



ZAVRŠNO IZVJEŠĆE **o studentskoj praksi**

Student: Arian Karabegović

Matični broj studenta: 0069032033

Studijska godina: 2010./2011.

Modul: Konstruiranje i mehatronika

Ime akademskoga mentora: doc.dr.sc. Zoran Jurković

Ime industrijskoga mentora: Alan Klanac, D.Sc. (Nav.Arch.)

2011, Rijeka

1. Opće informacije *(ispuniti)*

Student			
Ime studenta: Arian Karabegović		Studijska razina: Diplomski	
Matični broj: 0069032033	Adresa e-pošte: akarabeg@riteh.hr		Telefon:
Razdoblje prakse	Od: 02.05.2011	Do: 20.05.2011	Broj sati: 120
Akademska institucija			
Sveučilište: Sveučilište u Rijeci			
Fakultet: Tehnički fakultet			
Adresa: Vukovarska 58		Grad: Rijeka	
Ime akademskoga mentora: Zoran Jurković		Pozicija: docent	
Adresa e-pošte: zoran.jurkovic@riteh.hr		Broj telefona: 051/651 466	
Poduzeće/institucija u kojem se ostvaruje praksa			
Ime: as2con d.o.o.			
URL: www.as2con.com			
Adresa: Slavka Krautzeka 83/A		Grad: Rijeka	
Ime industrijskoga mentora: Alan Klanac, D.Sc. (Nav.Arch.)		Pozicija: direktor uprave	
Adresa e-pošte: alan.klanac@as2con.com		Broj telefona: +385 (0) 51/219-591	

2. Zahvalnice

Zahvala svim mojim suradnicima na praksi jer su mi omogućili novi uvid u obavljanju inženjerskog posla, te mi ukazali na smjerove mogućeg daljnjeg razvoja mog znanja. Posebno im se zahvaljujem na njihovom strpljenju prilikom mojih mnogobrojnih upita.

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Ispitivanje dozvoljenih opterećenja konstrukcije brodske elastične spojke	2
2.1. Spojke	2
2.2. Elastične spojke	2
2.3. Konstrukcija brodske elastične spojke i proračun	3
2.3.1. Slučaj čistog smicanja svornjaka	4
2.3.2. Slučaj savijanja svornjaka	5
2.3.3. Ekvivalentno naprezanje u svornjaku	6
2.3.4. Slučaj torzije, čvrstoća glavčine	7
2.3.5. Maksimalni moment na pero	8
2.4. Zaključak	9
3. Novi materijali u strojarstvu i njihova primjena	10
3.1. Karbonska vlakna	10
3.2. Staklena vlakna	11
3.3. Postupci izrade dijelova iz kalupa od tkanina karbonskih i staklenih vlakana	12
3.3.1. Oprema	12
3.3.2. Vakumiranje mokrog laminata	15
3.3.3. Infuzijski vakuumski postupak	16
3.3.4. RTM injekcijski postupak	16
3.3.5. Ručno laminiranje	17
3.4. Izrada jarbola timarana Farrier F-22R	18
4. Zaključak	22
5. Prilog	23

1. Uvod

Kolegij stručna praksa II sam odradio u tvrtki As2con- alveus d.o.o. Tvrtka je počela sa radom 2003. god. kada je okupljena grupa istraživača i znanstvenika s ciljem istraživanja i unapređivanja znanosti, poslovanja i tehnologije. As2con- alveus d.o.o. je tvrtka za istraživanja, razvoj i primjenu inženjerskih i marketinških rješenja u industriji transporta i konstrukcija. Za ostvarenje optimalnih rješenja se koriste state-of-the-art metode i alati. Tvrtku čini grupa od 30 ljudi sa visokom stručnom spremom u inženjerstvu i ekonomiji/marketingu.



Analiziranje i dizajn konstrukcija kao i razvoj naprednih strukturalnih koncepata se provodi kroz inženjersku analizu, optimizaciju i odlučni sustav potpore. Izvedeći cjelokupni dizajn broda od koncepta do detaliziranja same konstrukcije. Pri tome se koriste različiti inženjerski paketi računalnih programa sa naglaskom na korisniku orijentiranim programima. Također tvrtka se bavi nadzorom i organizacijom gradnje novih brodova i ugradnje brodske opreme, te popravcima potonjih. Popravci uključuju krpanje oštećenja kompozitnim zakrpama i pokrovima. Nedavno je tvrtka uvela proizvodni program izrade i popravaka jedrilica i jedriličarske opreme kompozitnim materijalima uglavnom baziranim na karbonskim i fiber-glass materijalima.



2. Ispitivanje dozvoljenih opterećenja konstrukcije brodske elastične spojke

2.1. Spojke

Spojke služe za stalno ili povremeno povezivanje dvaju vratila radi prenošenja momenta torzije.

Osim prenošenja momenta, pojedine vrste spojki mogu imati dodatnu funkciju:

- prilagodbu odstupanjima osi vratila nastalih netočnom izradbom, netočnom ugradnjom ili pod djelovanjem opterećenja,
- prigušenje torzijskih vibracija,
- smanjenje oscilacija momenta torzije i udara pri pokretanju i u radu,
- upravljano ili automatsko uspostavljanje ili prekidanje prenošenja momenta torzije,
- osiguranje od preopterećenja ili neželjenog smjera okretanja i drugo.

U primjeni se nalaze različite vrste spojki, od najjednostavnijih krutih spojki, do najkompliciranijih tarnih i hidrodinamičkih spojki. Spojke se mogu podijeliti prema funkciji na:

- Krute spojke
- Kompenzacijske spojke
- Elastične spojke
- Izvrstive spojke

Krute spojke kruto spajaju dva vratila s jednakim ili različitim promjerima. **Kompenzacijske spojke**, kruto prenose moment torzije, ali dopuštaju i male uzdužne, poprečne i kutne pomake između vratila. **Elastične spojke**, elastično spajaju dva vratila, ublažavaju udare, prigušuju torzijske vibracije i smanjuju oscilacije momenta torzije, a pojedine izvedbe dopuštaju male uzdužne, poprečne i kutne pomake između vratila. **Izvrstive spojke** služe za spajanje i razdvajanje vratila u toku rada. Također postoji vrsta spojki koju nazivamo **sigurnosna spojka** koja ograničava moment torzije, to je recimo tarna spojka kod koje kad dođe do preopterećenja nastupi međusobno proklizavanje tarnih segmenata [1].

