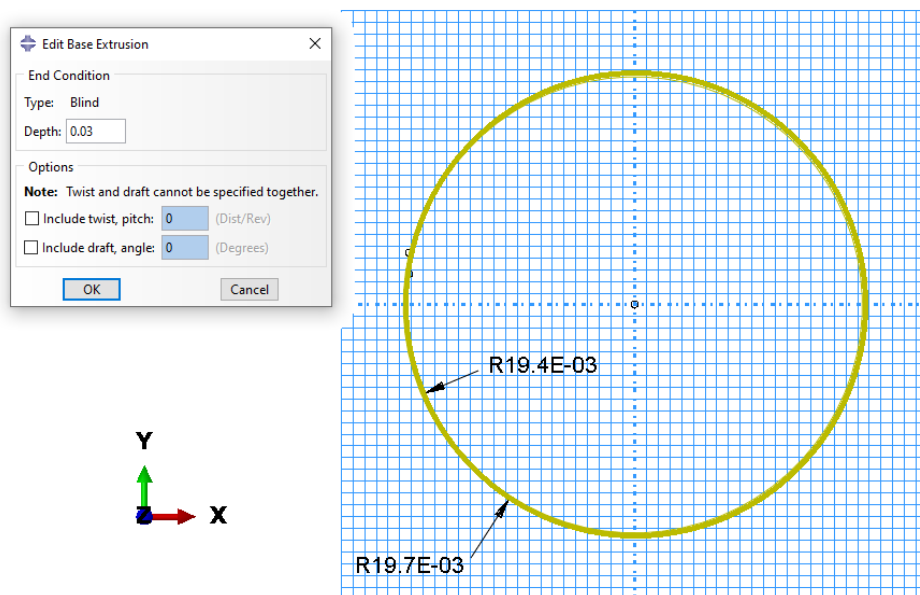
Forma je, u smislu povezanosti, kohezivnih konačnih elemenata jednaka onoj klasičnih konačnih elemenata za diskretizaciju kontinuuma, ali je prikladnije smatrati kohezivne elemente kao dvije granične površine – gornju i donju – odvojene debljinom konačnog elementa [19]. Slikom 16. dane su moguće deformacije kohezivnih elemenata prikazane na primjeru prizmatičnog kohezivnog elementa.



Slika 16. Mogućnosti deformiranja prizmatičnog kohezivnog konačnog elementa [19]

3.4.3.3. Kreiranje geometrije modela

Na slici 17. prikazan je profil geometrije ljepila, s označenim unutarnjim i vanjskim polumjerima. Izvlačenjem profila prikazanog slikom 17. u dubinu, za vrijednost ranije odabrane duljine lijepjenog spoja koja je prikazana izrazom (3.17), dobivena je geometrija numeričkog modela ljepila.



Slika 17. Profil sloja ljepila i njegova dubina izvlačenja, dimenzije u [m]

Na slici 17. dvije se kružnice ne razaznaju zbog njihove međusobne male razlike u promjeru.

3.4.3.4. Svojstva materijala ljepila

Prema pretpostavci koja je korištena i prilikom analitičkog proračuna, a koja slijedi iz [8], odabran je linearno elastičan model materijala. U polje za Young-ov modul upisuje se vrijednost dana izrazom (3.4), a za Poisson-ov faktor vrijednost prema izrazu (3.7).

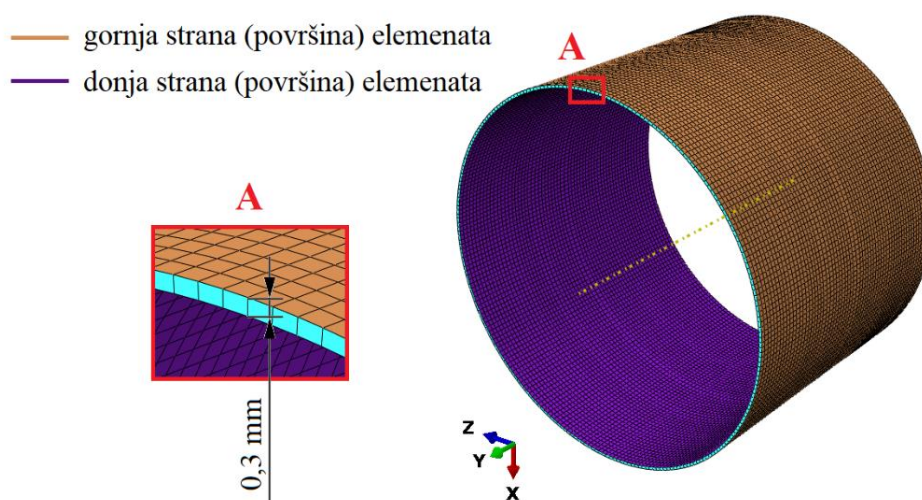
Zatim, potrebno je stvoriti tzv. kohezivni presjek koji definira odziv sloja ljepila u modelu. Radi predviđene debljine sloja ljepila i prema [6], [11], [12] očekivanog postojanja naprezanja, odnosno deformacija i izvan ravnine opterećenja, odabran je odziv *Continuum Response*, kako je preporučeno u [19].

Debljinu sloja ljepila moguće je ručno upisati ili omogućiti programskom paketu da ju odredi prema koordinatama čvorova konačnih elemenata i orijentaciji materijala, koju je potrebno naknadno definirati u modulu *Mesh*. S obzirom da je u ovom istraživanju kasnije korišten model promjenjive debljine, odabrana je već sada druga opcija određivanja debljine sloja.

3.4.3.5. Mreža konačnih elemenata

Odabrani su konačni elementi COH3D8 – prizmatični kohezivni elementi sa osam čvorova. Njegovi su stupnjevi slobode samo pomaci u pravcima osi koordinatnog sustava. Dostupnim opcijama potrebno je kontrolirati algoritme generiranja mreže konačnih elemenata te veličinu i ispravnost, odnosno kvalitetu pojedinih konačnih elemenata. Odabrana prosječna globalna veličina konačnih elemenata bila je 0,5 mm, što je rezultiralo generiranjem mreže od 14760 konačnih elemenata i ukupno 30012 čvorova.

Za postizanje valjanih rezultata, od iznimne je važnosti dodijeliti modelu ispravnu orijentaciju konačnih elemenata, tj. smjer slaganja i pružanja debljine elemenata (eng. *Mesh Stack Direction*). Prikaz ispravne orijentacije materijala, odnosno konačnih elemenata dan je slikom 18.

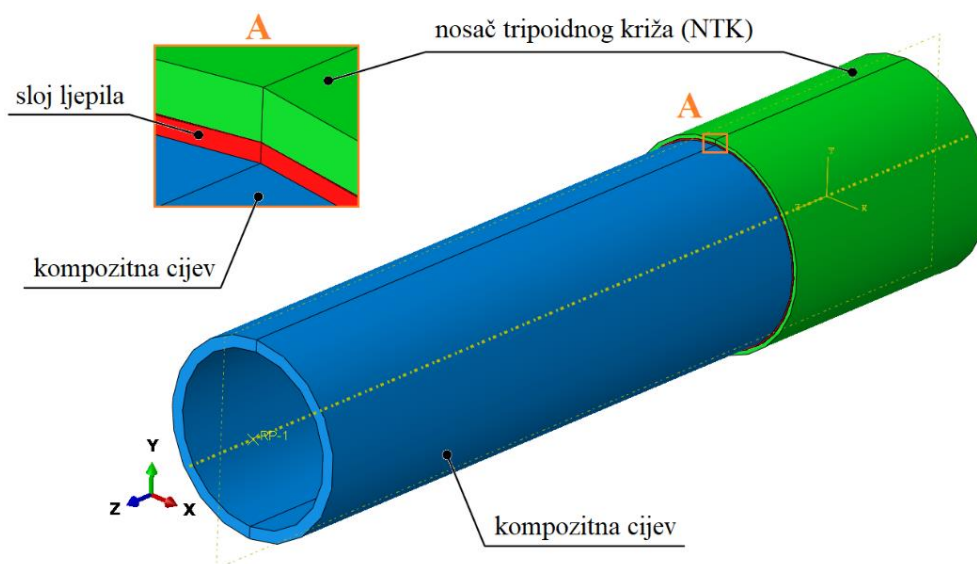


Slika 18. Mreža konačnih elemenata s definiranom orijentacijom na modelu sloja ljepila

3.4.4. Definiranje interakcija i ograničenja sklopa svih pozicija

3.4.4.1. Definicija sklopa numeričkog modela

Potrebno je najprije u numerički model sklopa dodati sve pozicije koje su ranije definirane. Nakon toga, potrebno je postaviti geometrijske veze između pozicija – dva ograničenja koja su korištena su *Coaxial* (koaksijalnost) i *Coincident Point* (dodirivanje točaka). Postavljanjem ova dva ograničenja za obje veze: cijev – sloj ljepila i sloj ljepila – NTK, sklop je potpuno definiran, a njegov konačan izgled prikazan je slikom 19.



Slika 19. Potpuno sklopljeni model

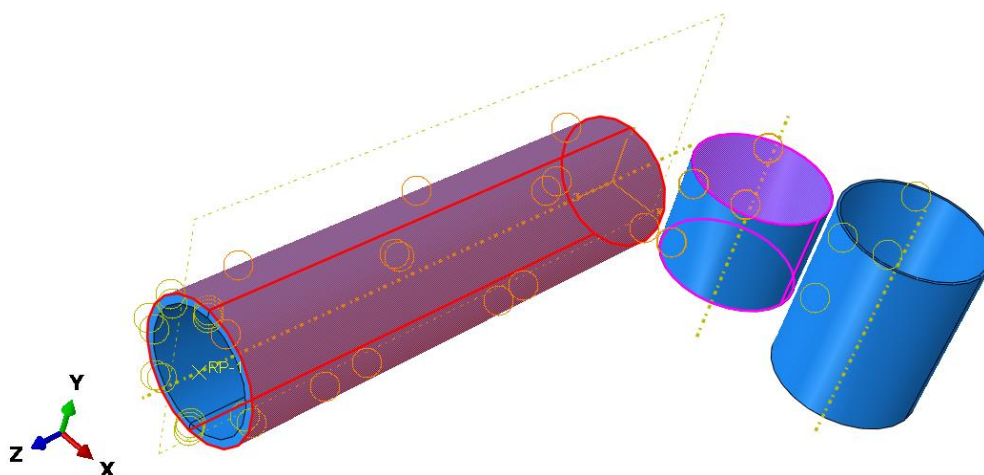
3.4.4.2. Modul Interaction – definiranje geometrijskih ograničenja i veza sklopa

Najprije treba na kompozitnoj cijevi definirati referentnu točku opterećenja i povezati ju sa rubom cijevi kako bi se kasnije omogućilo ispravno definiranje torzijskog opterećenja.

Sljedeće, potrebno je definirati međudjelovanje svih pozicija sklopa. Prema [19], lijepljeni spoj najbolje je opisati načinom međudjelovanja *Tie*. Dakle, definiraju se navedenom opcijom i ovdje dvije veze: veza cijev – sloj ljepila (veza 1) i veza sloj ljepila – NTK (veza 2). Prema [19], preporuča se površinu ljepila uvijek odabrati kao pomoćnu površinu.

