



Aleksandar Simonović, Vuk Dragović, Ognjen Peković, Velimir Radosavljević¹

PRIMENA INŽENJERSKIH SOFTVERA PRI PROJEKTOVANJU KOMPOZITNIH KOMPONENATA VETROTURBINE²

Rezime

Zbog svojih višestrukih prednosti u odnosu na metale, primena kompozitnih materijala u proizvodnji lopatica vetroturbin je veoma rasprostranjena. Velika kompleksnost projektovanja, analize i izrade odgovornih delova od kompozitnih materijala rezultovala je pojavom brojnih softverskih alata koji se bave različitim fazama projektovanja i izrade kompozitnih delova. Korišćenjem posebnog modula za kompozitne konstrukcije u okviru programskog paketa CATIA V5 moguće je efikasno konstruisati kompozitne delove. U ovom radu prikazan je proces preliminarnog projektovanja kompozitne lopatice vetroturbin primenom paketa CATIA V5 i ukazano je na dalje mogućnosti korišćenja CATIA-e pri izradi glavnog projekta lopatice.

1. UVOD

Kompozitni materijali su kombinacija dva ili više materijala, različitih fizičkih i hemijskih svojstava među kojima nakon spajanja ostaje prepoznatljiva fizička granica na makroskopskom i mikroskopskom nivou. Nakon izrade kompoziti poseduju superiornije strukturalne karakteristike u odnosu na pojedinačne materijale od kojih su napravljeni. Kompozitni materijali (a posebno vlaknima ojačani kompozitni materijali) našli su veliku primenu u avio i auto industriji, brodogradnji, procesnoj tehnici i dr. Vlaknima ojačani kompozitni materijali sastoje se od ojačanja (armature) u obliku vlakana i nosača (matrice) od polimera (smole). Zbog svojih dobrih osobina, pre svega lakog oblikovanja, visoke čvrstoće i modula elastičnosti, male težine i otpornosti na zamor kompozitni materijali se koriste za izradu lopatica i kapotaža ali i drugih komponenata vetroturbin. Lopatice se izrađuju od laminarnih (slojevitih) kompozita koji se dobijaju slaganjem slojeva armature koji se impregniraju smolom i procesom polimerizacije očvršćavaju na taj način formirajući laminat odnosno kompozit.

Na karakteristike kompozita osim materijala matrice i armature utiču i njihov težinski (zapreminski) odnos kao i geometrijski raspored armature u matrici. Za razliku od metala, laminarni kompozitni materijali su neizotropni i nehomogeni što njihovu analizu čini znatno komplikovanijom. Sa druge strane upravo zahvaljujući ovim osobinama kompozita konstruktor može da napravi materijal čije mehaničke osobine odgovaraju funkcionalnim zahtevima. Povoljan odnos težine i čvrstoće, koji je i najveća prednost kompozita postiže se pažljivim odabirom slojeva, njihovim rasporedom i orijentacijom. U cilju dobijanja kompozita sa dobrim karakteristikama konstruktor mora izvršiti komplikovane analize i proračune što neminovno dovodi do upotrebe računara u projektovanju kompozitnih delova.

Računarsko modelovanje i analiza kompozitnih delova prevazilazi mogućnosti standardnih softverskih paketa. Upotreba kompozitnih materijala najčešće je motivisana željom da se minimizira težina a da se u isto vreme zadovolje postavljeni zahtevi u smislu otpornosti konstrukcije. Usled velikog broja parametara

¹ doc. dr Aleksandar Simonović dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, email: asimonovic@mas.bg.ac.rs

Vuk Dragović dipl. inž, WING d.o.o, Beograd, tel. 3030-588, e-mail: office@wing.rs