2.2. Elastične spojke

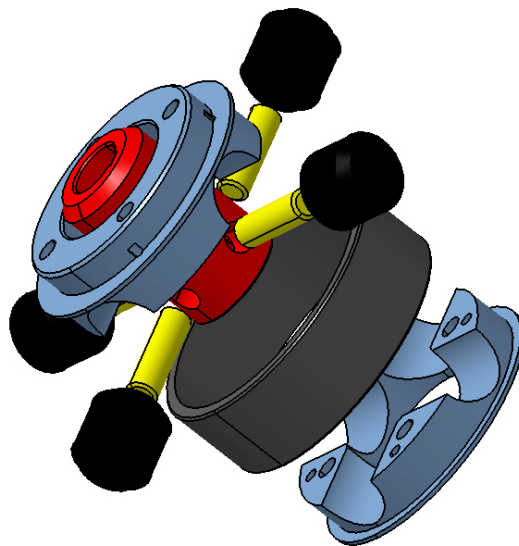
Elastične spojke imaju torzijsku elastičnost. Sastoje se iz dvije glavine povezane elastičnim elementima od gume, umjetnih masa, tekstila, metalnih opruga i sl. Zadatak elastičnih spojki je prigušivanje vibracija smanjivanjem oscilacija momenta torzije (npr. kod klipnih strojeva), te smanjivanje udarnih opterećenja nastalih naglom promjenom brzine pogonskog ili gonjenog stroja.

Pored navedenog, elastične spojke mogu kompenzirati manje pomake i manju nedoravnost osi spojenih vratila, koji su posljedica tolerancija kod izrade, netočne montaže, nejednolikog slijeganja temelja i sl. Kao mogući nedostatak većine elastičnih spojki treba navesti sile s kojima elastična spojka djeluje na spojene elemente nastojeći ih poravnati ili spriječiti njihove pomake. Te sile izazivaju poprečno, a ponekad i znatno uzdužno opterećenje vratila i ležajeva. Postoje različite izvedbe elastičnih spojki ali najčešće su [1]:

- Elastične spojke s pojasom,
- Elastične spojke sa valjkastim ulošcima,
- Elastične kandžaste spojke i
- Spojke s metalnim elastičnim elementima.

2.3. Konstrukcija brodske elastične spojke

Za naručioca tvrtku na temelju predloška (slika 1) i dimenzija elastične spojke bilo je potrebno izračunati maksimalni dopušteni okretni moment. Elastična spojka se sastojala od ulaznog vratila, čahure ulaznog vratila, 4 svornjaka i 4 gumena elementa, glavčine izlaznog vratila i izlaznog vratila. Ulazno i izlazno vratilo za čahuru odnosno glavčinu su vezani perima kako bi se osigurao prijenos momenta.



Slika 1.: Brodska elastična spojka

Prilikom sagledavanja sklopa uočeni su kritični konstrukcijski elementi: svornjak, glavčina i pero između glavčine i vratila za koje je izveden proračun. Maksimalno dopušteni okretni moment spojke izjednačen je s maksimalno dopuštenim okretnim momentom najkritičnijeg elementa, te je time osigurana funkcionalnost sklopa.

Pri analizi elastične spojke korištena je analitička metoda tj. analize opterećenja korištenjem teorije nauke o čvrstoći. U obzir su uzeta 5 moguća slučaja koja bi mogla izazvati kritična opterećenja na elastičnoj spojci, i to:

1. Čisto smicanje, koje bi dovelo do odreza svornjaka
2. Savijanje svornjaka pri pokretanju spojke
3. Ekvivalentna naprezanja u svornjaku
4. Torzijski moment na glavčini
5. Čvrstoća umetnutog pera

2.3.1. Slučaj čistog smicanja svornjaka

Za zadani materijal svornjaka Č1730 (podaci u tablici 1.) bilo je potrebno izračunati dopuštena opterećenja uzimajući u obzir dinamička svojstva sklopa u kojem se nalazi spojka. Koeficijent sigurnosti za klipne motore sa srednjim udarima u radu iznosi od 1,5 - 2,25. Koristeći konzervativan pristup u projektiranju uzet je koeficijent sigurnosti 2.

Tablica 1. Dinamička čvrstoća materijala svornjaka

Č1730	Čvrstoća na torziju (pulzirajuće) [N/mm ²]	Čvrstoća na savijanje (pulzirajuće) [N/mm ²]	Čvrstoća na vlak (pulzirajuće) [N/mm ²]
Trajna dinamička	400	635	545
Dopušteno naprezanje	200	317,5	272,5

Iz teorije o smicanju (1) su dobiveni maksimalni dozvoljeni okretni momenti ulaznog vratila za pojedini promjer ulaznog vratila je dobivena prema jednadžbi (2), te su rezultati prikazani u tablici 2.

$$F_{\text{krit}} = \tau \cdot A \quad (1)$$

$$M_{\text{max}} = n \cdot F_{\text{krit}} \cdot d/2 \quad (2)$$

Gdje su:

F_{krit} – kritična sila smicanja

τ – dopušteno naprezanje na torziju pri pulzirajućem opterećenju

A – površina poprečnog presjeka svornjaka

M_{max} – maksimalni dopušteni okretni moment ulaznog vratila

n – broj svornjaka

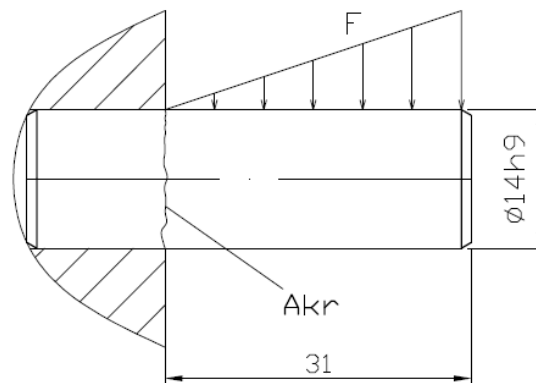
d – promjer svornjaka

Tablica 2. Maksimalni dozvoljeni okretni moment u slučaju čistog smicanja

Slučaj	Promjer ulaznog vratila d [mm]	Maksimalni dopušteni okretni moment [Nm]
1	25	1539
2	30	1847

2.3.2. Slučaj savijanja svornjaka

Kao u prethodnom slučaju za materijal svornjaka Č1730 potrebno je bilo odrediti dopuštena naprezanja na savijanje. Pretpostavljeno je najnepovoljnije opterećenje na svornjaku, prikazano na slici 2., gdje je također vidljiv i kritičan presjek na mjestu uklještenja na glavčini gdje se javljaju maksimalna naprezanja na savijanje.