Veza 1

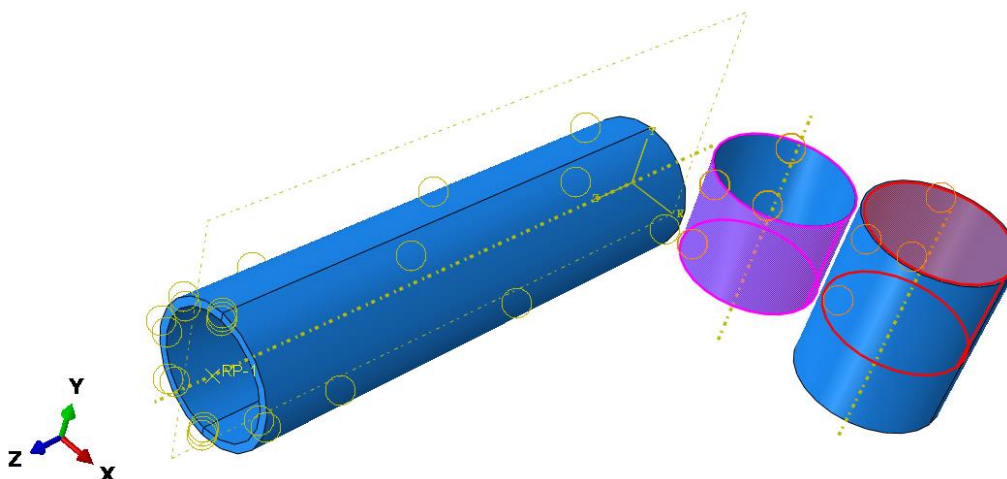
Ovaj odabir površina u kontaktu prikazan je slikom 20. Glavna će površina (crvena boja) biti vanjska površina kompozitne cijevi, a pomoćna je površina (ljubičasta boja) unutarnja površina modela sloja ljepila.



Slika 20. Postavljanje međuveze između kompozitne cijevi i sloja ljepila

Veza 2

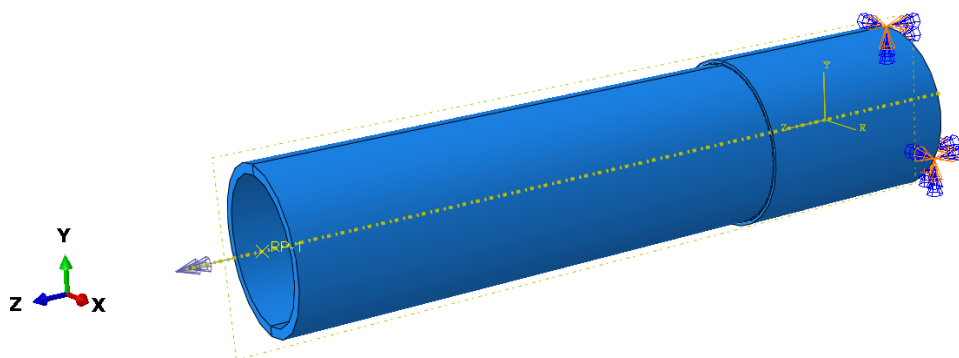
Glavna je površina (crvena boja) unutarnja površina NTK dok je pomoćna površina (ljubičasta boja) ovdje vanjska površina sloja ljepila. Odabir navedenih površina prikazan je slikom 21.



Slika 21. Postavljanje međuveze između sloja ljepila i NTK

3.4.4.3. Rubni uvjeti i opterećenje modela

Rubni uvjet uklještenja i opterećenje momentom torzije definiraju se prema slici 5. Opterećenje je zadano momentom torzije vrijednosti 576 Nm, što je produkt množenja ranije pod (2.1) definiranog momenta torzije i pogonskog faktora, čime je i opterećenje uneseno u proračunski model. Model sklopa sa definiranim opterećenjem i rubnim uvjetom prikazan je slikom 22.



Slika 22. Sklop sa prikazanim opterećenjem i rubnim uvjetom

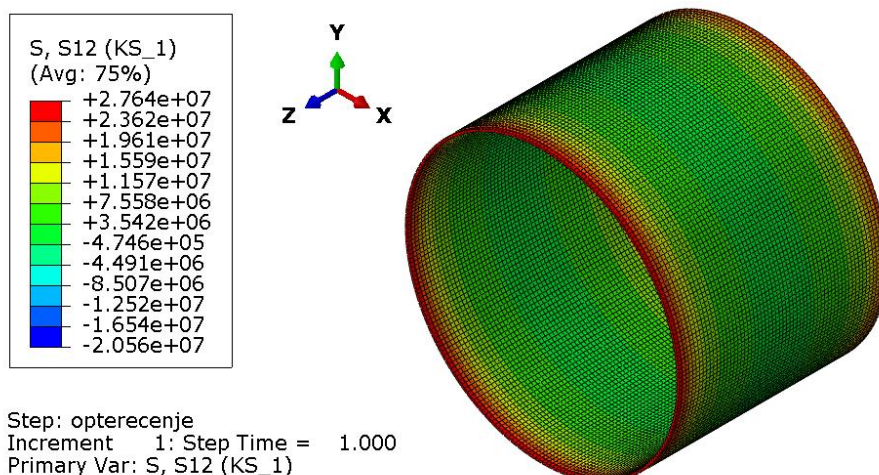
Ovime je u potpunosti definiran proračunski model pa je moguće sada provesti analizu i prikazati na ovaj način dobivene rezultate.

3.4.5. Prikaz numerički dobivene raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja

Rezultati u ovom poglavlju su prikazani u cilindričnom koordinatnom sustavu koji najbolje odgovara osnosimetričnim problemima poput ovoga.

Korisno je stoga pojasniti definiciju osi cilindričnog koordinatnog sustava, jer će on biti korišten i u nastavku. Dakle, prema [19], os R cilindričnog koordinatnog sustava pruža se u radijalnom smjeru te zamjenjuje os X odnosno 1 , a os T pruža se u tangencijalnom smjeru i mijenja os Y , odnosno os 2 kartezijevog koordinatnog sustava. Os z cilindričnog koordinatnog sustava ostaje uzdužna os kreiranog modela. Iz navedenih informacija lako je zaključiti da je u ovom istraživanju predmet razmatranja komponenta naprezanja S_{12} , koja se nalazi u ravnini $1 - 2$, odnosno $R - T$.

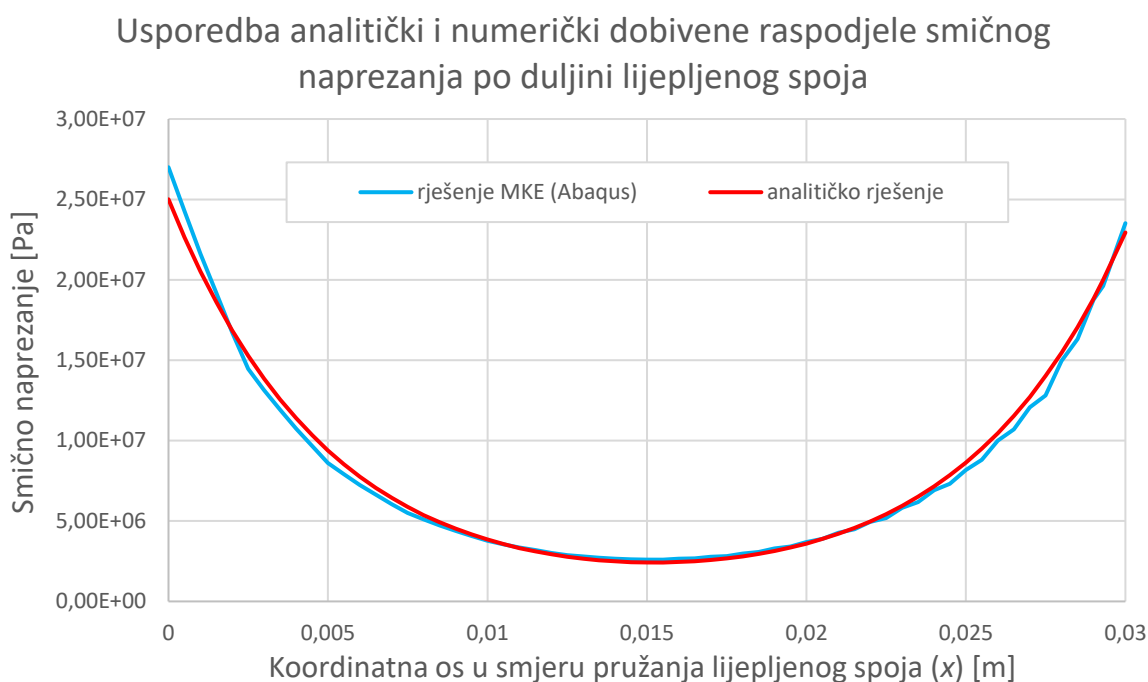
Slikom 23. dan je prikaz polja naprezanja u sloju ljepila. Radi preglednijeg prikaza polja naprezanja iz slike 23. uklonjeni su modeli kompozitne cijevi i NTK. Iz istog razloga odabrano je prikazati polja naprezanja na nedeformiranom modelu.



Slika 23. Numerički dobivena raspodjela smičnog naprezanja [Pa] u sloju ljepila

Da bi se numerički dobiveni rezultati mogli uspoređivati sa analitičkim, potrebno je prikazati raspodjelu ovog smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja, u smjeru osi z .

Usporedan prikaz numerički dobivene raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja sa prethodno analitički određenom dan je slikom 24.



Slika 24. Numerički dobivena raspodjela smičnog napreznja po duljini lijepljenog spoja

Iz slike 24. vidljivo je vrlo dobro podudaranje numeričkog rješenja s analitički dobivenim. Dakle, može se zaključiti kako je numerički model ispravan te će on poslužiti u daljnjim razmatranjima vezanim uz optimizaciju spoja, kako bi se postiglo zadovoljavajuće stanje napreznja.

3.5. Modifikacija spoja koristeći numerički proračun

Pažnja je u ovom dijelu istraživanja usmjerena na ispravno oblikovanje spoja, odnosno spajanih pozicija. Kao što će biti pokazano, postoje načini kojima se stanje napreznja može modificirati tako da se umanje koncentracije napreznja na krajevima spoja.

Uz duljinu lijepljenog spoja, već je ranije navedeno kako se ni dimenzije kompozitne cijevi neće mijenjati niti u jednom od ispitivanja. Također, za opisivanje pozicija se ni vrste korištenih konačnih elemenata neće mijenjati u odnosu na ranije predstavljene. Utjecaj promjene ostalih relevantnih dimenzija i postojanja određenih konstrukcijskih detalja najprije će se promatrati zasebno, a kasnije će se razmatrati njihovo međudjelovanje. Pritom svi parametri za koje nije drugačije naglašeno, ostaju jednaki onima koji su korišteni u prvoj provedenoj analizi (u nastavku „referentna analiza“) i dani izrazima (3.13) – (3.25). Stoga su u nastavku, radi preglednosti provedenog ispitivanja, ovisno o parametrima koji se u njima mijenjaju, sve numeričke analize koje su provedene u svrhu modifikacije spoja podijeljene u ispitne grupe.

3.5.1. Ispitna grupa I

Kako bi se ustanovila suglasnost rezultata dobivenih analizom kreiranog modela sa zaključcima koje su prethodno donijeli razni autori, a koji su u uvodnom poglavlju navedeni, u ovom poglavlju će biti provedene simulacije (analize) u kojima će se ispitivati utjecaj promjene debljine samog sloja ljepila na raspodjelu naprezanja. Pritom je potrebno, kako bi se debljina stijenke NTK održala jednakom, promijeniti i njegove dimenzije. Potrebno je još napomenuti da se na ovaj način ustvari mijenja i srednji polumjer lijepljenog spoja a koji ima utjecaja na raspodjelu smičnog naprezanja – njegovim porastom naprezanja se snižavaju po cijeloj duljini lijepljenog spoja. Zbog njegove relativno male promjene, ovaj je utjecaj zanemaren. Tablicom 3. je dan prikaz odabranih parametara koji su varirani, za svaku od pojedinih simulacija. U tablici se nalazi i broj konačnih elemenata u mrežama koje opisuju NTK i sloj ljepila.