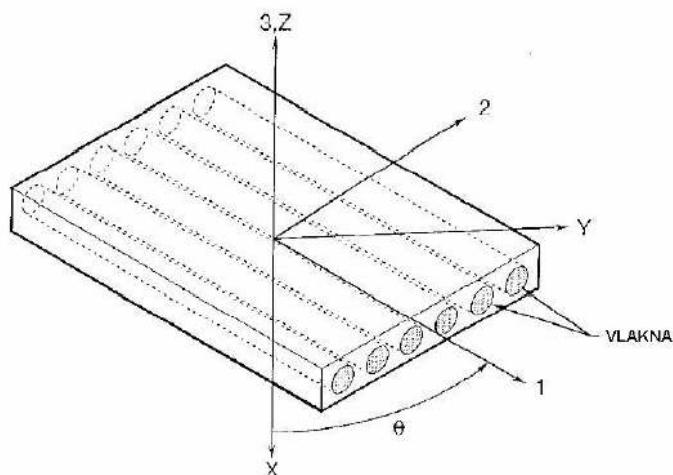
Ognjen Peković dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, e-mail: opekovic@mas.bg.ac.rs

prof. dr Velimir Radosavljević dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-338,

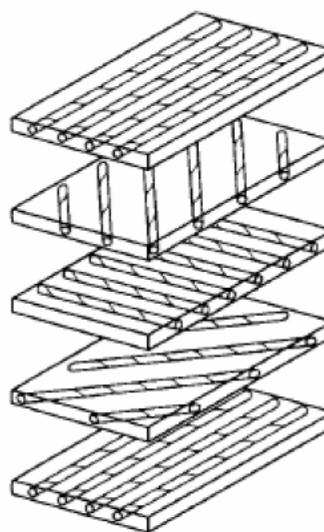
email: vradosavljevic@mas.bg.ac.rs

² Rad predstavlja deo istraživanja za projekat TR 35035 koje je finansirano od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije.

koji utiču na karakteristike kompozita optimizacija strukture je izuzetno složen zadatak. U tu svrhu u poslednjoj deceniji na tržištu se pojavilo više softverskih alata koji proces optimizacije kompozitnih struktura značajno olakšavaju.



Slika 1.



Slika 2.

Alati koji se trenutno nude na tržištu pokrivaju sve faze izrade kompozitnih delova: modelovanje geometrije, definisanje i modelovanje laminata, analizu laminata na makro i mikro nivou u cilju određivanja elastičnih karakteristika materijala, proračuna čvrstoće metodom konačnih elemenata, optimizaciju konstrukcije, izradu kalupa i alata za proizvodnju i simulaciju procesa proizvodnje

2. PROCES PROJEKTOVANJA LAMINARNIH KOMPOZITNIH DELOVA

Projektovanje kompozitnih delova (slika 3.) je veoma složen, multidisciplinarni problem koji zahteva mnogo različitih specifičnih znanja i iskustva. Proces nikada nije jednosmeran i za dobijanje kvalitetnog kompozitnog proizvoda inženjeri se susreću sa velikim izazovima u svakoj fazi projekta.



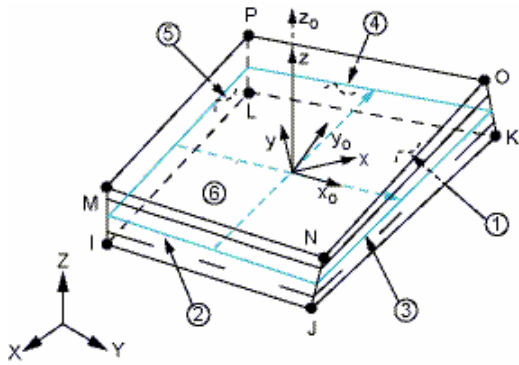
Slika 3.

Saradnja između inženjera koji konstruišu, vrše analize i proizvode kompozitne delove je ključan faktor u proizvodnji kompozita. Kako tržište nameće stroga vremenska ograničenja često se ova tri procesa odvijaju istovremeno pri čemu svaka izmena u jednoj od faza uzrokuje novu iteraciju u celokupnom procesu.