Slika 2.: Pretpostavljeno opterećenje na svornjaku i kritični presjek

Iz teorije o savijanju (3) je dobivena maksimalna sila na savijanje pri kojoj nastupaju naprezanja u svornjaku jednaka dopuštenim naprezanjima.

$$M_{krit} = \sigma \cdot W \quad (3)$$

Gdje su:

M_{krit} – dopušteni moment savijanja svornjaka

σ – dopušteno naprezanje na savijanje pri pulzirajućem opterećenju

W – moment otpora poprečnog presjeka svornjaka

$$F_{\text{krit}} = 3 \cdot M_{\text{krit}} / 2 \cdot l \quad (4)$$

Gdje su:

F_{krit} – kritična sila na svornjak

l – duljina svornjaka izložena savijanju

Iznos maksimalne sile (4) s obzirom na dozvoljena normalna naprezanja u svornjaku iznosi 4136 N, te prema izrazu (2) maksimalni dopušteni okretni moment izračunat i dan u tablici 3.

Tablica 3. Maksimalni dozvoljeni okretni moment u slučaju čistog savijanja

Slučaj	Promjer ulaznog vratila d[mm]	Maksimalni dopušteni okretni moment [Nm]
1	25	206
2	30	248

2.3.3. Ekvivalentno naprezanje u svornjaku

Superponiranjem smičnog naprezanja prema izrazu (1) i naprezanja pri savijanju prema izrazu (3), izračunato je ekvivalentno naprezanje prema von Mises teoriji (5) gdje je dobivena vrijednost naprezanja veća od prethodnih čime je dopušteno opterećenje na svornjak smanjeno na 3460 N. Te su vrijednosti maksimalnih dopuštenih okretnih momenata dana u tablici 4.

$$\sigma_{\text{ekv}} = \sqrt{\sigma_s^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad (5)$$

Gdje su:

σ_s – dobivena naprezanja na savijanje u svornjaku

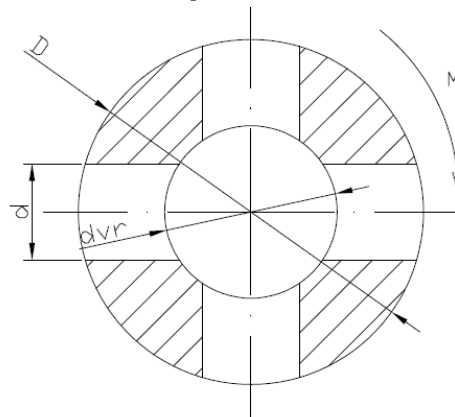
τ – tangencijalna smična naprezanje na svornjak

Tablica 4. Maksimalni dozvoljeni okretni moment u slučaju ekvivalentnih naprezanja

Slučaj	Promjer ulaznog vratila d[mm]	Maksimalni dopušteni okretni moment [Nm]
1	25	173
2	30	207

2.3.4. Slučaj torzije, čvrstoća glavčine

Zbog oslabljenja glavčine rupama u koje dolaze svornjaci bilo je potrebno prekontrolirati smična torzijska naprezanja u kritičnom presjeku (slika 3).



Slika 3.: Kritični presjek

Torzijski moment otpora za kritični poprečni presjek je dobiven prema jednadžbi:

$$W_t = \pi D^3 / 16 (1 - (d_{vr}/D)^4) - 4(d \cdot s (D-s)^2 / 2 \cdot D) \quad (6)$$

Gdje je:

s – debljina stijenke $(D - d_{vr}/2)$

Maksimalni dopušteni okretni moment u slučaju djelovanja torzije (tablica 5) na glavčinu je izračunat prema jednadžbi:

$$M_{max} = \tau \cdot W_t \quad (7)$$

Gdje je:

τ – maksimalno dopušteno naprezanje na torziju

M_{max} – maksimalni dopušteni moment ulaznog vratila preuzet iz slučaja za savijanje

W_t – torzijski moment otpora

Tablica 5. Maksimalni dozvoljeni okretni moment u slučaju djelovanja torzije na glavčinu

Slučaj	Promjer ulaznog vratila [mm]	Maksimalni dopušteni okretni moment [Nm]
1	25	3474
2	30	3246

2.3.5. Maksimalni moment na pero

Prema predlošku je bilo potrebno provjeriti i da li je dovoljna duljina klina za prijenos okretnog momenta (slika 4). Provjera je izvršena prema jednadžbi:

$$p = F_t / (0,5 \cdot h \cdot l_t \cdot i) \quad (8)$$

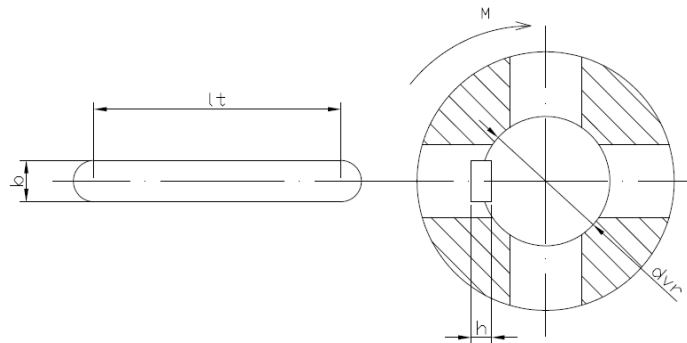
gdje su:

p – bočni tlak na pero

h – visina pera

l_t – nosiva duljina pera (42 mm)

i – broja pera



Slika 4.: Geometrija spoja pera

Dobiven je pritisak na bok pera u iznosu od 22 N/mm^2 te je utvrđeno da predviđena duljina pera zadovoljava. Izračunat je maksimalni dopušteni okretni moment ulaznog vratila s obzirom na kriterij pritiska na pero prema izrazu (9) i vrijednosti su dane u tablici 6.

$$M_{\text{krit}} = p_{\text{dop}} \cdot d_{\text{vr}} \cdot 0,5 \cdot h \cdot l_t \cdot i/2 \quad (9)$$

Gdje je:

p_{dop} - dopušteni pritisak na pero pri jakim jednostranim udarcima za glavčinu od čelika ($p_{\text{dop}} = 80 \text{ N/mm}^2$)

Tablica 6. Maksimalni dozvoljeni okretni moment u slučaju čvrstoće pera

Slučaj	Promjer ulaznog vratila [mm]	Maksimalni dopušteni okretni moment [Nm]
1	25	105
2	30	126

2.3.6. Zaključak

Iz analitičkog rješenja je vidljivo da je pero dimenzija 8x7x50 DIN 6885 najkritičniji konstrukcijski element koji daje najmanju vrijednosti maksimalnog dopuštenog okretnog momenta, za promjer ulaznog vratila 25 mm 105 Nm dok je za 30 mm 126 Nm.. U tablici 7 su prikazane usporedne vrijednosti okretnog momenta za pojedini razmatrani slučaj.