Tablica 3. Prikaz parametara pojedinih simulacija ispitne grupe I

Broj analize	Debljina sloja ljepila, [mm] t_a	Polumjeri NTK a , [mm]		Broj konačnih elemenata, [-]	
		$r_{2i} = r_{u,\check{c}}$	$r_{2o} = r_{v,\check{c}}$	Sloj ljepila	NTK
I	0,13	19,53	20,33	14700	13090
II	0,3	19,7	20,5	14760	13200
III	0,5	19,9	20,7	15067	13200

Iz tablice 3. vidljivo je, prema korištenoj debljini sloja ljepila, da je analiza II upravo referentna analiza, čiji su rezultati već prikazani slikom 24.

U analizi I odabrana je najmanja debljina sloja ljepila prema rasponu danom pod (3.8), a koji slijedi iz [16].

Debljina sloja ljepila od $t_a = 0,3$ mm, koja je odabrana u analizi II, odnosno onoj prvotno provedenoj, osim što predstavlja srednju vrijednost preporučenog raspona debljine prema [16], odabrana je kao još uvijek relativno mala debljina koja osigurava kompaktnost sloja i smanjuje vjerojatnost nastanka većih šupljina i nepravilnosti nastalih sušenjem spoja, a ujedno i dovoljno velika debljina da se osigura potpuno prekrivanje površina ljepilom.

Konačno, veća debljina sloja ljepila, $t_a = 0,5$ mm, koja je korištena u analizi III, odabrana je kao najveća preporučena prema [16], što je također vidljivo iz izraza (3.8).

3.5.2. Ispitna grupa II

U ovoj ispitnoj grupi provjerit će se utjecaj dimenzija, odnosno debljine stijenke NTK koja utječe na njegovu krutost, a samim time i na nosivost spoja. Pritom je debljina sloja ljepila t_a nepromijenjena, a iznosi upravo 0,3 mm. Tablicom 4. prikazane su dimenzije NTK koje su izmijenjene u ovoj ispitnoj grupi te brojevi konačnih elemenata mreža koje opisuju NTK. Kako se model sloja ljepila nije mijenjao, broj je konačnih elemenata mreže koja ga opisuje ostao jednak u svim simulacijama ispitne grupe II.

Tablica 4. Prikaz parametara pojedinih simulacija ispitne grupe II

Broj analize	Polumjeri NTK, [mm]		Debljina stijenke NTK, [mm]	Broj KE (NTK), [-]
	$r_{2i} = r_{u,\check{c}}$	$r_{2o} = r_{v,\check{c}}$	$t_2 = r_{2o} - r_{2i}$	
I	19,7	20,5	0,8	13200
II	19,7	21	1,3	13310
III	19,7	21,5	1,8	19520

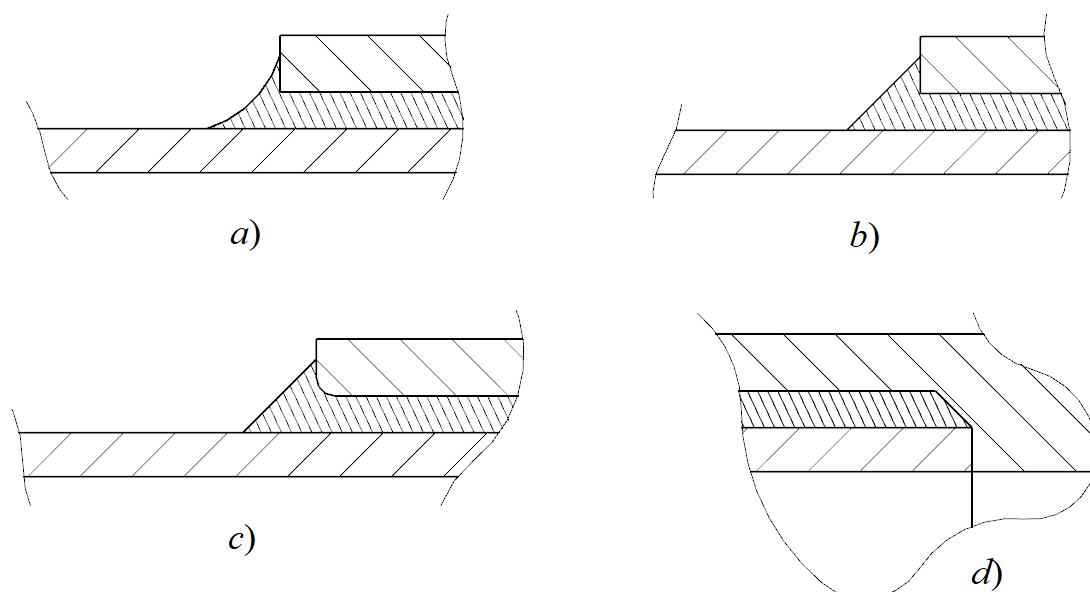
Iz tablice 4. vidljivo je, prema korištenim dimenzijama NTK, da ovdje navedena analiza I odgovara referentnoj analizi.

U referentnoj analizi, odnosno ovdje analizi I, odabrana debljina stijenke NTK razlika je njegovih prethodno, u [1], definiranih unutarnjeg i vanjskog polumjera profila. Najmanji je mogući vanjski polumjer određen iz uvjeta čvrstoće korištenog materijala, a konačna vrijednost je odabrana kao najmanja kojom se postiže cjelobrojni vanjski promjer.

Odabir većih debljina stijenke koje su korištene u ostalim analizama u potpunosti je proizvoljan, a odabrane su vrijednost kojima se također postižu vanjski promjeri NTK kao cijeli brojevi.

3.5.3. Ispitna grupa III

Jedna od velikih prednosti numeričkih metoda je mogućnost implementiranja konstrukcijskih detalja u promatrani model, a što nije moguće u analitičkim modelima. U sljedećim analizama provjerit će se utjecaj postojanja različitih detalja završetaka lijepljenog spoja kako na slobodnom (otvorenom), tako i na zatvorenom kraju lijepljenog spoja. Slikom 25. prikazani su neki mogući oblici završetaka.



Slika 25. Prikaz različitih završetaka lijepljenog spoja

Završetak spoja prikazan slikom 25. *a)* predstavlja prema [8] realan završetak koji nastaje u stvarnim uvjetima tijekom, odnosno nakon spajanja i potpunog sušenja spoja. Zbog kompleksnosti njegove geometrije i problema koji bi prilikom modeliranja mogli nastati, ovakav završetak nije analiziran u ovom istraživanju.

Slikom 25. *b)* prikazana je aproksimacija realnog završetka prikazanog pod *a)* koju je moguće analizirati u numeričkom modelu kako bi se analizirao njegov utjecaj na raspodjelu naprezanja u spoju.

Slikom 25. pod *c)* prikazan je završetak koji predstavlja modifikaciju završetka danog pod *b)*. Kao što je iz slike vidljivo, u slučaju *c)* dodan je prijelazni radijus području u kojem bi se u modelu pod *b)* mogla predstavljati mjesto izrazitih koncentracija naprezanja.

Na slici 25. *d)* prikazan je koničan završetak na zatvorenom kraju spoja.

Tablicom 5. prikazane su simulacije ispitne grupe III sa pridruženim odgovarajućim završecima, prema slici 25., koji će u njihovim modelima biti implementirani.

Tablica 5. Prikaz parametara pojedinih simulacija ispitne grupe III

Broj analize		I	II	III	IV	V
Završetak prema slici 21.		-	<i>b)</i>	<i>c)</i>	<i>d)</i>	<i>c) + d)</i>
Broj KE	Sloj ljepila	14760	16120	16348	30500	32208
	NTK	13200	13200	19800	17040	17160

Slika 25. ne prikazuje dimenzije dijelova spoja u mjerilu, već su dane sheme samo kreirane s ciljem što zornijeg prikaza važnih detalja. Kao što je već rečeno, svi parametri za koje nije drugačije navedeno, ostaju jednaki onima koji su korišteni u referentnoj analizi. Dakle, debljina je sloja ljepila $t_a = 0,3$ mm. Predviđena je visina uzvišenja na samome kraju, zbog njezinog malog iznosa, jednaka debljini stijenke NTK. Dakle, visina uzvišenja zadana je kao 0,8 mm.

Prema tablici 5. vidljivo je da ovdje analiza I odgovara referentnoj analizi.

Kut konusa na slobodnom kraju lijepljenog spoja ovisi o viskoznosti korištenog ljepila i promjeni viskoznosti tijekom sušenja spoja. Kako je bez ispitivanja stvaran kut konusa teško odrediti, za aproksimaciju realnog završetka u analizama II i III njegova je vrijednost uzeta kao 45° . U analizi III, prijelazni je radijus uzet u vrijednosti od R0,4 mm.

U analizi IV, kut je konusa na zatvorenom kraju lijepljenog spoja također odabran kao 45° . Utjecaj njegove veličine na vršne vrijednosti smičnog naprezanja razmotren je u sljedećoj ispitnoj grupi.

Konačno, analiza V razmatra zajednički utjecaj konstrukcijskih detalja na slobodnom i zatvorenom kraju lijepljenog spoja, kako je prikazano tablicom 5. Sve dimenzije razmatranih detalja jednake su onima koji su prethodno pojašnjeni i korišteni u prijašnjim simulacijama.

Prilikom provođenja ovih simulacija, ukupna se duljina lijepljenog spoja mijenjala, ali kako su promjene u duljini reda veličine nekoliko desetina milimetra, utjecaj navedenih promjena nije uzet u obzir.

Kako je u poglavlju Rasprava kasnije detaljnije pojašnjeno, radi značajnih koncentracija naprezanja koja nastaju zbog razlika u gustoćama mreža konačnih elemenata različitih pozicija, prilikom provođenja simulacija ove i sljedeće ispitne grupe korištena je, umjesto kompozitne, ekvivalentna izotropna cijev jednakih dimenzija. Na taj način nju je moguće aproksimirati koristeći konačne elemente jednake prosječne veličine konačnim elementima kojima je opisan sloj ljepila i NTK, čime se eliminira stvaranje spomenutih dodatnih koncentracija naprezanja, odnosno može se izolirano analizirati utjecaj pojedinih konstruktivnih detalja na koncentraciju naprezanja na krajevima lijepljenog spoja. Pritom su korišteni konačni elementi C3D8R prosječne veličine 0,5 mm, što je rezultiralo generiranjem mreže od 225000 elemenata za opis kompozitne cijevi. Uz to, zbog dijeljenja pozicija (*Partitioning*) radi postizanja geometrije jednostavnije za generiranje mreže konačnih elemenata, u analizama IV i V vidljiv je značajan porast broja korištenih konačnih elemenata. Eventualne razlike u točnim

vrijednostima naprezanja, a koje proizlaze iz aproksimiranja ortotropnog materijala izotropnim, tijekom ovih ispitivanja u kojima se istražuje utjecaj pojedinih konstruktivnih detalja na raspodjelu smičnog naprezanja nemaju praktički nikakav značaj.

Prema modulu smicanja stvarne kompozitne cijevi iz tablice 1., uz fizikalno ograničenje vrijednosti Poisson-ovog faktora:

$$0 < \nu_{ekv} < 0,5, \quad (3.28)$$

iz poznate veze inženjerskih konstanti elastičnosti izotropnog materijala:

$$G_{ekv} = G_{xy} = \frac{E_{ekv}}{2 \cdot (1 + \nu_{ekv})}, \quad (3.29)$$

moguće je, proizvoljnim odabirom Young-ovog modula, uz jedino ograničenje da Poisson-ov faktor leži u granicama prema (3.28), definirati ekvivalentni, izotropni materijal cijevi. Dakle, odabrana je vrijednost modula elastičnosti (Young-ovog modula):

$$E_{ekv} = 80110 \text{ N/mm}^2, \quad (3.30)$$

čime je i Poisson-ov faktor, uz poznati modul smicanja iz tablice 1., definiran izrazom (3.29):

$$\nu_{ekv} = 0,2288. \quad (3.31)$$

3.5.4. Ispitna grupa IV

Posljednja ispitna grupa posvećena je ispitivanju utjecaja veličine kuta koničnog završetka na zatvorenom kraju lijepljenog spoja, na koncentraciju naprezanja. Stoga su tablicom 6. prikazane vrijednosti kutova koje su odabrane u sljedećim analizama te brojevi konačnih elemenata u mrežama koje opisuju sloj ljepila i NTK.