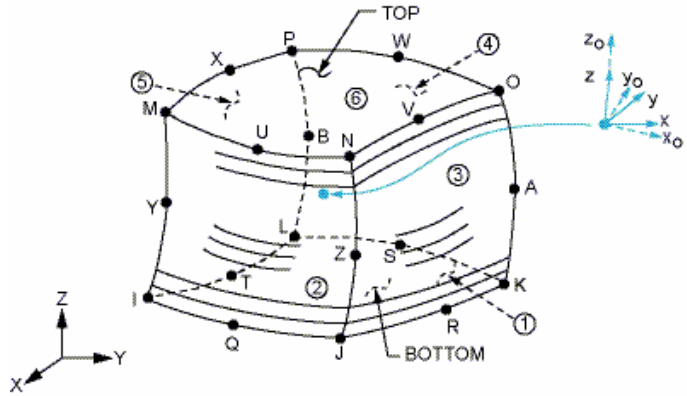
Definisanje geometrije kompozitnih delova vrši se u standardnim CAD paketima za modelovanje.

Definisanje laminata i analiza njihovih karakteristika je važan korak od koga zavise krajnje performanse dela. Današnji softverski alati nude automatizovano izračunavanje karakteristika laminata sastavljenog od proizvoljnog broja i orijentacije slojeva (lamina), sa različitim materijalima armature i matrice.

Proračun čvrstoće vrši se metodom konačnih elemenata, i svi vodeći softverski paketi za MKE proračune poseduju module za proračun laminarnih kompozita. Mreža konačnih elemenata sastavljena je od 2D elemenata tipa ljuski (slika 4.) ili od laminarnih 3D solid (slika 5.) i 1D grednih elemenata.



Slika 4. Laminarni SOLSH190 2D element



Slika 5. Laminarni SOLID186 3D

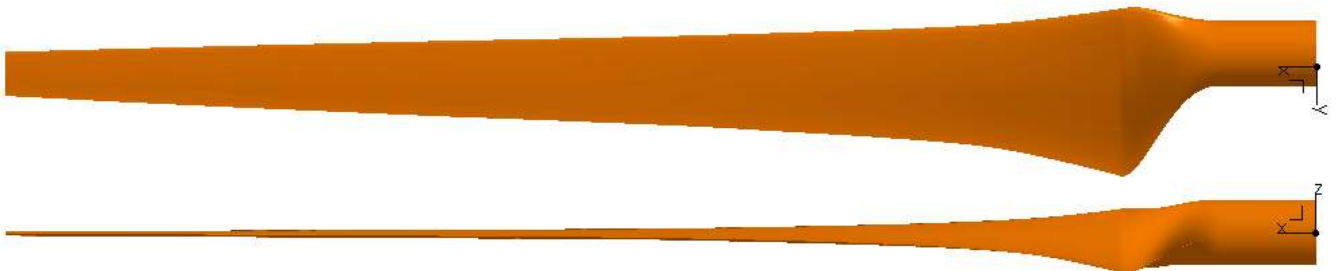
Nakon završenog preliminarnog dizajna, pred inženjere se postavlja pitanje poboljšanja i optimizovanja konstrukcije. U cilju što veće uštede mase inženjer mora da pronađe optimalno rešenje za broj slojeva, način promene broja i vrste slojeva po zonama, elemente ukrućenja itd. Za sva rešenja koja mogu da zadovolje postavljene uslove treba potom odrediti koeficijente sigurnosti, proceniti mogućnost i troškove proizvodnje te izabrati ono koje je optimalno.

Sama izrada kompozitnih delova je veoma vremenski zahtevna i traži angažovanje velikog broja radnika. Da bi se ostvario zahtevani kvalitet, armaturna platna ili rovinzi moraju tačno pratiti konturu kalupa i ostati u kontaktu sa površinom kalupa u svakoj tački. U slučaju velikih ili višestrukih krivina mogu se javiti problemi u vidu stvaranja nabora na platnima ili praznina čime se značajno degradiraju osobine kompozita. U tu svrhu potrebno je uraditi analizu drapiranja, odnosno proveriti da li platna mogu da isprate konturu kalupa ili je potrebno napraviti isečke. Bilo da se radi o ručnoj ili automatizovanoj proizvodnji, tačnost postavljanja pojedinačnih lamina u kalup kao i redosled postavljanja su veoma značajni. Kod odgovornih kompozitnih delova u avio i auto industriji kao i kod proizvodnje lopatica vetroturbina koriste se kompjuterski sistemi kod kojih se preko snimka kalupa u realnom vremenu prikazuju konture slojeva i omogućava precizno postavljanje i orijentacija odgovarajućih slojeva.