Tablica 7. Maksimalni dozvoljeni okretni momenti u 5 razmatranih slučajeva [Nm]

Promjer vratila	Odrež svornjaka	Savijanje svornjaka	Ekvivalentno nap. svornjaka	Torzija, čvrst. glavčine	Čvrstoća pera
25	1539	206	173	3474	105
30	1847	248	207	3246	126

3. Novi materijali u strojarstvu i njihova primjena

3.1. Karbonska vlakna

Karbonska vlakna (CF- Carbon Fibre) je materijal koji se sastoji od veoma tankih vlakana (0,005-0,01 mm promjera) sačinjenih uglavnom od atoma ugljika. Atomi ugljika su međusobno povezani u kristalnu strukturu koja je uglavnom paralelno orijentirana duž osi vlakna. Orijentacija kristala čini vlakno veoma čvrstim s obzirom na njezinu veličinu. Nekoliko tisuća karbonskih vlakana je isprepletno zajedno u oblik užeta, koji se mogu koristiti kao takvi ili se mogu isplesti u tvornicama u različite strukture sa različitim kutevima orijentacije vlakana međusobno (slika 6.).

Karakteristike karbonskih vlakana su velika savitljivost, visoka vlačna čvrstoća, mala težina, visoka toplinska otpornost i mali koeficijent toplinskog rastezanja čineći materijal veoma pogodnim za korištenje u zrakoplonoj i svemirskoj tehnologiji, inženjerstvu, vojnoj industriji, auto-moto industriji i u drugim natjecateljskim sportovima. No karbonska vlakna su relativno skuplja u odnosu na slične vlaknaste materijale kao npr. staklena vlakna (fiber glass) ili plastična vlakna (plastic fibers).



Slika 6.: Ukrštena struktura karbonskih vlakana (tkanina)

Atomska struktura karbonskog vlakna je slična grafitu, sadržavajući ravninski posložene atome poslaganih u heksagonalnu mrežu. Razlika leži u načinu međusobnog vezanja tih mreža. Kod grafita mreže su povezane paralelno i povezane su slabim Van der Waals-ovim silama, dajući grafitu mekoću i krhkost. Kod karbonski vlakana mreže su međusobno zgužvane dajući karakteristike visoke vlačne čvrstoće (do 5 650 MPa) i visokog modula elastičnosti (do 531 GPa).

Karbonska vlakna se najčešće koriste kao učvršćivač u kompozitnih materijala, uglavnom klasa materijala znana kao karbonska vlakna ili grafit očvršćivač polimera. Nopolimerni materijali također mogu služiti kao matrica (povezivač) karbonskih vlakana. Zbog nastanka metalnih karbida ili korozije, karbonska vlakna imaju ograničeni uspjeh u kompozitima sa metalnom matricom [2].

3.2. Staklena vlakna

Stakleno vlakno (slika 7.) je sačinjeno od brojnih tankih vlakana stakla. Nastaje kad se staklo bazirano na siliciju ekstrudira u mnoge malog promjera vlakna koji će biti podobni za kasnije tekstilno procesiranje (tkanine od staklenog vlakna).



Slika 7.: Staklena vlakna u obliku tkanine

Najčešće vrste staklenih vlakana su uglavno E-staklo (Aluminij- Bromsilicij staklo sa manje od 1% alkalnih oksida, i najviše se koristi za staklo-plastiku), A-staklo (s alkalnom bazom i malim ili nikakvim udjelom bor oksida), E-CR-staklo (Aluminij-silicijskom bazom i s manje od 1% alkalnih oksida, ima visoku otpornost na kiseline), C-staklo (s alkalnom bazom i visokim udjelom bor oksida), D-staklo (borsilicijsko staklo sa visokom dielektričnom konstantom), R-staklo (aluminij-silicijsko staklo bez MgO i CaO, dobre mehaničke osobine) i S-staklo (aluminij-silicijsko staklo bez CaO ali sa visokim udjelom MgO, visoka vlačna čvrstoća).

Tablica 8. Karakteristike pojedine vrste staklenih vlakana

Vrsta vlakna	Vlačna čvrstoća (MPa)	Čvrstoća na tlak (MPa)	Gustoća (g/cm ³)	Termička dilatacija μm/(m°C)	Temperatura tečenja (°C)
E-staklo	3445	1080	2,58	5,4	846
S-staklo	4890	1600	2,46	2,9	1056

Potrebno je istaknuti da na mehaničke osobine staklenih vlakana utječu starenje vlakana i vlaga koja lako uđe u vlakno i izaziva mikropukotine i površinske greške čime je smanjena čvrstoća samog laminata [2].

3.3. Postupci izrade dijelova iz kalupa od tkanina karbonskih ili staklenih vlakana

3.3.1. Oprema

Kako bi se stvrdnuo laminat (karbon ili staklena vlakna) potrebno je dodati materijal koji će biti matrica odnosno koji će činiti vezu između slojeva armature. Najčešće su to smole ali mogu to biti i plastike, a rijetko i metali.

Smole koje se upotrebljavaju za izradu laminata su poliesterske, vinilesterske, epoksidne, fenolske i melaminske. Smole služe za povezivanje slojeva armature. Nakon nanošenja, pod utjecajem temperature, smole se suše i otvrdnjavaju. Zbog svestranosti i cijene poliesterske smole se najviše koriste. Epoksidne smole također imaju dobra svojstva, ali ih se zbog cijene i štetnosti za zdravlje čovjeka rjeđe upotrebljava. Kod smola su bitne karakteristike otvrdnjavanja i viskoznosti. Međutim brzina otvrdnjavanja smola neovisi samo o tipu smole već i ovrsti ubrzivača i katalizatora. Viskoznost je naročito bitna kod nekih postupaka obrade gdje se smola pute pumpe i cijevi dovodi do laminata pa je stoga poželjna osobina manje viskoznosti [3].