Tablica 6 . Prikaz parametara pojedinih simulacija ispitne grupe IV

Broj analize		I	II	III	IV
Kut konusa [°]		5	30	45	60
Broj KE	Sloj ljepila	30012	30500	30500	44652
	NTK	94400	93220	118236	90388

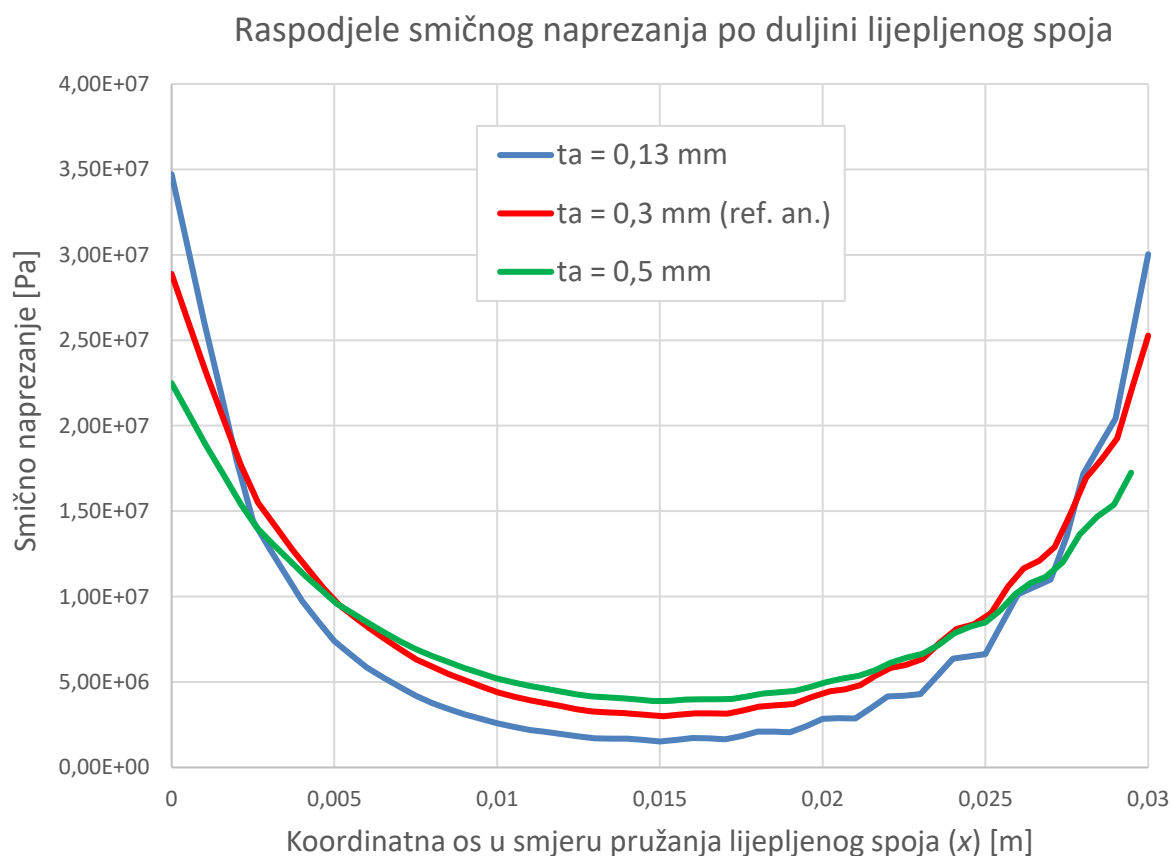
Prilikom svih analiza duljina je lijepljenog spoja ostala konstantna i jednaka onoj koja je korištena u referentnoj analizi – $l_a = 30 \text{ mm}$. Iz tablice 6. vidljivo je da analiza III odgovara analizi IV prethodne ispitne grupe. Iz tablice 6. je također vidljivo kako je i ovdje broj konačnih elemenata značajno veći u odnosu na ispitne grupe I i II, iz već spomenutih razloga.

4. REZULTATI

U nastavku su, prema ispitnim grupama, prikazane raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepjenog spoja te su zatim dani komentari i izvedeni zaključci.

4.1. Ispitna grupa I

Slikom 26. dane su na istom dijagramskom prikazu različitim bojama krivulje raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepjenog spoja pojedinih simulacija ove ispitne grupe.



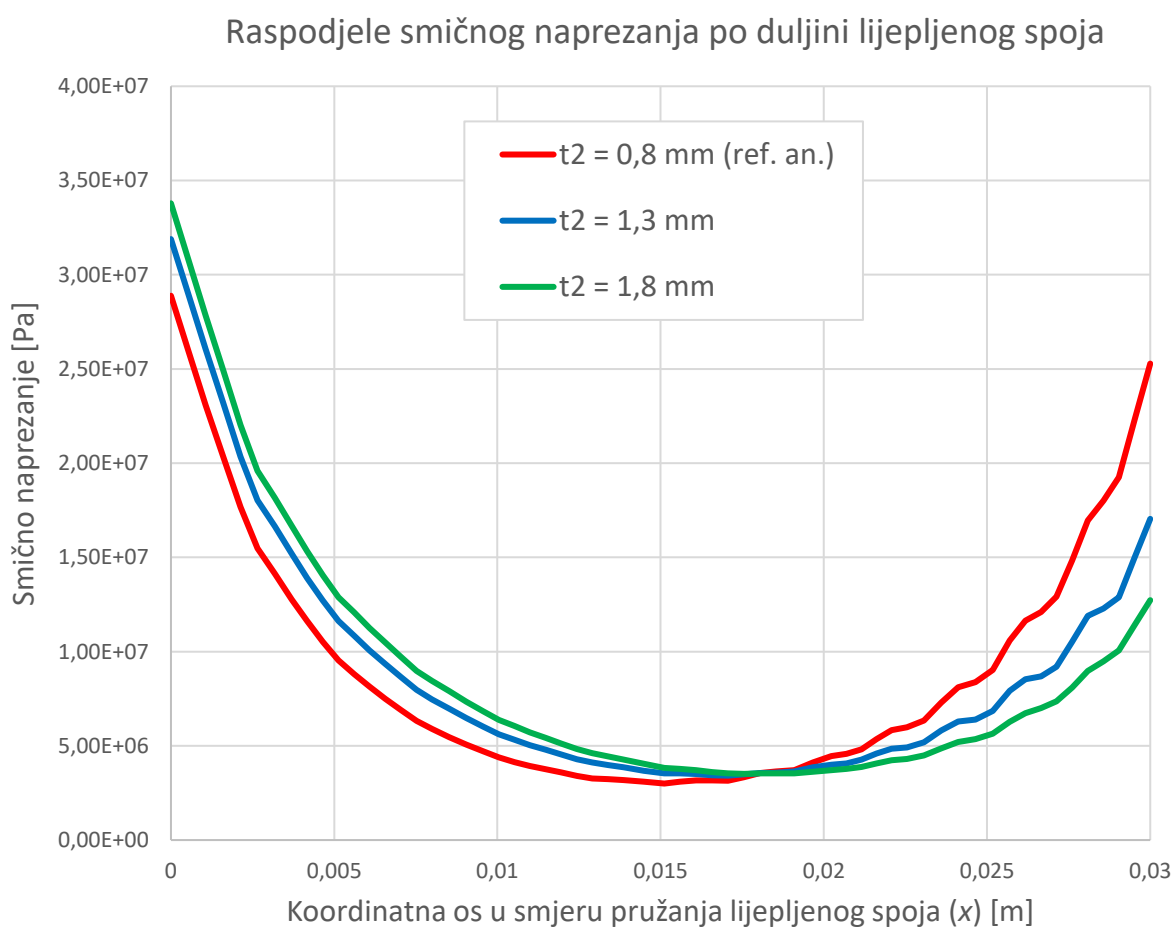
Slika 26. Raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepjenog spoja ispitne grupe I

Međusobnom usporedbom raspodjela naprezanja prikazanih slikom 26., imajući na umu odabrane debljine sloja ljepila prema tablici 3., mogu se potvrditi rezultati dobiveni od prethodno navedenih autora.

Povećanje debljine sloja ljepila smanjuje koncentracije naprezanja kako na otvorenom, tako i na zatvorenom kraju lijepljenog spoja. Na sredini spoja povećanjem debljine naprezanja rastu, ali kako je njihova vrijednost daleko ispod smične čvrstoće ljepila, zaključuje se da za poboljšanje nosivosti spoja ima smisla koristiti veću debljinu sloja ljepila. Važno je ponovno napomenuti kako je u ovom radu korišten linearni model opisa materijala ljepila, za koji se rješenja podudaraju s realnima do određenog povećanja debljine sloja ljepila [5]. Ova granica ovisi u najvećoj mjeri o konkretno odabranom ljepilu, ali i kvaliteti izvedbe spajanja. Kako za odabrano ljepilo ova informacija nije dostupna već bi ju trebalo eksperimentalno ispitati, u ovom je istraživanju korištena vrijednost prema [5].

4.2. Ispitna grupa II

Slika 27. prikazuje različitim bojama krivulje raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja pojedinih simulacija u kojima se analizirao utjecaj debljine stijenke NTK.

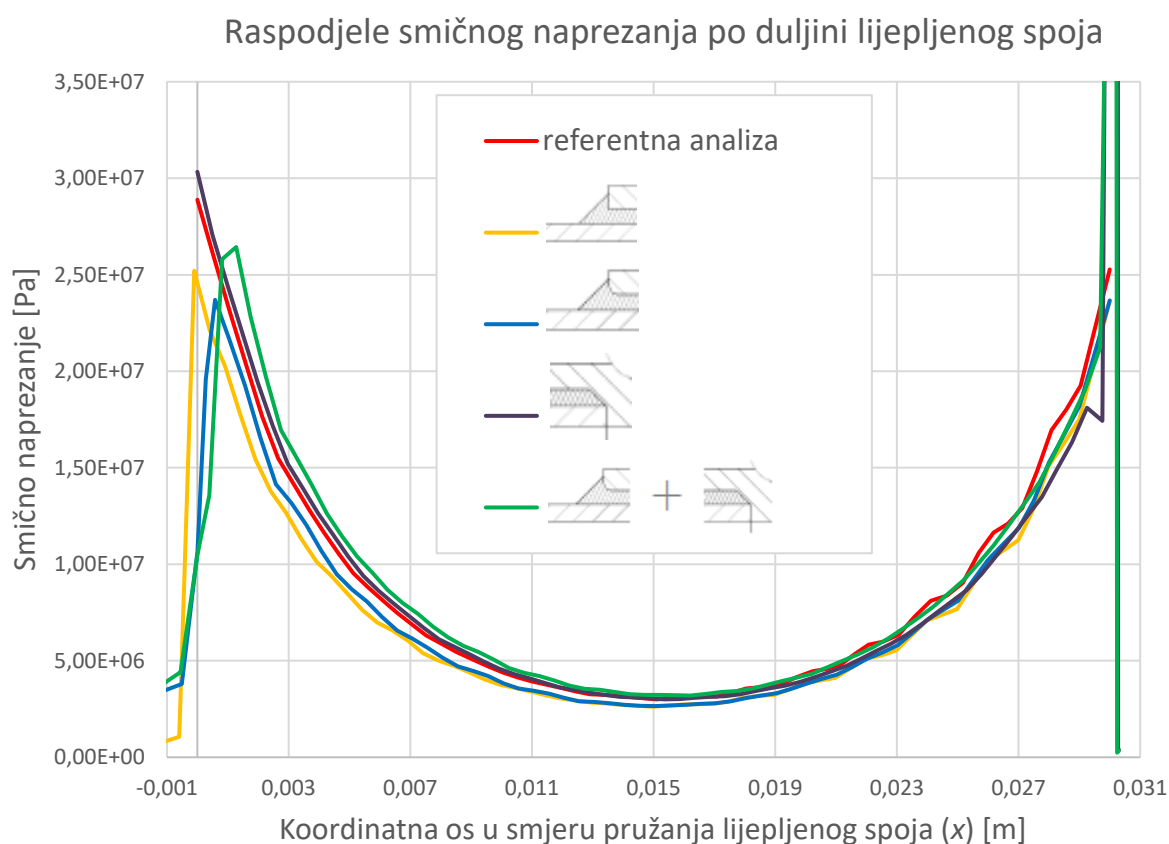


Slika 27. Raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja ispitne grupe II

Iz slike 27. je vidljivo da na otvorenom kraju (lijevo) povećanje debljine stijenke NTK ima negativan utjecaj na koncentraciju naprezanja, odnosno, povećanjem debljine promatrano smično naprezanje raste. S druge strane, na zatvorenom kraju lijepljenog spoja vrijednosti naprezanja značajnije padaju jednakim porastom debljine stijenke NTK.