3. IZRADA GEOMETRIJSKOG MODELA LOPATICE

Spoljašnji oblik lopatice posledica je aerodinamičkog proračuna, strukturalnih zahteva i mogućnosti proizvodnje. Na osnovu zahtevanih performansi vrši se aerodinamičko oblikovanje lopatice, pri čemu se određuju opterećenja koja služe za dimenzionisanje strukturalnih elemenata. Sagledavanjem mogućnosti proizvodnje i ekonomskih aspekata menja se izgled lopatice i kreće se u novu iteraciju u procesu projektovanja. Proces nije linearan i ponavlja se dok se ne nađe rešenje koje zadovoljava postavljene uslove.

Osnovni aerodinamički oblik lopatice definisan je prečnikom rotora, izabranim aeroprofilima i raspodelom dužine tetive i ugla vitoperenja po razmahu lopatice. Koreni deo lopatice malo doprinosi aerodinamičkoj efikasnosti lopatice, pa se on konstruiše prema tipu veze sa glavčinom rotora. Na slici 6. prikazana je geometrija lopatice. Geometrija lopatice modelovana je u programskom paketu CATIA V5.

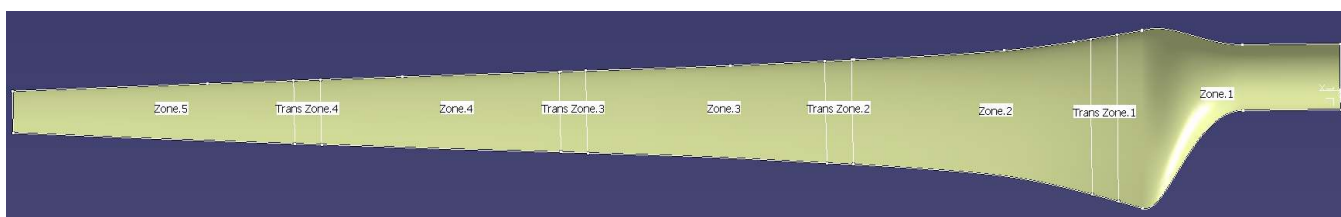


Slika 6.

4. DEFINISANJE SLOJEVA I LAMINATA

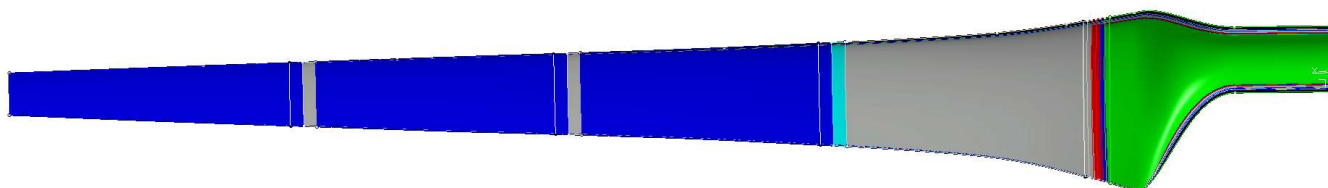
Softverski paket CATIA V5 omogućava korisniku da celokupan proces konstruisanja kompozitnih delova od definisanja geometrije i osobina materijala, preko analize do procesa proizvodnje izvede na samo jednoj platformi. Korisnik može pristupiti konstruisanju na nekoliko načina i to u kontekstu izrade sklopova, kontekstu analize, i u kontekstu proizvodnje.