Katalizatori su sredstva koja se dodaju smolama da bi počela polimerizacija ili reakcija otvrdnjavanja. Imaju oblik praha, paste ili tekućine. Radi diobivanja jednoličnog produkta katalizatori se moraju sa smolom što bolje izmješati. Ubrzivači su također potrebni za otvrdnjavanje smole. Oni se dodaju smolama kako bi se ubrzalo otvrdnjavanje pri sobnoj temperaturi. Često su već dodani u smoli, ali se mogu naći i odvojeno. Ako je ubrzivač dodan smoli, smola najčešće ima kraći rok trajanja od smole bez ubrzivača.

Odjeljivači su potrebni kako bi se izbjeglo moguće lijepljenje kalupa i odljevka. Naime, smola ima jako dobra adhezivna svojstva i potrebno je nanijeti sloj odjeljivača kako bi se odvojili kalup od odljevka. Odjeljivači su vosak, polivinil alkohol, acetil celuloza, a dolaze u obliku tekućine ili žitke mase. Ponekad se upotrebljavaju i folije celofana, polietilena ili polivinilklorida.

Osim svega navedenog potrebna je i različita druga oprema kao što su pokrivači, trake za brtvljenje, ljepila, tkanina za upijanje viška smole (peel-ply)(slika 9.), cijevi, spojnice, ventili i vakuumske pumpe.

Pokrivači (slika 8.)su važan dio opreme vakuumnog sistema. Oni tvore nepropusnu barijeru između okolnog zraka i sistema, a njihova nepropusnost osigurava pravilno i nesmetano izvođenje postupka. Trake za brtvljenje upotrebljavaju se za lijepljenje pokrivača sa kalupom, ali služe i za osiguravanje drugih nepropusnih spojeva (npr. spojevi cijevi i ventila, spojevi dvaju ili više cijevi).



Slika 8.: Primjena pokrivača prilikom izvođenja infuzijskog vakuumnog postupka

Razna ljepila upotrebljavaju se za privremeno lijepljenje slojeva staklene armature. Peel-ply je tkanina koja upija višak smole i ona je prvi sloj vakuumnog omotača. Osim što upija višak smole, laminatu daje hrapavu površinu. Na taj način poboljšava adhezivna svojstva površine te omogućava bolje prijanjanje boje na površinu. Mrežice služe za protok i raspoređivanje smole po laminatu. Pogodne su za infuziju poliesterskih ili epoksidnih smola.



Slika 9.: Peel-ply

Cijevi, spojnice i ventili su bitan dio sistema. Cijevi sistema služe za dovodenje smole u laminat, te odvođenje viška smole. Njihovo postavljanje pažljivo se izračunava, a međusobni spojevi se spajaju i brvti.

Vakuumske pumpe sastavni su dio sistema. Postoje kao samostalni dio ili u sklopu postrojenja. Postrojenje pumpi (slika 10.) obično obuhvaća set pumpi, manometar, odgovarajuće filtere za smolu i čestice, te određeni broj cijevi i priključaka.

Pumpe koje se koriste kod vakuumskih postupaka najčešće postižu podtlak od 0,3 do 0,1 vrijednosti atmosferskog tlaka. Kod većih postrojenja podtlak koji se stvori ispod vakuumskog pokrivača može iznositi i do 0,005 vrijednosti atmosferskog tlaka, ovisno o pumpi koja se koristi. Dakle za postizanje vakuuma najvažnija je pumpa.

Krilna vakuumska pumpa slična je krilnim pumpama koje se inače koriste u industriji. Razlika je u lopaticama pumpe, koje su kod vakuumske načinjene od tvrdog grafitnog materijala, za razliku od običnih pumpi koje imaju gumene lopatice. Krilna vakuumska pumpa s tekućim prstenom koristi tekući medij za stvaranje vakuuma. Pod utjecajem centrifugalne sile u komori pumpe rotira se radni medij. Kao radni medij najčešće se koristi ulje, premda se može i koristiti voda. Podtlak kod ovakvih pumpi može biti i do 0,05 vrijednosti atmosferskog tlaka. Ovakva pumpa zahtjeva ugrađeni separator ulja i čestica, budući da je često zrak u radionici kontaminiran različitim česticama prašine.

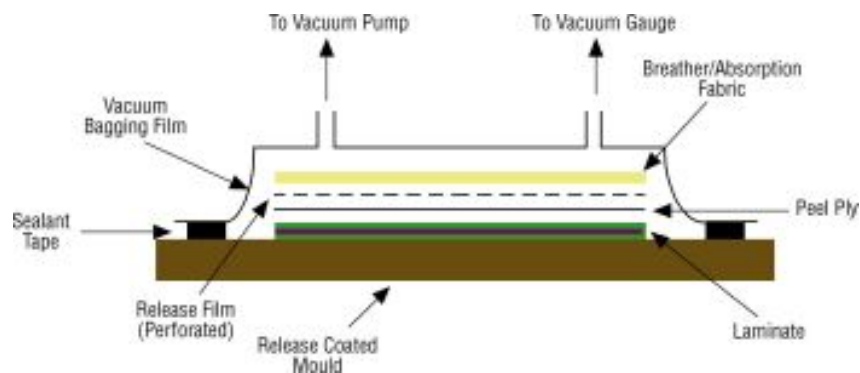


Slika 10.: Vakuusko postrojenje

Vakuuska postrojenja najčešće se sastoje od dvije pumpe od kojih je jedna jača i služi za izvođenje procesa, dok je druga pomoćna pumpa. Pomoćna pumpa je manjeg kapaciteta, a služi kao ispomoć glavnoj pumpi ili u slučaju kvara ona preuzima funkciju glavne pumpe [3].

3.3.2. Vakuumiranje mokrog laminata

Vakumiranje mokrog laminata (eng. Vacuum bagging) (slika 11.) je postupak vrlo sličan infuzijskom vakuuskom postupku. Pritisak pokrivača na laminat dobiva se stvaranjem podtlaka pomoću vakuuske pumpe. Kod ovog postupka smola se ne uvlači u laminat pomoću pumpe, već je potrebno smolu ručno nanijeti u laminat. Višak smole istiskuje se pritiskom pokrivača na mokri laminat, te podtlakom stvorenim pomoću vakuuske pumpe.