4.3. Ispitna grupa III

Raspodjele naprezanja u ovisnosti o postojanju tablicom 5. i slikom 25. prikazanih konstruktivnih detalja dane su sada različitim bojama na istom grafikonu slikom 28.



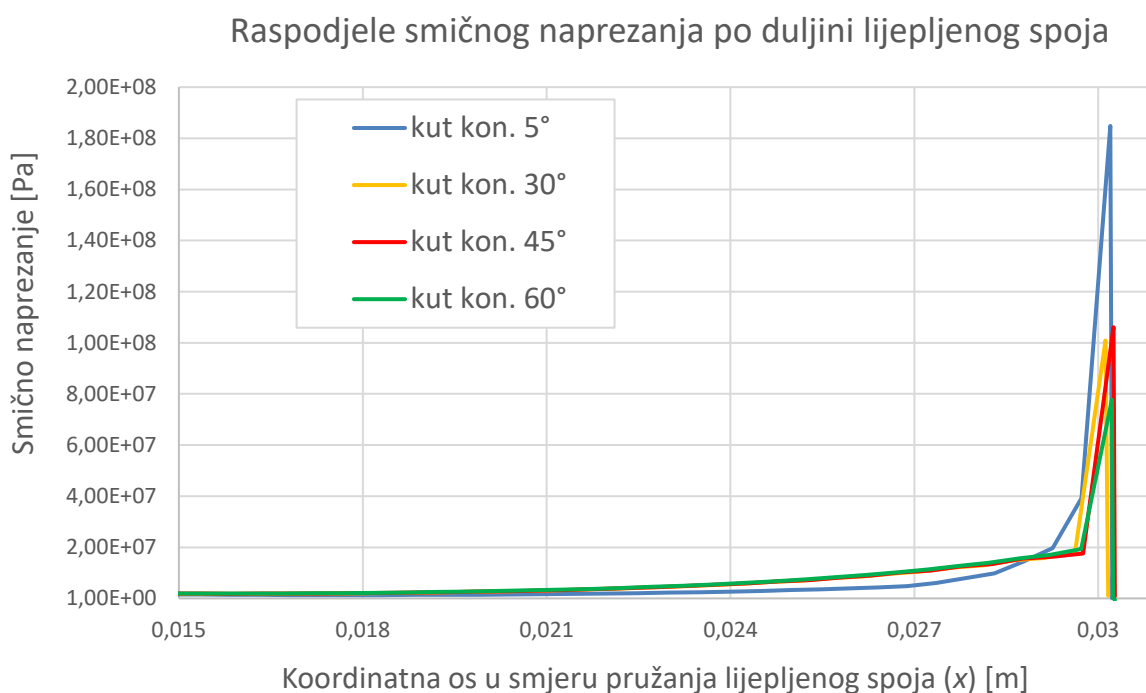
Slika 28. Raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja ispitne grupe III

Na slici 28. vidljivo je da vrijednosti smičnog naprezanja na zatvorenom kraju lijepljenog spoja analiza IV i V izlaze iz područja dijagrama. Kako su vršne vrijednosti ovih naprezanja preko 100 MPa te samim time ovako oblikovani spojevi nemaju pozitivan efekt na nosivost spoja, granice su na dijagramu odabrane na način da se postigne preglednost krivulja smičnog naprezanja ostalih analiza.

Dakle, kako skošenje na zatvorenom kraju lijepljenog spoja pod kutom od 45° značajno povećava koncentraciju smičnog naprezanja, analize IV i V mogu se odmah izbaciti iz razmatranja. Iz slike 28. je također vidljiv pozitivan utjecaj koničnog uzvišenja na otvorenom kraju spoja (analize II i III). Kada prijelaznog polumjera nema (analiza II), koncentracija naprezanja javlja se upravo na mjestu nagle promjene geometrije – na unutarnjem bridu otvorenog ruba NTK. Dodatnim oblikovanjem, odnosno obradom NTK dodavanjem zaobljenja na spomenuti rub, vršna se vrijednost naprezanja još smanjuje, a samo mjesto koncentracije naprezanja pomiče se prema unutrašnjosti spoja. Stoga se može zaključiti da stvaranje koničnog uzvišenja tijekom samog procesa spajanja pozicija ima pozitivan efekt na raspodjelu naprezanja, a za još povoljniju raspodjelu poželjno je obraditi unutarnji brid NTK na najveći mogući radijus.

4.4. Ispitna grupa IV

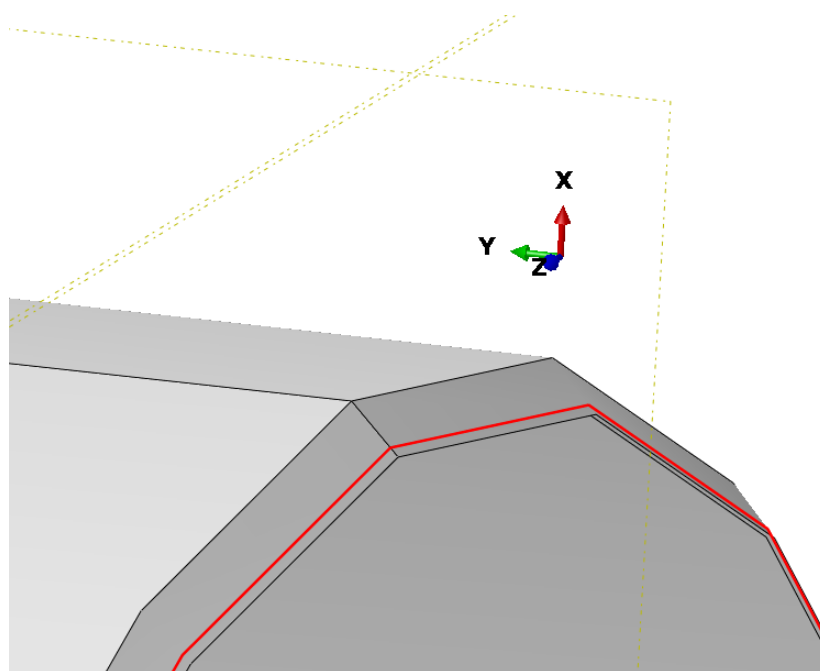
Raspodjele smičnog naprezanja ispitivanja posljednje ispitne grupe radi preglednosti su prikazane slikom 29. samo za polovinu duljine spoja koja obuhvaća njegov zatvoreni kraj.



Slika 29. Raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja ispitne grupe IV

Promatranjem slike 29. moglo bi se doći do zaključka da se porastom kuta koničnog završetka na zatvorenom kraju lijepljenog spoja smanjuje koncentracija naprezanja. Međutim, zbog

načina modeliranja, ovaj zaključak nije ispravan. Naime, unutar programskog paketa *Abaqus/Standard* istim čvorovima nije moguće dodijeliti dva različita ograničenja (*Tie*) koje je potrebno definirati radi modeliranja adhezivnog spoja. Stoga, u slučaju koničnog završetka prema slici 25. d), nije moguće definirati navedena ograničenja na odgovarajuće površine, jer se one u samome vrhu konusa susreću, odnosno imaju zajedničke čvorove konačnih elemenata. Iz tog razloga je napravljena particija pozicije sloja ljepila ravninom okomitom na središnju os modela, na udaljenosti od 0,1 mm od samoga vrha konusa. Slikom 30. prikazan je detalj modela sloja ljepila na kojemu je crvenom bojom označen brid particije.

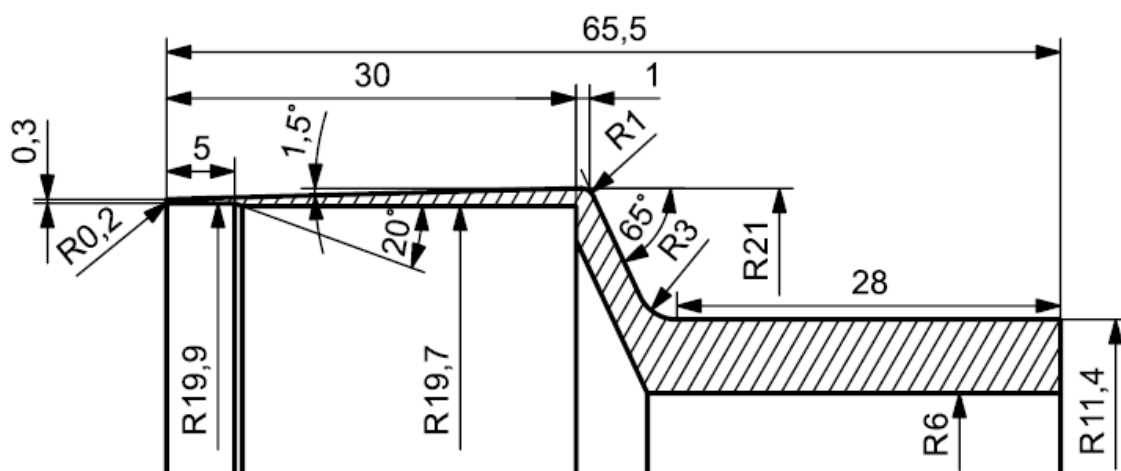


Slika 30. Particija na modelu sloja ljepila

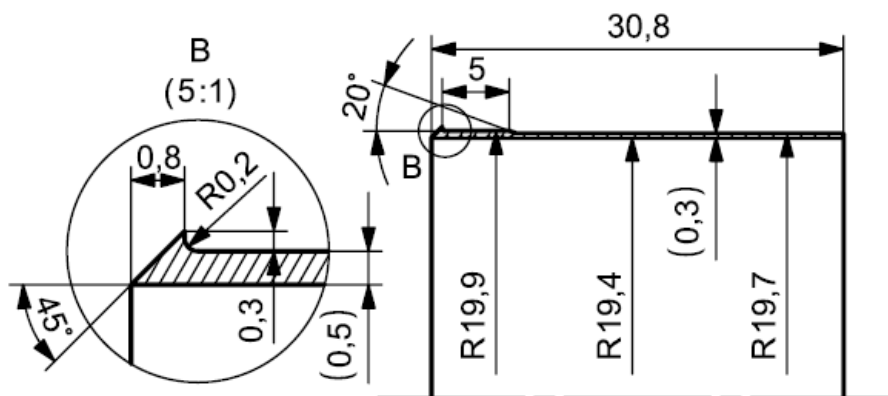
Prema tome, za najveći kut konusa i jednaku udaljenost ravnine particioniranja od vrha konusa, debljina je sloja ljepila na krajnjim točkama (čvorovima) gdje je definirano ograničenje najveća. Kao što je i ispitnom grupom I već pokazano, povećanjem debljine sloja ljepila koncentracije se smičnog naprezanja smanjuju, i to na zatvorenom kraju spoja u najvećoj mjeri. Može se stoga izvesti zaključak da skošenje sloja ljepila na unutarnjem, odnosno zatvorenom kraju lijepljenog spoja nema pozitivan utjecaj na pojavu koncentracija naprezanja, već ih u znatnoj mjeri povećava.