Preliminarni dizajn kompozitnog dela sastoji se u definisanju geometrije i definisanju osobina materijala. Zavisno od potreba, moguće je definisati vrstu materijala, orijentaciju vlakana i redosled njihovog slaganja na 4 različita načina. U ovom slučaju, budući da se radilo o maloj kompozitnoj lopatici, definisane su zone sa konstantnim osobinama (istim materijalima i orijentacijom vlakana) a na osnovu njih definisani su slojevi odnosno lamine. Na slici 7. prikazana je donjaka lopatice sa zonama i prelaznim zonama. Za svaku zonu definisan je broj slojeva od određenog materijala i određene orijentacije vlakana. Tranzicionim zonama definiše se oblast preko koje se menja broj slojeva u različitim zonama.



Slika 7.

CATIA V5 omogućava automatsko kreiranje lamina na osnovu podataka definisanih po zonama. Lamine se kreiraju na način da se maksimizira njihova površina i dobiju maksimalni mogući slojevi. Ovo je korisno u slučaju da dve susedne zone imaju definisane slojeve istog materijala i orijentacije vlakana. Slike 8. i 9. prikazuju slojeve koji su napravljeni na osnovu definicije zona.



Slika 8.



Slika 9.

Sequence	Ply	Geo-Lvl	Material	Zone.2	Zone.3	Zone.4	Zone.5	Zone.1
Sequence.1	Ply.16	1	S1454_G803	0	0	0	0	0
Sequence.2	Ply.14	3	S1454_G803	90	90	90	90	90
Sequence.3	Ply.15	2	S1454_G803	0	0	0	0	0
Sequence.4	Ply.13	4	S1454_G803	90	90	90	90	90
Sequence.5	Ply.12	1	S1454_G803	0	0	0	0	0
Sequence.6	Ply.11	2	S1454_G803	90	90	90	90	90
Sequence.7	Ply.10	1	S1454_G803	0	0	0	0	0
Sequence.8	Ply.9	2	S1454_G803	90	90	0	0	90
Sequence.9	Ply.8	1	S1454_G803	90	0	0	0	90
Sequence.10	Ply.7	2	S1454_G803	0	0	0	0	0
Sequence.11	Ply.6	1	S1454_G803	0	0	0	0	0
Sequence.12	Ply.5	2	S1454_G803	0	0	0	0	45
Sequence.13	Ply.4	3	S1454_G803	0	0	0	0	45
Sequence.14	Ply.3	4	S1454_G803	0	0	0	0	90
Sequence.15	Ply.2	5	S1454_G803	0	0	0	0	-45
Sequence.16	Ply.1	6	S1454_G803	0	0	0	0	-45

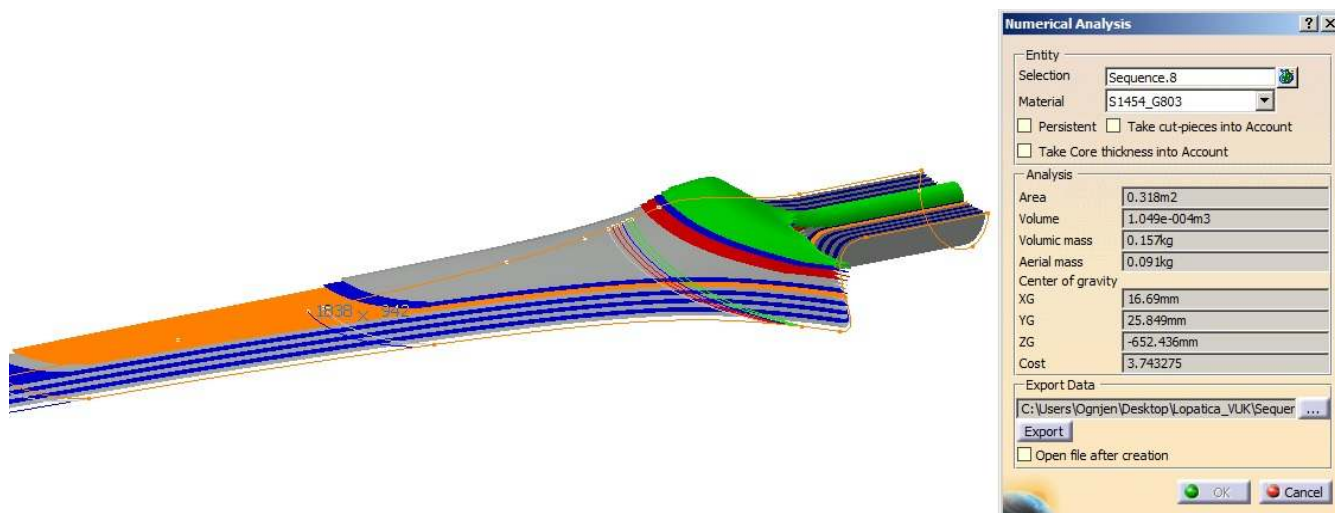
Total Length of Connections (Diagonal Cells represent total length of free edges)						
	Area(m2)	Zone.2(mm)	Zone.3(mm)	Zone.4(mm)	Zone.5(mm)	Zone.1(mm)
Zone.2	0.122243	1009.63	200.536	0	0	323.729
Zone.3	0.0884148	200.536	1001.32	157.576	0	0
Zone.4	0.0708717	0	157.576	1000.88	124.802	0
Zone.5	0.0600635	0	0	124.802	1240.8	0
Zone.1	0.107081	323.729	0	0	0	1144.23