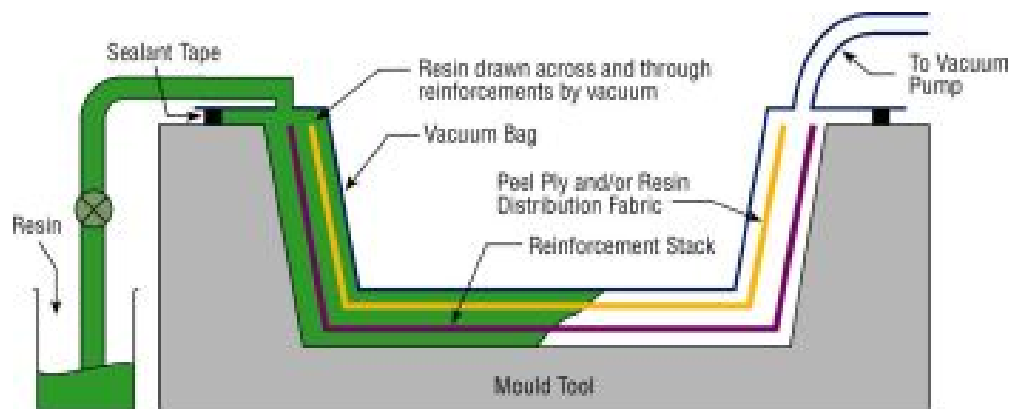
Slika 11.: Postupak vakuumiranja mokrog laminata

Na ovaj način praktično je izrađivati manje dijelove. Gubici smole koja se nepovratno baca su znatno manji, a manipulacija kalupom i materijalom je puno jednostavnija. Negativan faktor kod vakuumiranja mokrog laminata je i vrijeme otvrdnjavanja smole. U tu svrhu koriste se epoksidne smole

koje otvrdnjavaju relativno sporije od ostalih. Za složenije ili veće objekte nije preporučljivo koristiti ovaj postupak jer slaganje armature i nanošenje smole je vremenski predugo [3].

3.3.3. Infuzijski vakuumski postupak

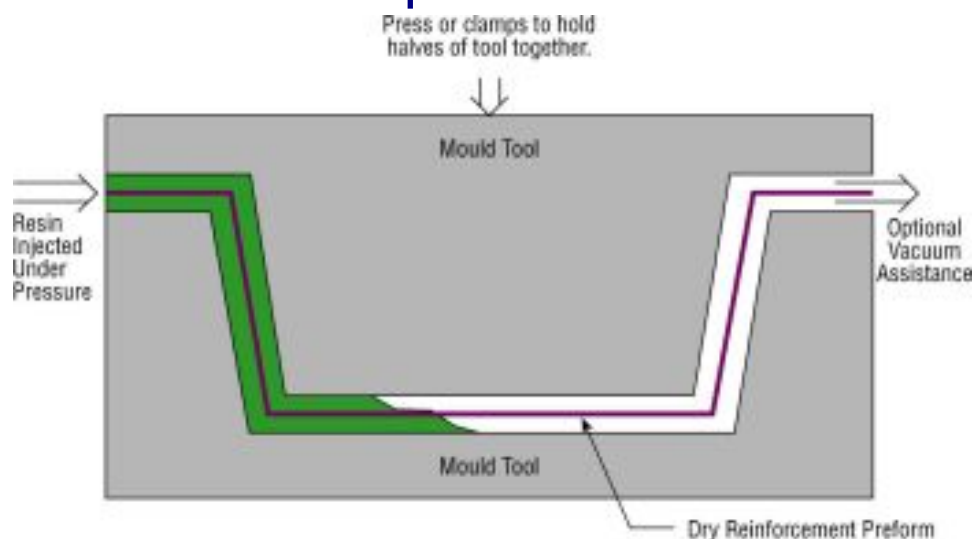
Kod infuzijskog vakuumskog postupka smola se pomoću stvorenog podtlaka utiskuje u laminat. Sistem je shematski prikazan na slici 12. Slojevi staklene ili karbonske tkanine poslažu se u kalup i prekriju pokrivačem. Cijeli sistem se nepropusno brtvi. Na strani sistema gdje je smještena vakuumska pumpa stvara se podtlak, dok je na strani sistema gdje je smještena smola atmosferski tlak. Na taj način stvorena je razlika tlaka koja uvlači smolu. Radi pravilnijeg unošenja smole u pojedine djelove kalupa, postavlja se sistem šupljih cijevi koje omogućavaju protok smole. Kada se laminat dovoljno natopi višak smole odvodi se u posebnu posudu (separator za smolu) sistemom odvodnih cijevi [3].



Slika 12.: Proces infuzijskog vakuumskog postupka

3.3.4. RTM injekcijski postupak

RTM injekcijski postupak (engl. Resin Transfer Moulding) (slika 13.) je postupak u kojem se smola pod tlakom tjera u laminat. Nešto je složeniji za izvedbu od infuzijskog vakuumskog postupka, a može se koristiti kako za velike, tako i za male objekte.

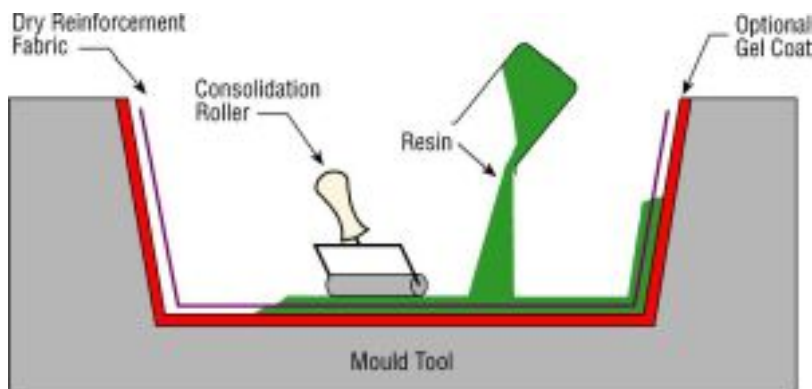


Slika 13.: RTM injekcijski postupak

Pumpa stvara tlak koji tjera smolu u laminat kroz sistem cijevi. Staklena/karbonska armatura posložena je u kalupu i pritisnuta pokrovom kalupa. Pokrov kalupa ima isti oblik kao i kalup, te je izrađen od istog materijala kao i kalup. Na pokrov kalupa održava se konstantan pritisak koji sprečava deformiranje laminata. Na izlazu se opcionalno može priključiti vakuumska pumpa koja stvara podtlak i time dodatno olakšava infuziju smole u armaturu laminata. Nakon što smola u potpunosti prodre u laminat zatvaraju se ulazi smole. Pokrov kalupa skida se tek nakon što je laminat otvrdnuo [3].