4.5. Optimirana geometrija spoja

Konačno, prema svim zaključcima netom donesenim na temelju provedenih analiza ispitnih grupa I – IV, moguće je oblikovati profil NTK u svrhu pozitivnog modificiranja raspodjele smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja, odnosno, smanjenje koncentracija naprezanja na rubnim područjima. Slikom 31. dan je polovični prikaz uzdužnog presjeka NTK, a slikom 32. je na analogan način prikazana geometrija sloja ljepila. Na slikama su kotirane sve važne veličine.



Slika 31. Optimirani profil NTK, dimenzije u [mm]



Slika 32. Optimirani profil sloja ljepila, dimenzije u [mm]

Napomena: slike 31. i 32. kojima su prikazani profili NTK i sloja ljepila ne predstavljaju službenu tehničku dokumentaciju već pojednostavljeni prikaz odabranih dimenzija modela koji su korišteni u analizi. Stoga i način kotiranja nije tehnološki već je prilagođen da bude u skladu s prethodno korištenim veličinama (polumjeri umjesto promjera) i olakša reprodukciju identičnog profila unutar programskog paketa *Abaqus/Standard*.

Kao što je vidljivo iz slike 32., na glavnini područja lijepljenog spoja odabrana je debljina sloja ljepila $t_a = 0,3$ mm, čije su prednosti i razlozi prikladnosti već ranije navedeni.

Na otvorenom kraju spoja (na slici 32. lijevo), debljina sloja je povećana na $t_a = 0,5$ mm, čime se smanjuju deformacije u ljepilu, a time i naprezanja, dok je ona i dalje održana unutar preporučenog raspona prema [16] i blizu granice podudaranja eksperimentalnih s numeričkim rezultatima [5].

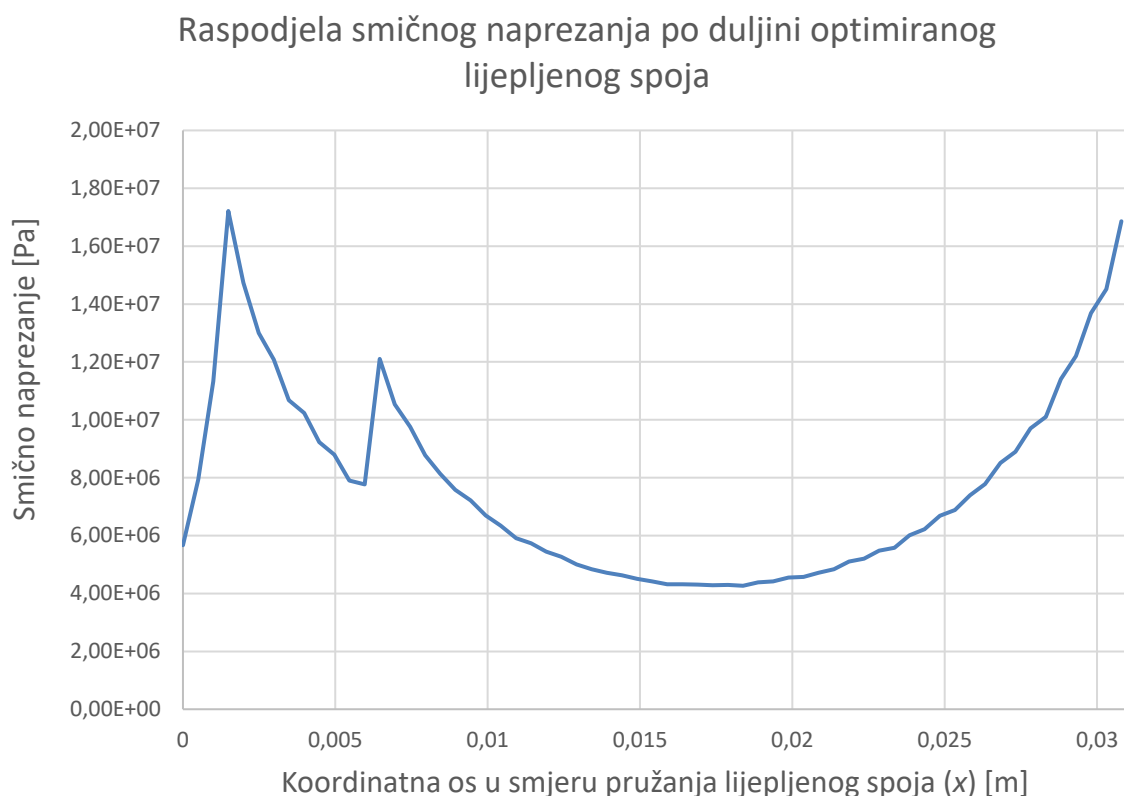
Prijelaz je između dva područja različitih debljina sloja koničan, a relativno mali odabran kut konusa od 20° osigurava smanjenje koncentracije naprezanja uzrokovane razlikom u deformacijama ovih dvaju područja.

Debljina stijenke NTK od otvorenog kraja lijepljenog spoja postepeno, koničnim prijelazom raste do najveće debljine za zatvorenom kraju spoja. Najmanja je debljina stijenke na otvorenom kraju spoja $t_2 = 0,3$ mm odabrana kao najmanja debljina ograničena proizvodnim procesima, a debljina je stijenke na zatvorenom kraju odabrana tako da se postignu podjednake vršne vrijednosti naprezanja na oba kraja spoja, pritom stvarajući dodatnu uštedu na masi, a da se pritom ostvari cjelobrojni vanjski promjer.

Zatim, koničnim prijelazom i velikim prijelaznim radijusom među stupnjevima NTK ostvaren je povoljniji tok naprezanja sa područja lijepljenog spoja na, u poprečnom presjeku, geometrijski manje područje prijenosa opterećenja na sam tripoidni križ ozubljenjem.

4.6. Raspodjela smičnog naprezanja u slučaju optimirane geometrije spoja

Raspodjela smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja konstruiranog prema slikama 31. i 32. prikazana je slikom 33.



Slika 33. Numerički dobivena raspodjela smičnog naprezanja po duljini lijepljenog spoja optimirane geometrije

Iz slike 33. vidljivo je da su naprezanja na oba ruba podjednakih iznosa i dovoljno ispod dozvoljene smične čvrstoće ljepila u kontaktu s čelikom pri uvjetima povišene temperature i relativne vlažnosti zraka, kako je ranije dano izrazom (3.6).

Dakle, može se zaključiti da ovako konstruiran spoj zadovoljava kriterij čvrstoće samog ljepila. Potrebno je još jedino provjeriti zadovoljenost stanja naprezanja u ovako oblikovanom NTK.

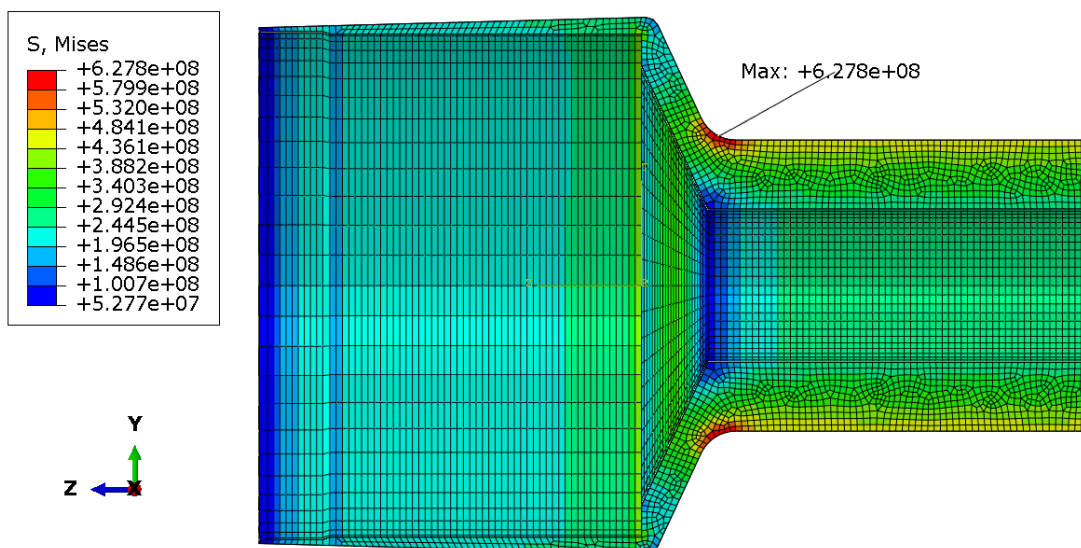
4.7. Provjera stanja naprezanja u nosaču tripoidnog križa

Prema slici 31. koja prikazuje profil ovog nosača, vidljivo je da je njegova debljina na određenim područjima vrlo mala. Stoga je potrebno za ovako konstruiran nosač tripoidnog križa provjeriti čvrstoću, odnosno stanje naprezanja.

Korištenje analitičkih izraza prilikom kombinacije kontinuiranog opterećenja i promjenjive geometrije nije praktično, stoga će stanje naprezanja biti provjereno samo numerički.

Zadovoljenost uvjeta čvrstoće nosača provjerit će se prikazom podataka o vrijednostima ekvivalentnog naprezanja prema teoriji HMH (von Mises), iz posljednje provedene simulacije – simulacije modela optimirane geometrije spoja.

Dakle, postojeće polje ekvivalentnog naprezanja po uzdužnom presjeku nosaču tripoidnog križa u ovakvoj izvedbi dano je slikom 34.



Slika 34. Numerički dobivena raspodjela ekvivalentnog naprezanja [Pa] u nosaču tripoidnog križa

Moguće je sada usporediti najveće vrijednosti ekvivalentnog naprezanja koje se u legendi na slici 34. pojavljuje s dozvoljenim ekvivalentnim naprezanjem koje je, kao što je rečeno, jednako vrijednosti izračunate dinamičke čvrstoće dane tablicom 1.:

$$\sigma_{\text{ekv, max}} = 627,8 \text{ MPa} < \sigma_{\text{ekv}} = \sigma_{f, \text{DN}} = 1080 \text{ MPa}. \quad (4.1)$$

Iz izraza (4.1) vidljivo je da uvjet čvrstoće NTK nije narušen niti u točkama najvećeg ekvivalentnog naprezanja.

Prilikom izrade NTK, sa njihove će unutarnje strane, prije početka lijepljenog spoja na zatvorenom kraju, biti napravljen i jedan stupanj (provrt) koji se u analiziranom modelu ne nalazi. Navedeni provrt bit će izrađen upravo na mjeru ili nekoliko mikrometara manji od vanjskog promjera kompozitne cijevi, na duljini od 5 mm. Taj će cilindričan dio vrlo malim preklapom osiguravati koaksijalnost, odnosno koncentričnost kompozitne cijevi i NTK kako bi se omogućila što pravilnija izvedba lijepljenog spoja.