Zones Groups						
Zones Group.1	Zone.2	Zone.3	Zone.4	Zone.5	Zone.1	

Slika 10.

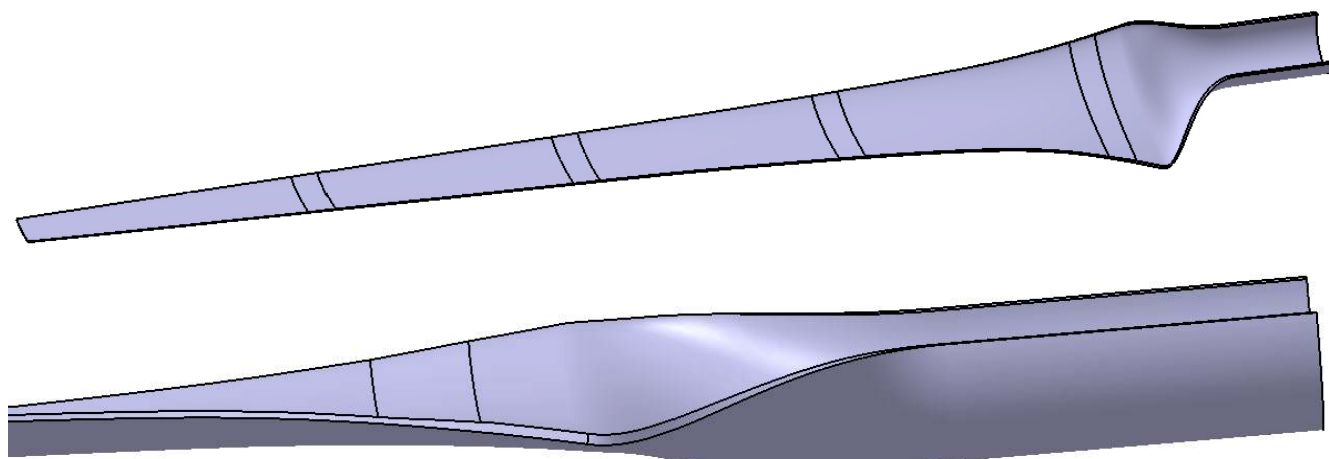
Nakon kreiranja lamina moguće je menjati njihov redosled, materijal i orijentaciju vlakana jednostavno pomoću EXCEL tabele za slaganje slojeva koja se kreira zajedno sa slojevima. Svaka izmena u tabeli lako se registruje na modelu ažuriranjem modela u CATIA okruženju. Na slici 10. prikazana je tabela u ovom slučaju. Konstruktor može dodavati nove slojeve uključujući i vezivne slojeve, trake za lepljenje i materijal jezgra ukoliko se izrađuje "sendvič" konstrukcija. Takođe na ovaj način se dobijaju i podaci o svakoj zoni, njena površina, ukupna dužina granice i dužina granice prema drugim zonama. Omogućeno je i kreiranje tabele u kojoj je moguće kontrolisati način na koji se završavaju pojedinačni slojevi na njihovim različitim ivicama unutar kompozitnog dela. Pomću tabela veoma efikasno se mogu uneti željene izmene u narednim fazama projektovanja ukoliko dođe do izmena na delu.

Pomoću opcija za analizu lamina moguće je dobiti podatke o masi i težištu svake lamine, laminata ili celokupnog kompozitnog dela (slika 11.)



Slika 11.

Na osnovu definisanih zona moguće je napraviti 3D "solid" model kompozitnog dela. Debljina modela odgovara zbiru debljina svih lamina koje su korišćene za konstruisanje kompozitnog dela. Trodimenzionalni model moguće je kasnije koristiti za potrebe definisanja geometrije drugih delova u sklopu, kao i za definisanje konačnoelementnog modela za analizu, gde je potrebno poznavati oblik i položaj stvarne donje i gornje površine laminarnog dela. Na slici 12. prikazan je "solid" model donjake kompozitne lopatice.



Slika 12.

Ovako definisan preliminarni model donjake lopatice potom služi kao osnova za vršenje analiza mogućnosti proizvodnje, strukturalne i frekventne analize.

5.ZAKLJUČAK

Zbog povoljnog odnosa mase i čvrstoće kompozitni materijali nalaze sve veću primenu u granama industrije gde je masa elemenata od najvećeg značaja. Sa druge strane pri projektovanju kompozitnih delova inženjeri moraju osim samog dela istovremeno konstruisati i materijal, pri čemu se susreću sa velikim brojem podataka i promenljivih (različiti slojevi, materijali, smer vlakana, redosled slaganja...) koje treba obraditi kako bi se dobio deo zadovoljavajućih osobina, što iziskuje mnogo više truda nego projektovanje delova od lima. Proces proizvodnje kompozitnih delova zahteva veliko angažovanje manuelne radne snage i vremenskih resursa, pri čemu se javlja velika mogućnost za pojavu grešaka u proizvodnji. Da bi se dobili konkurentni kompozitni delovi, upotreba računara je prisutna u svakoj fazi projektovanja.

U ovom radu prikazana je preliminarna konstrukcija donjake kompozitne lopatice vetroturbine. Zahvaljujući posebnom modulu za kompozitne konstrukcije "Composites design" i ostalim modulima za definisanje geometrije i strukturalnu analizu celokupan proces konstruisanja moguće je izvesti u samo jednom radnom okruženju, što značajno olakšava proces projektovanja i kolaboraciju između inženjera koji rade na projektu.

LITERATURA

1. CATIA V5 Documentation
2. Gay D, *Composite Materials Design and Applications*, CRC Press, 2003
3. Hull D, *An introduction to composite materials*, Cambridge University Press, 1981.
4. Posteljnik Z, Trivković S, Petrašinović N, Stanojević M, *Projektovanje lopatice napredne vetroturbine primenom savremenih CAD softvera*, 37. JUPITER KONFERENCIJA, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Beograd 2011.
5. Hau E, *Wind Turbines*, Springer, 2006.

Abstract

DESIGN OF WIND TURBINE COMPOSITE COMPONENTS USING ENGINEERING SOFTWARE

Due to its multiple advantages over metals, the use of composite materials in the manufacture of wind turbine blades is prevalent. Great complexity of design, analysis and manufacturing of composite parts has resulted in the emergence of numerous software tools that address different stages of design and manufacturing of composite parts. Using a special module for composite structures within the CATIA V5 software package it is possible to effectively construct a composite parts. This paper presents the process of preliminary design of composite wind turbine blades using CATIA V5, and points out to the possibilities of further use of CATIA in detail design phases of the wind turbine blade project.