3.3.5. Ručno laminiranje

Smola se ručno nanosi na armaturu (slika 14.). Najčešće se nanosi valjcima ili kistom koristeći valjak sa zupcima za utjerivanje smole dublje u laminat. Laminat se ostavlja da se stvrdne na atmosferskom tlaku [3].



Slika 14.: Postupak ručne laminacije

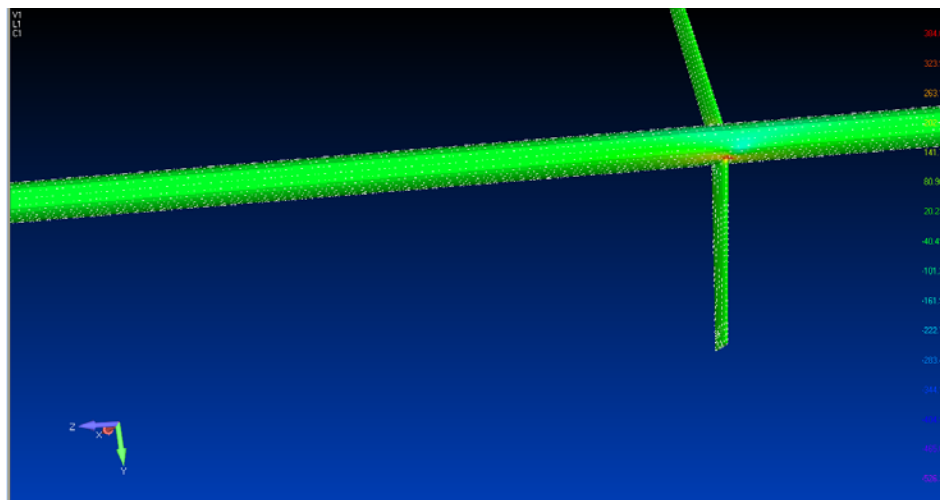
3.4. Izrada jarbola trimarana Farrier F-22R

Farrier F-22R (slika 15.) je sportski i obiteljski trimaran. Sastoji se od tri trupa koji su putem 4 ruke i mehanizama vezani međusobno, 11 metarskog jarbola i ostale jedriličarske opreme.



Slika 15.: Farrier F-22R

Veličina jarbola je dana od proizvođača dok je potreban broj slojeva i vrsta slojeva karbonske tkanine riješen numeričkom analizom i to metodom konačnih elemenata. Na FEM modelu (slika 16.) je uočeno da je mjesto spoja križa sa jarbolom pod većim vlačnim naprezanjem (384 MPa) što je očekivano s obzirom da je to mjesto koncentrador naprezanja zbog napinjanja jedara koje jarbol povlače suprotno od smjera vjetra. Također i mjesta gdje se jarbol sartiijama veže za pramac i plovke su mjesta povećanih naprezanja te su shodno tome postavljena ojačanja u obliku zakrpa karbona.



Slika 16.: FEM model jarbola F-22R, naprezanja

Izradi jarbola se pristupilo tehnikom ručne laminacije. Prije samog procesa izrade bilo je potrebno izraditi detaljan plan laminacije (prilog 1) tj. tehnološki proces izrade. Potrebno ga je izvest detaljno kako se ne bi pojavile nedoumice tokom izrade što može prouzrokovati greške i porast troškova za njeno ispravljanje.

Kao prvi korak pri izradi jarbola potrebno je izraditi kalup preko kojeg će se izvršiti laminacija slojeva karbona. Pri izradi su korištene drvene letve duljine preko 12 metara na koje stavlja stiropor na duljini od 11 metara. Stiropor je korišten zbog njegovog lakog oblikovanja kako bi se dobio odgovarajući poprečni presjek jarbola.

Nakon izrađenog kalupa bilo je potrebno izvršiti potrebnu pripremu površine preko koje će se vršiti laminacija kako se ne bi laminat zalijepio za kalup. Za tu svrhu su korišteni najlon, vosak i polivinilni alkohol. Preko stiropora je stavljen najlon te preko njega je nanoseno 2 sloja voska i 2 sloja polivinilnog alkohola.

Za samu laminaciju su bile potrebne dvije različite vrste tkanine od karbonskih vlakana. Prva je ukrštena karbonska vlakna pod kutem od 30° (CBX- Carbon bias X) te je to prvi i završni sloj preko cijelog jarbola. Druga je jednosmjerna karbonska vlakna 0° (CUD- Carbon unidirectional) (slika 17.). Za povezivanje (matrica) je korištena smola LH 165 i očvršćivač H 133 koji su izmješani u točno određenim omjerima.



Slika 17.: Tkanina s jednosmjernim karbonskim vlaknima

Prvo je ručno postavljen prvi sloj tkanine karbona CBX 400 ($\pm 30^\circ$) preko kalupa te je nasena mješavina smole i očvršćivača s valjkom na način da prodre smola kroz čitav presjek karbona. U slučaju nedovoljno smole laminat će na djelovima biti suh te je to izvor grešaka u dijelu u obliku pukotina čime se čvrstoća dijela smanjuje. Nadalje se nanosi naizmjenično sloj karbona i natapa se smolom kao što je prikazano u laminat planu danom u prilogu.

Kako je iz FEM analize utvrđeno mjesto najvećih naprezanja na mjestu spoja križa sa jarbolom i na mjestima gdje se jarbol veže sartijsama za pramac i plovke bilo je potrebno postaviti dodatne zakrpe (ojačanja) karbona na tim mjestima. Za to su korištena dva sloja zakrpa (patch) prvi od karbona CUD 150 (0°) veličine 250x250 mm i drugi CBX 400 ($\pm 30^\circ$) veličine 500x500 mm.

Nakon izvršene laminacije svih slojeva karbona postavljen je peel-ply (upijač viška smole) po obodu jarbola i sve je stegnuto sa celofanom te pušteno dva dana da se smola osuši i laminat skrutne.