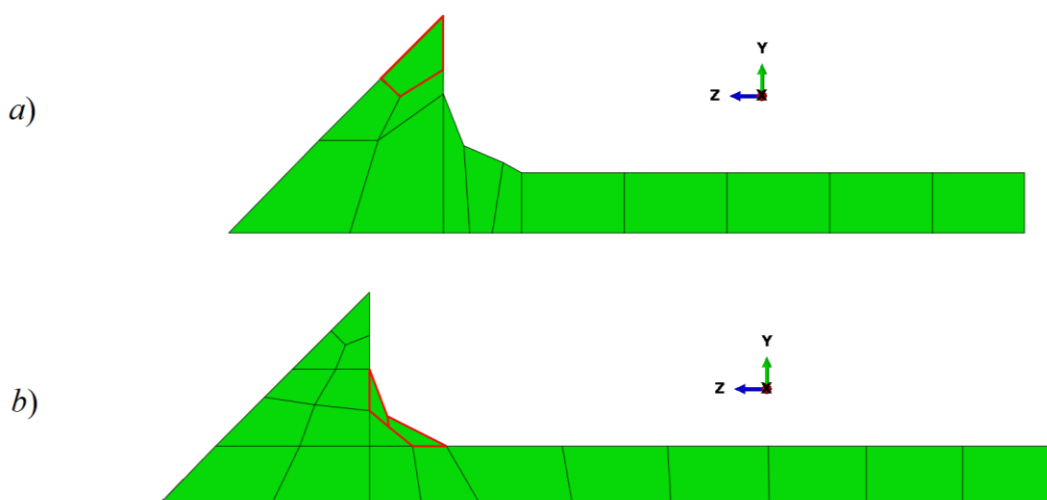
Kako je polarni moment otpora dotičnog presjeka najveći, odnosno očekivana su najmanja naprezanja, a uz to on nema nikakvu funkciju u prijenosu opterećenja sa kompozitne cijev, ovaj segment nosača tripoidnog križa izbačen je iz numeričke analize radi uštede procesorskog vremena.

5. RASPRAVA

Prilikom modeliranja konstruktivnih detalja završetaka lijepljenog spoja, u analizama ispitnih grupa III i IV, pojavili su se brojni problemi, među kojima je i već spomenuti problem nemogućnosti definiranja dvaju ograničenja na području zajedničkih čvorova različitih konačnih elemenata. Izvor ostalih problema leži u složenoj geometriji, odnosno postojanju koničnih (skošenih) i zaobljenih površina u modelu sloja ljepila spomenutih analiza.

Iako je unutar programskog paketa *Abaqus/Standard* materijal ljepila odabran kao izotropan, njegov je odziv definiran preko presjeka (*Section*) kao specijalan, koji odgovara materijalu ljepila (*Other < Cohesive < response: Continuum*), pa se on ne ponaša izotropno, već približno ortotropno. Uz to, odabrana je i posebna vrsta konačnih elemenata – *Cohesive*. Analiza koja uključuje ovu vrstu konačnih elemenata i svojstva materijala predviđa opterećenje i deformiranje unutar određene ravnine, a svojstva i odziv izvan razmatrane ravnine vrlo su različiti. Stoga je potrebno, radi ostvarivanja vjerodostojnih rezultata, definirati orijentaciju konačnih elemenata, odnosno smjer protezanja njihove visine (debljine), tj. smjer orijentacije normale (eng. *Mesh Stack Direction*) koji mora biti konzistentan na području čitavog modela sloja ljepila [19]. Uz to, kao i prilikom modeliranja kompozitne cijevi kao 3D ljuske, nužno je korištenje samo jednog konačnog elementa u smjeru pružanja debljine konačnih elemenata, odnosno materijala kojeg oni opisuju. Ove je zahtjeve u slučaju složenije geometrije modela vrlo teško ispuniti.

Unutar programskog paketa *Abaqus/Standard*, upravo zbog nemogućnosti dodjeljivanja potrebne orijentacije, a koja proizlazi iz nepostojanja središnje ravnine ovih nesimetričnih konačnih elemenata, ne postoje tetraedarski kohezivni konačni elementi kojima bi složenu geometriju bilo znatno lakše aproksimirati. Stoga je i ovakve pozicije složenije geometrije također potrebno aproksimirati samo heksaedarskim kohezivnim konačnim elementima. Pritom, na navedenim kritičnim mjestima (kosine i zakrivljenja) dolazi do visokog stupnja distorzije heksaedarskih konačnih elemenata zbog čega oni u određenim slučajevima nisu iskoristivi za analiziranje, a uz to je i onemogućeno ispravno definiranje orijentacije materijala koja je, kako je već rečeno, nužna za pravilno modeliranje i ostvarivanje validnih rezultata. Slikom 35. prikazane su dvije od brojnih mogućih izvedbi mreže konačnih elemenata na otvorenom kraju modela sloja ljepila.

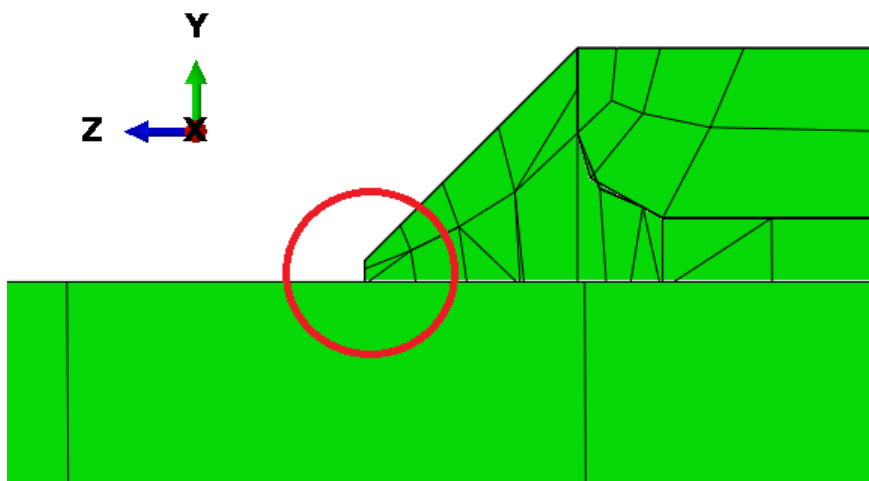


Slika 35. Dvije moguće raspodjele konačnih elemenata na otvorenom kraju modela sloja ljepila

Na slici 35. pod *a*) prikazana je raspodjela konačnih elemenata čija je mreža provjereno (*Mesh < Verify Mesh*) zadovoljavajuća. Međutim, pojedini su konačni elementi distorzirani u tolikoj mjeri da konzistentnost orijentacije ne može biti zadovoljena. Na pojedinim bi elementima, kao što je na primjer onaj na slici 35. pod *a*) označen crvenom bojom, orijentacija trebala biti takva da su susjedne stranice gornja i donja, što unutar programskog paketa *Abaqus/Standard* nije moguće definirati. S druge strane, slikom 35. pod *b*) prikazana je raspodjela konačnih elemenata u kojoj je, sa strane mogućnosti definiranja konzistentne orijentacije, postignuta zadovoljavajuća mreža na samome konusu, ali prilikom provjere ispravnosti mreže, elementi koji su na slici označeni crvenom bojom, nisu zadovoljavajuće geometrije.

Uz to, vidljivo je da obje mreže, generirane pomoću različitih algoritama i kontrola promrežavanja, sadrže više elemenata po debljini modela, a što je suprotno uputama iz [19]. U slučaju jednostavne cilindrične geometrije kao što je ona korištena u referentnoj analizi, provjereno je kako narušavanje zahtjeva za korištenjem samo jednog konačnog elementa u smjeru normale (debljine) ne utječe na rezultat. Međutim, u slučaju složenije geometrije pozicije sloja ljepila, kao što su dotične geometrije u ispitnim grupama III i IV, nije uopće bilo moguće generirati mrežu konačnih elemenata s jednim konačnim elementom u smjeru normale, pa stoga odražavanje narušavanja spomenutog uvjeta na ove rezultate nije bilo moglo provjeriti.

Dakle, postići zadovoljavajuću mrežu konačnih elemenata na području čitavog modela sloja ljepila uz osiguravanje konzistentnosti njihove orijentacije iznimno je zahtjevno, odnosno gotovo neizvedivo. Radi toga su iskušani i modeli sloja ljepila u kojima su sami vrhovi koničnih završetaka odrezani, kako bi se smanjila distorzija konačnih elemenata. Prikaz jednog ovakvog modela sloja ljepila u presjeku dan je slikom 36.

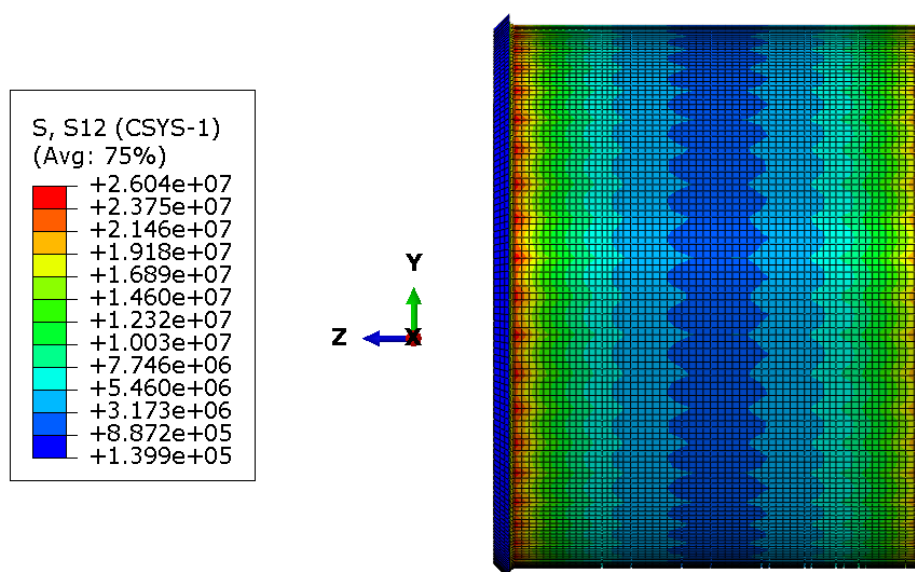


Slika 36. Model sloja ljepila bez vrha konusa na otvorenom kraju spoja

Zbog navedenih problema, kako bi se validirali dobiveni rezultati, napravljeni su i odgovarajući ekvivalentni modeli u kojima su skošene i zakrivljene plohe aproksimirane stepeničastim plohama. Na taj način je, uz dodatne particije – dijeljenje na jednostavnija tijela – pozicije sloja ljepila, moguće minimizirati distorziju konačnih elemenata, tj. očuvati njihov oblik i time ostvariti njihovu konzistentnu orijentaciju, što u konačnici dovodi do postizanja ispravnih rezultata.

Uz to, kako je već rečeno pod točkom *Ispitna grupa III* poglavlja Materijali i metode, problem, odnosno dodatni koncentrador naprezanja predstavlja razlika u gustoći mreža korištenih konačnih elemenata u sklopu lijepljenog spoja. Prilikom razmatranja kompozitnih pozicija, veličina korištenih konačnih elemenata ne smije biti premala [19]. Kako je u [1] za identičnu kompozitnu cijev provjerom konvergencije rezultata i njihovom usporedbom s analitičkim kao najprikladnija odabrana prosječna veličina konačnih elemenata od 2,5 mm, ta je vrijednost i ovdje korištena. S druge strane, pri razmatranju problema lijepljenog spoja koristeći kohezivne konačne elemente, za ostvarivanje što točnijih rezultata potrebno je, kao i u slučaju većine ostalih problema i vrsta konačnih elemenata, koristiti što manje elemente.

Zbog složene geometrije i općenito malih dimenzija razmatranog sklopa, promrežavanje pozicije sloja ljepila konačnim elementima prosječne veličine 2,5 mm praktički niti nije moguće, dok se korištenjem konačnih elemenata većih od 1 mm postiže vrlo gruba mreža. Nepodudaranje čvorova konačnih elemenata različitih pozicija, odnosno njihova razlika u veličini rezultirala je neravnomjernim raspodjelama u cirkularnom smjeru, tj., na manjim, kohezivnim KE, na mjestima gdje se nalaze čvorovi većih KE modela kompozitne cijevi, dodatno rastu naprezanja. Ovo je prikazano slikom 37.



Slika 37. Nejednolika raspodjela smičnog naprezanja u cirkularnom smjeru modela sloja ljepila

Iz tog razloga, prilikom modeliranja sklopova za analize ispitnih grupe III i IV, također radi provjere ispravnosti rezultata i boljeg razumijevanja samog problema, napravljen je, kako je već spomenuto, model cijevi od izotropnog materijala, koja predstavlja ekvivalent kompozitnoj cijevi. Njezine dimenzije su jednake stvarnoj, kompozitnoj cijevi, a identična krutost postignuta je određenom kombinacijom Young-ovog modula i Poisson-ovog faktora ekvivalentnog izotropnog materijala. Korištenje ekvivalentne cijevi od izotropnog materijala omogućilo je njezino modeliranje pomoću standardnih konačnih elemenata čija veličina nije ograničena, odnosno, njihova je veličina odabrana jednaka veličini kohezivnih elemenata koji opisuju sloj ljepila.

6. ZAKLJUČAK

U ovom je radu dokazano kako se modificiranjem geometrije spoja u ispravnom smjeru, tj. optimizacijom, može znatno povećati njegova nosivost, odnosno postići veća sigurnost tijekom rada. Provedbom mnogih simulacija raspoređenih u određene ispitne grupe, prema parametrima čiji se utjecaj na raspodjelu smičnog naprezanja u njima razmatrao, došlo se do spoznaja o trendovima naprezanja kako na području čitave duljine lijepljenog spoja, tako i u rubnim područjima, na kojima se javljaju izrazite koncentracije smičnog naprezanja, a prema kojima je spoj i potrebno dimenzionirati. Tablicom 7. prikazana je usporedba vrijednosti smičnih naprezanja u karakterističnim točkama za prvotno provedenu analizu (referentna analiza) koja razmatra osnovni spoj inicijalne geometrije i posljednju analizu u kojoj je razmatran optimiziran spoj.

Tablica 7. Usporedba numerički dobivenih vrijednosti smičnog naprezanja u karakterističnim točkama na spoju inicijalne i optimizirane geometrije

Analiza (oblik spoja)	Smično naprezanje [MPa]			
	Otvoreni kraj spoja (vršna vrijednost)	Središte spoja (najniža vrijednost)	Zatvoreni kraj spoja (vršna vrijednost)	Srednje naprezanje
Ref. analiza (spoj početne geometrije)	26,998	2,598	23,528	8,144
Konačna analiza (optimiziran spoj)	17,211	4,266	16,862	7,857
Razlika [%] $\left(\left(\frac{kon.-ref.}{ref.} \right) \cdot 100\% \right)$	-36,25	64,2	-28,33	-3,5

Iz tablice je 7. vidljivo da je optimizacijom geometrije spoja na otvorenom kraju spoja postignuto smanjenje smičnog naprezanja od čak preko 36%, dok postotak smanjenja na

zatvorenom kraju iznosi 28%. Modificiranjem geometrije spoja smična su naprezanja na središnjem dijelu, prema postotku, znatno porasla, međutim, kao što je i ranije navedeno, ova su naprezanja daleko ispod smične čvrstoće ljepila i nemaju direktan utjecaj na nosivost spoja. Drugim riječima, negativan utjecaj porasta smičnog naprezanja na središnjem dijelu spoja zanemariv je u usporedbi s koristi koja je ostvarena smanjenjem vršnih vrijednosti koncentracija naprezanja na rubnim područjima spoja. Uspješnost provedene modifikacije može se očitovati i u padu srednjeg naprezanja, kako je također pokazano u tablici 7.

Ostvarena smanjenja vršnih vrijednosti smičnog naprezanja omogućuju izvedbe spajanih pozicija sklopa poluvratila manjih dimenzija, što nadalje rezultira smanjenjem translatorne i rotacijske mase natjecateljskog vozila, a time i poboljšanjem performansi na dinamičkom dijelu natjecanja. Osim ukupnog smanjenja mase sklopa do kojeg dolazi i s mogućnošću korištenja manjih dimenzija kompozitne cijevi, u slučaju da se dimenzije kompozitnog vratila (i sklopa općenito) iz određenog razloga ne žele mijenjati, ušteda na masi ostvaruje se i dalje optimiranim oblikom NTK, uz povećanje sigurnosti spoja zbog smanjenja vrijednosti naprezanja. Tablicom 8. prikazana je usporedba mase NTK inicijalne geometrije s masom njegovog optimiziranog geometrijskog oblika.

Tablica 8. Usporedba mase NTK početne i optimirane geometrije

	Masa NTK početne geometrije	Masa NTK optimirane geometrije	Razlika [%]
Masa [g]	121,2	117,1	3,4

Dakle, može se zaključiti da u ovom radu provedena optimizacija lijepljenog spoja rezultira višestrukom dobiti.

U radu je također pokazano kako u slučaju jednostavne geometrije bez promjena u presjeku i materijalnih diskontinuiteta pozicije diskretizirane kohezivnim konačnim elementima, korišteni će programski paket, *Abaqus/Standard*, za ispravno postavljen model, dati zadovoljavajuća rješenja. Međutim, unatoč njenoj velikoj bazi dostupnih konstitutivnih modela i vrsta konačnih elemenata te nadasve širokom spektru mogućnosti koje nudi, iz u Raspravi navedenih problema koji su tijekom ovog rada nastali, može se zaključiti kako nije najpogodniji za analiziranje problema koji koriste kohezivne elemente u slučajevima postojanja složenije geometrije.

LITERATURA

- [1] Ratković, J.: Konstruiranje i proračun kompozitnih poluvratila za natjecateljsko vozilo FSB Racing Team-a, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.
- [2] Gay, D.; Hoa, S. V; Tsai, S. W.: Composite Materials - Design and Applications, CRC Press LLC, Paris, 2003.
- [3] Smojver, I.: Mehanika kompozitnih materijala, FSB, Zagreb, 2006/07.
- [4] Baker, A.; Dutton, S.; Kelly, D.: Composite Materials for Aircraft Structures, American Institute of Aeronautics and Astronautic, Inc., Reston, VA, 2004.
- [5] Choi, J. H.; Lee, D. G.: An Experimental Study of the Static Torque Capacity of the Adhesively-Bonded Tubular Single Lap Joint, The Journal of Adhesion, 55:3-4, 245-260, 1996.
- [6] Hipol, P. J.: Analysis and Optimization of a Tubular Lap Joint Subjected to Torsion, Journal of Composite Materials, 18(4), 298–311., 1984.
- [7] Kumar, S.; Khan, M. A.: An elastic solution for adhesive stresses in multi - material cylindrical joints, International Journal of Adhesion & Adhesives, 64, 142–152, 2016.
- [8] Adams, R. D.; Peppiatt, N. A.: Stress Analysis of Adhesive Bondend Tubular Lap Joints, The Journal of Adhesion, 9: 1, 1 – 18, 1977.
- [9] Hart-Smith, L. J.: Designing Adhesive Bonds, Adhesive Age, 21 (10), 32-37, 1978.
- [10] Kim, W. T.; Lee, D. G.: Torque transmission capabilities of adhesively bonded tubular lap joints for composite drive shafts, Composite Structures, 30:2, 229-240, 1995.
- [11] Lubkin, J. L.; Reissner, E.: Stress Distribution and Design Data for Adhesive Lap Joints Between Circular Tubes, Trans. ASME, 78, 1213-1221, 1956.
- [12] Goland, M.; Reissner, E.: The Stresses in Cemented Joints, Journal of Applied Mechanics, 11, A17-A27, 1944.
- [13] Volkersen, O.: Recherches sur la Theorie des Assemblages Colles, Construction Metallique, 4, 3-13, 1965.
- [14] Chen, D.; Cheng, S.: Torsional Stress In Tubular Lap Joints, International Journal of Solids and Structures, 29:7, 845-853, 1992.

- [15] Şekercioğlu, T.; Rende, H.; Gülsöz, A.; Meran, C.: The effects of surface roughness on the strength of adhesively bonded cylindrical components, *Journal of Materials Processing Technology*, 142:1, 82-86, 2003.
- [16] 3M™ Scotch-Weld™ Acrylic Adhesives; Technical Data Sheet for DP8405NS Green, May 2019.
- [17] <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=632572aeef2a4224b5ac8fbd4f1b6f77> (26.1.2020.)
- [18] <https://www.desmos.com/> (3.2.2020.)
- [19] Dassault Systèmes Simulia Corp.: *Abaqus Analysis User's Guide*, Providence RI, USA, 2017.
- [20] Majid, J.; Mohammad Reza, M.: Investigation of Defect Effects on Adhesively Bonded Joint Strength Using Cohesive Zone Modeling, *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*, 68(3), 5-24, 2018.
- [21] Bedon, C.; Machalická, K.; Eliášová, M.; Vokáč, M.: Numerical modelling of adhesive connections including cohesive damage, *Challenging Glass 6 - Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*, Delft University of Technology, 2018.
- [22] Madureira, F.; Ribeiro, M.: Strength prediction of single lap joints: 3d cohesive zone modelling, *Meeting on Aeronautical Composite Materials and Structures*, 2017.

SAŽETAK

Autor: Jakov Ratković

Naslov rada: Numeričko modeliranje lijepljenog spoja kompozitnog poluvratila i čeličnog umetka

Predstavljene su moguće izvedbe spajanja kompozitne cijevi i prirubnica (nosača tripoidnih križeva), odnosno elemenata sklopa poluvratila koji prenose torzijski moment s prijenosnika na kotače i obrnuto. Odabirom lijepljenog spoja kao najpovoljnije opcije, prikazana je problematika vezana uz analitička i numerička razmatranja lijepljenih spojeva. Pomoću analitičkih izraza, iz inicijalno određene geometrije pozicija sklopa poluvratila određena je krivulja raspodjele smičnog naprezanja unutar sloja ljepila, po duljini lijepljenog spoja. Zatim je, koristeći programski paket *Abaqus/Standard*, komercijalni software za numeričku analizu metodom konačnih elemenata (*FEA*), kreiran model dotičnog lijepljenog spoja. Nakon validacije numeričkih rješenja usporedbom dobivene raspodjele smičnog naprezanja s analitički određenom, predstavljene su četiri ispitne grupe u kojima je ispitan utjecaj određenih, pojedinačnih geometrijskih parametara na raspodjelu smičnog naprezanja u sloju ljepila. Konačno, prema zaključcima izvedenim na temelju ispitivanja provedenih u pojedinim ispitnim grupama, osmišljen je prilagođen profil nosača tripoidnih križeva čija je upotreba rezultirala znatnim smanjenjem vršnih vrijednosti smičnog naprezanja, a samim time i mogućnošću korištenja manjih dimenzija sklopa te posljedično tome uštedi na masi vozila.

Ključne riječi:

Lijepljeni spoj, vratilo, kompozitni materijali, MKE, Formula Student.

SUMMARY

Author: Jakov Ratković

Title: Numerical modelling of the adhesive joint between composite halfshaft and steel adherend

Possible solutions for joining of a composite tube and flanges (tripoid joint carriers), i.e. elements of halfshaft assembly that are transmitting torsional momentum from the drivetrain to the wheels and vice versa, are presented. After selecting the adhesive joint as an optimal solution, the major issues regarding analytical and numerical observations of adhesive joints are given. Using analytical relations, from the initially determined geometry of the adherends of the halfshaft assembly, the shear stress distribution in the adhesive layer, over the adhesive joint length was determined. Then, using *Abaqus/Standard*, a commercial software for numerical analysis using Finite Element Method, a model of the aforementioned adhesive joint was created. After validation of the numerical solutions by comparing the obtained shear stress distribution to the analytically determined one, the four test groups in which the impact of the individual geometrical parameters on the shear stress distribution in the layer of adhesive were studied. Finally, based on the conclusions made from performed simulations of abovementioned test groups, an adjusted profile of the tripoid joint carrier is created, usage of which resulted in significant reduction of peak shear stress values, and therefore in the ability to make the assembly smaller, which led to mass reduction.

Key words:

Adhesive joint, halfshaft, composite materials, FEA, Formula Student.