Potom je izvršeno raskalupljivanje jarbola skidajući celofan i peel-pla sa oboda nakon čega su uočene neke greške u samom postupku izrade. Greške su bile naboravanje mokrog laminata prilikom čega je došlo do pojave sitnih brijegova na jarbolu, i zbog same težine jarbola i razmaka oslonaca na koje se postavio kalup došlo je do malog progiba. Te greške su kasnije otklonjene dodatnom operacijom nanošenjem kita i ravnanjem svih nepravilnosti. Također pri raskalupljivanju jezgre kalupa je došlo do poteškoća. Uklonjene su drvene letve i provucena je čelična bodljikava žica i struganjem po stiroporu on je djelom uklonjen. No tim struganjem je povlačen i prvi sloj najlona u kojem se skupljala mješavina stiropora s neosušenim PVA premazom i acetonom koji je trebao služiti kao otopivač neuklonjenog stiropora čime je nastao čep u jezgri jarbola na otprilike 5 metara. No to se kasnije riješilo sa napravom u obliku harpuna koja je izrađena na licu mjesta. Zabijanjem vrška u čep i rotiranjem njega samog povlačio se komad po komad najlona s mješavinom stiropora.



Slika 18.: Gotovi jarbol Farrier-a F-22R

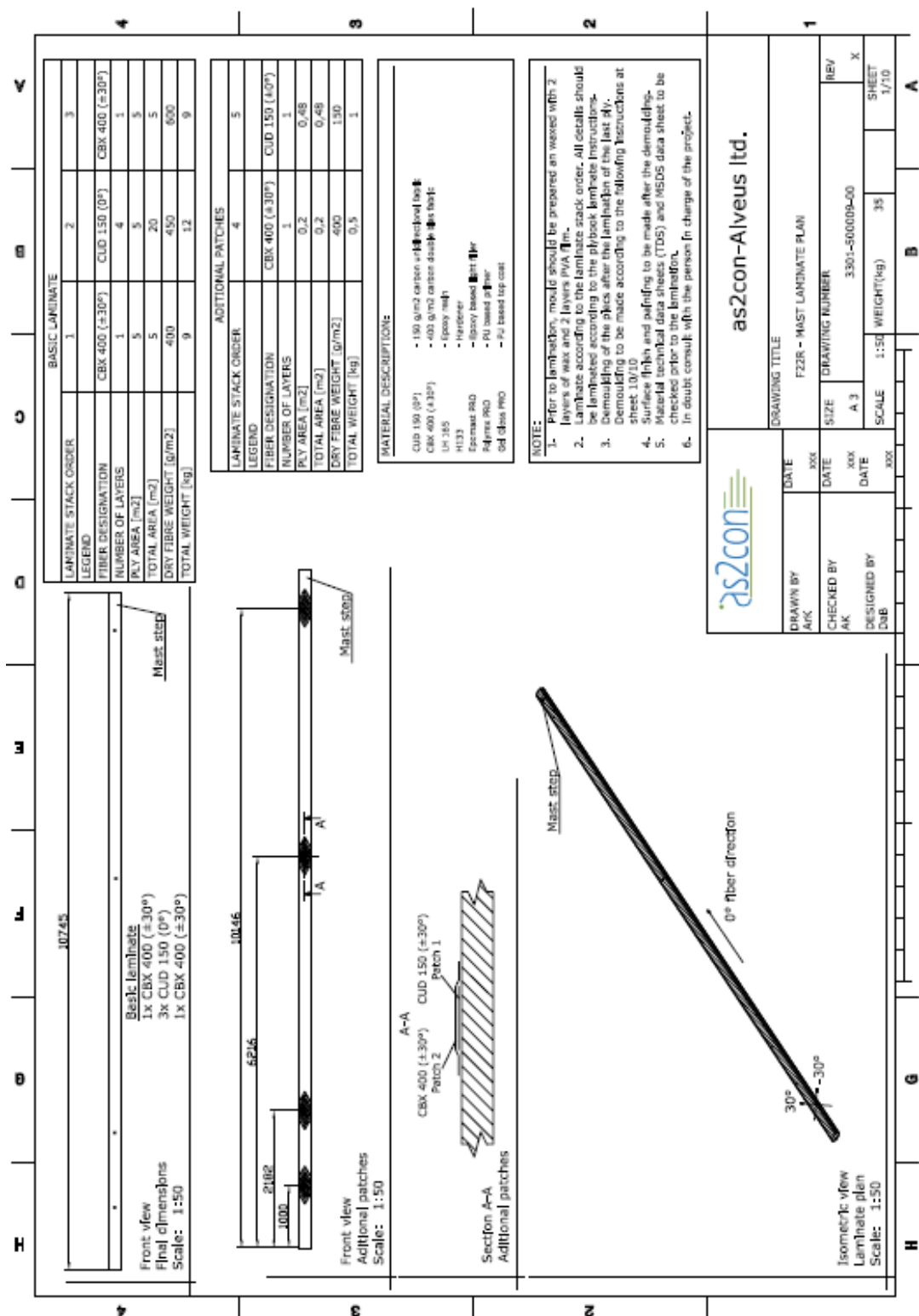
Nakon uspješnog raskalupljivanja postavio se križ i zalaminirana su dodatna karbonska pojačanja za sigurnost tog spoja. Završeni jarbol F-22R prikazan je na slici 18.



4. Zaključak

U vremenu provedenom u tvrtki sam prošao rad na inženjerskim problemima u konstruiranju, ispitivanju konstrukcija, izradi tehnološke dokumentacije za izradu opreme kompozitnih jedrilica do sudjelovanja u samoj izradi u proizvodnom pogonu. Vrijeme provedeno u navednoj tvrtki mi je otvorilo nove poglede pristupu pojedinim inženjerskim problemima, kao i prvi susret sa naprednim, novim materijalima te njihovim mogućnostima u strojarstvu koje će mi svakako pomoći u mojem budućem inženjerskom radu.

5. Prilog





Literatura

- [1] Boris Obsieger, Spojke, Zigo Rijeka 2004.
- [2] www.wikipedia.org
- [3] Davor Bolf, Tehnološki postupak izrade trupa motorne brodice „Marina 37 yacht“ infuzijskim vakuumskim postupkom, Rijeka, studeni 2005.

Datum: _____ **Mjesto:** _____

Potpis studenta:

Potpis industrijskoga mentora:
