

SAVREMENI KOMPOZITNI MATERIJALI U PROJEKTOVANJU I PROIZVODNJI VAZDUHOPLOVNIH KONSTRUKCIJA

Mr Zoran Vasić, dipl. inž.
Vojnotehnički Institut, Beograd

Prof. dr Zlatko Petrović, dipl. inž.
Mašinski fakultet, Beograd

Kompozitni materijali se već dugi niz godina koriste u vazduhoplovstvu. Nesporne su prednosti kompozitnih struktura u odnosu na metalne vazduhoplovne strukture, kao što su: bolji odnos čvrstoće i mase, smanjeno vreme za održavanje tokom eksploatacije, produženi životni vek vazduhoplova, smanjen ukupan broj strukturalnih delova i manjih podsklopova, manji broj veznih elemenata, veća otpornost na koroziju i oštećenja usled zamora materijala, itd. U radu je prikazan kratak pregled korišćenja kompozitnih materijala u vojnom i u civilnom vazduhoplovstvu. Dat je pregled savremenih dostignuća u oblasti projektovanja, proizvodnje i obrade kompozitnih materijala. Prikazana su nova dostignuća u automatizaciji slaganja slojeva laminata, i to mašine sa više glava za polaganje slojeva laminata, označavanje i kontrolu rada. Objasnen je postupak Resin Transfer Molding – RTM koji ima za cilj da eliminiše korišćenje preprega u proizvodnji i velikih rashladnih komora za hlađenje preprega. Istaknuta su nastojanja da se skupi autoklavi zamene jeftinijim pećima za polimerizaciju matrice-smole. Prikazana su nova dostignuća u obradi ugljeničnih kompozita, klasičnim bušenjem i orbitalnim bušenjem.

Ključne reči - vazduhoplovi, kompozitni materijali, projektovanje, proizvodnja, obrada

UVOD

Tehnologija gradnje vazduhoplovnih struktura je u proteklih sto godina svog razvoja zatvorila krug kada je u pitanju oblik upotrebljenog materijala za izradu zmaja vazduhoplova. Pioniri vazduhoplovstva, su početkom dvadesetog veka svoje prve strukture aviona izrađivali od platna i lepka, uz malo ojačanja od metala. Usledio je zatim period od više decenija korišćenja lakih metalnih legura za izradu zmaja vazduhoplova, a poslednjih godina ponovo su aktuelne laminatne (kompozitne) strukture koje u osnovi imaju više slojeva platna u polimerizovanoj matrici (smoli).

Godinama projektanti strukture vazduhoplova imaju za cilj da kompletnu strukturu glavnih sklopova vazduhoplova, npr. krila ili trupa projektuju i izrade isključivo od savremenih kompozitnih materijala. Naravno, svaka ovakva ideja ima svoje pobornike ali i oponente. Pristalice kompozitnih struktura ističu da se izborom kompozitnih materijala povećava prostor u kabini trupa uz istovremeno povećanje performansi i smanjivanje otpora. Korist se može ogledati u odnosu čvrstoće i

mase, smanjenom vremenu za održavanje tokom eksploatacije, produženom životnom veku vazduhoplova, smanjenom ukupnom broju strukturalnih delova i manjih podsklopova i manjem broju veznih elemenata (manji je broj rupa na delovima pa je i vreme koje je neophodno za bušenje rupa uštedeno).



Slika 1.- Izgled unutrašnjosti kompozitnog trupa mlaznog aviona tokom izrade u firmi Grob, Švajcarska /10/

Posebna prednost ogleda se u činjenici da kompozitne strukture napravljene od savremenih kompozitnih materijala imaju veću otpornost na koroziju i oštećenja usled zamora materijala, u poređenju sa metalnim konstrukcijama.

KOMPOZITNI MATERIJALI U VOJNOM I CIVILNOM VAZDUHOPLOVSTVU

U svetu se sve više vazduhoplovnih programa bazira na korišćenju kompozitnih materijala. Kompozitni materijali osvajaju vojne i civilne avione i helikoptere. Posebna primena je za bespilotne letelice kod kojih su kompoziti već godinama glavni konstruktivni materijal zmaja letelica.

Vojni vazduhoplovi koriste kompozitne materijale već nekoliko desetina godina, ali je ukupna količina kompozitnih materijala koja je ugrađena u vojne vazduhoplove relativno mala, s obzirom na ograničen broj proizvedenih vojnih vazduhoplova. Počevši od ranih devedesetih godina prošlog veka pa do danas primetan je trend u smanjenju procentualnog učešća kompozita u strukturi vojnih borbenih vazduhoplova, /9/. Danas, kada je u pitanju projektovanje vojnih vazduhoplova, prevladava filozofija da se kompoziti koriste u onoj meri koja omogućava da se ostvari sklad između pristupačnosti (cene) i performansi koje kompoziti ostvaruju. Na primer, najskorije razvijeni i proizvedeni američki borbeni avioni: F/A-18E/F, F-22 i F-35 imaju smanjenu ukupnu količinu kompozita nego što bi se za takve avione moglo očekivati pre desetak godina. Kod ovih aviona sve spoljne površine trupa, krila i repova su izrađene ili prekrivene kompozitnim oplatama iz razloga smanjenja mase, veće otpornosti na koroziju i zamor materijala. Međutim, unutrašnja struktura borbenih aviona je izrađena od lakih metalnih legura. Četiri faktora utiču da se kompoziti u sadašnjem procentu ugrađuju u borbene avione, /9/:

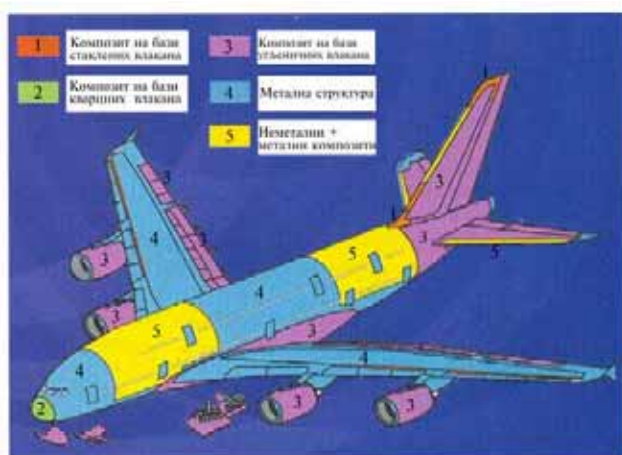
- Promena u filozofiji projektovanja aviona od performansi, kao ranije najbitnijem faktoru koji treba ispuniti, ka filozofiji da su bitniji faktori pristupačnost (cena) i performanse, zajedno.
- Borbeni avioni nisu tako projektovani da u potpunosti iskoriste sve pozitivne osobine kompozitnih materijala, jer se avioni još uvek projektuju kao da su potpuno metalni. Drugim rečima današnji vodeći projektanti još uvek avion doživljavaju kao metalni proizvod. Današnji projektanti projektuju avion onako kako bi avion od lakih metalnih

legura trebalo da bude projektovan, ali uz korišćenje kompozita. Čak i kad projektanti načine pomak u primeni kompozita umesto metala za neke sklopove, ipak pribegavaju korišćenju "utabanih" staza kada se analiziraju važniji (metalni) spojevi i strukturni elementi.

- Potreban je dugogodišnji razvoj i mnogo uloženi sredstva za dobijanje željenog kompozitnog materijala sa odgovarajućim karakteristikama za odabranu svrhu.
- Kompozitni materijali su kasnije počeli da se razvijaju od legura lakih metala, pa je njihova primena na borbenim avionima u početku bila sporedna. Kasnije se, tokom razvoja, njihova primena veoma proširila, dok se danas njihova primena bitno smanjila.

Dalja primena kompozitnih materijala na borbenim avionima u novim uslovima zavisice od: a) osvajanja i usvajanja novih tehnologija proizvodnje kompozita i njihove primene na novim konstrukcijama i b) smanjenja vremena izrade velikih kompozitnih sklopova i cene korišćenja novih materijala primenom novih metoda proizvodnje kompozitnih sklopova.

U civilnom vazduhoplovstvu se poslednjih godina planira ekstenzivnija upotreba kompozitnih materijala. Time se otvara jedno novo poglavlje u primeni kompozitnih materijala kada će se mnogo veći delovi i sklopovi (ceo trup, krilo) izrađivati od kompozita i to u mnogo većoj seriji nego što je bio slučaj kod proizvodnje vojnih aviona. (Kao primer, proizvodnja i organizacija proizvodnje delova i sklopova američkog aviona bombardera V2 koji je izrađen u količini do 20 aviona je sasvim različito od proizvodnje aviona F-35 JSF čija je proizvodnja projektovana za 20 jedinica mesečno.) Takođe, treba imati u vidu da su putnički civilni avioni po svojim gabaritima mnogo veći od vojnih borbenih aviona, te će proizvodnja i potrošnja savremenih kompozitnih materijala u perspektivi biti mnogo veća nego danas. Sa povećanjem obima proizvodnje tehnolozi u proizvodnim pogonima vazduhoplovnih delova se suočavaju sa problemom organizacije proizvodnje kompozitnih delova masovnim slaganjem kompozitnih platna ili preprega umesto korišćenjem davno usvojenih postupaka proizvodnje delova od aluminijumskih legura, /3/.



Slika 2. Udeo različitih materijala u izradi konstrukcije aviona A380 /11/

Danas vodeći svetski proizvođači vazduhoplova Boeing (*Boeing*) i Erbas (*Airbus*) za izradu zmaja svojih novih aviona predviđaju kompozitne laminatne strukture ugljeničnog ili nekog drugog sastava u polimerizovanoj smoli. Boeing je za novi putnički avion B-787 predvideo da se skoro 100% oplata trupa izrađuje od ugljeničnih kompozita (ugljenični prepreg i epoksi smola) a ukupno 50% na celom avionu biće zastupljeni kompozitni materijali /10/. Kod novog vojnog transportnog aviona Erbas A400M predviđeno je da se glavni i sekundarni delovi krila izrađuju takođe od ugljeničnih kompozita. Za novi putnički avion Erbas A350XWB, takođe, predviđeno je da 53% strukture bude izrađeno od kompozitnih materijala.

PROJEKTOVANJE I INTEGRACIJA SA PROIZVODNJOM

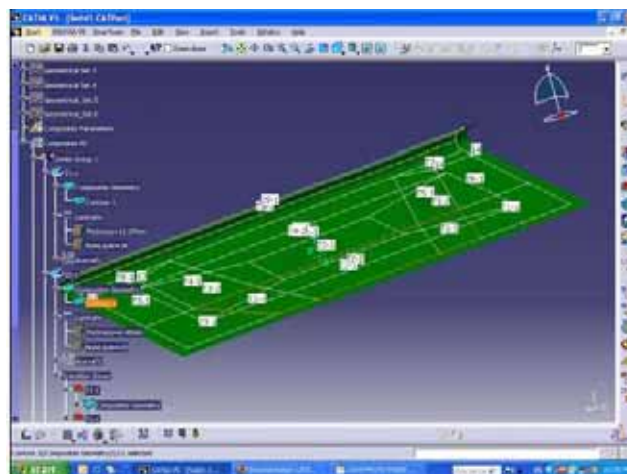
Projektovanje kompozitnih delova i sklopova danas je mnogo olakšano razvojem savremenih CAD softvera koji imaju posebne module za kreiranje svakog pojedinog sloja kompozitnog dela, uključujući i sendvič konstrukcije. Projektant može da koristi određene materijale iz ranije formiranih kataloga materijala sa svim njihovim mehaničkim i fizičkim karakteristikama. Slojeve izabranog materijala projektant vezuje za ranije oblikovane trodimenzionalne entitete (solid ili površinski model), /13/. Trenutno je na tržištu najkompletniji softver za projektovanje složenih kompozitnih delova softver CATIA firme *Dassault Systemes*.

Poboljšanja u proizvodnji kompozitnih sklopova su ostvarena zahvaljujući tehnološkim inovacijama koje su omogućile da se originalan i isti CAD softver koji se koristi tokom procesa projektovanja koristi za definisanje parametara

u proizvodnji. Korišćenjem originalnih datoteka koje je prethodno koristio projektant tokom projektovanja nekog sklopa za kreiranje proizvodnih parametara mašina u fabrici eliminiše višestruko pretvaranje projektnih parametara datih u jednom obliku u druge oblike koje je ranije zahtevao proizvodni postupak fabrike (npr. ručno slaganje slojeva laminata ili maloserijsko automatizovano mašinsko slaganje). Neki od vodećih svetskih proizvođača sofisticiranih mašina za slaganje slojeva laminata su se oslonile na CAD/CAM softver za projektovanje i izradu CATIA. Istovremeno su za operativne sisteme svojih novih mašina umesto *Unix-a* izabrale rasprostranjeniji *Microsoft Windows*.

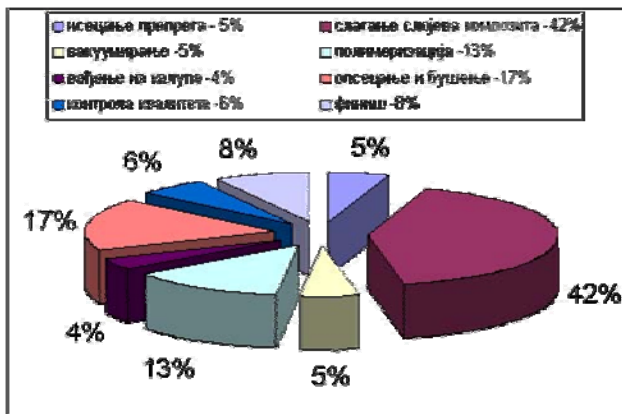
PROIZVODNJA

Uslov za proizvodnju vazduhoplovnih struktura od kompozita je da uloženi rad, vreme i novac ne budu veći od postojećih. Ovo znači da je za izradu kompozitnih struktura neophodno povećati obim proizvodnje ovakvih sklopova bez dogradnje novih proizvodnih prostora, jer se proširenje fabričkih postrojenja ni po ceni, ni po vremenskom ciklusu izrade ne može opravdati savremenim zahtevima tržišta. Kao primer može se videti kako izgleda proces proizvodnje kompozitnih delova razložen na niz aktivnosti gde se zapaža da najviše vremena se troši na proces slaganja slojeva kompozita i to 42%, /4/. Takođe, prema sadašnjem tehnološkom nivou proizvođača kompozitnih sklopova, nemoguće je proizvoditi veći obim kompozitnih vazduhoplovnih sklopova bez negativnog uticaja na kvalitet. Kao jedini mogući izlaz iz ovakve situacije vidi se u povećanoj automatizaciji izrade.



Slika 3. Savremeni CAD softver za projektovanje kompozitnih struktura /13/

Automatizacija kao izlaz se vidi ne samo u proizvodnom procesu, nego i pre, tokom procesa projektovanja, gde se papirna konstruktivna dokumentacija koju danas poznajemo mora zameniti elektronskom. Izvesna dostignuća u oblasti upravljanja podacima proizvoda (Product Data Management – PDM) i upravljanja životnim ciklusom proizvoda (Product Lifecycle Management – PLM) su ostvarena, a novoformirani softveri iz ovih oblasti već se koriste na mnogim vazduhoplovnim projektima.



Slika 4. Proces proizvodnje kompozitnih delova razložen na niz aktivnosti [4]

Savremenim zahtevima za izradu velikog broja vazduhoplovnih kompozitnih sklopova ne mogu da odgovore proizvođači koji za izradu kompozitnih sklopova koriste slabo automatizovan i, naročito, ručni postupak slaganja slojeva kompozitnih platna ili preprega. Obim proizvodnje za velike proizvođače aviona kao što su Boeing i Erbas (sa mesečnom proizvodnjom oko 40 primeraka aviona B-737 ili A320) zahteva da proizvođači kompozitnih sklopova postignu brzinu slaganja slojeva kompozita od oko 50kg na sat. Imajući u vidu da su debljine pojedinih slojeva kompozita koje se koriste za izradu vazduhoplovnih struktura najčešće od 0,1 do oko 0,3mm, lako je zaključiti koje su količine platna ili preprega neophodne nekom proizvođaču da obezbedi kako bi osigurao dnevnu proizvodnju.

U napore za obezbeđenje uslova za povećanu proizvodnju uključili su se i proizvođači automatizovanih mašina za polaganje platna ili preprega. Tako su svetski poznate firme za izradu visokokvalitetnih mašina za mašinsku obradu lakih legura ili čelika, npr. *Cincinnati Machines* ili *Forest Line*, osvojile izradu mašina sa više glava za polaganje slojeva kompozita koje su veoma brze i ne zauzimaju više prostora od identičnih sporih mašina sa jednom glavom za slaganje slojeva. U tome ih prate i

druge firme (npr. *Siemens*) koje izrađuju softvere za sisteme koje računarski upravljaju mašinama za slaganje slojeva. Softveri koriste trodimenzionalne CAD solid modele kao polaznu osnovu i transformišu ih u program koji upravlja mašinom za slaganje laminata. Tako se softverom omogućava da se projektovani deo uz pomoć CAD sistema pogodnim putem pretvori u niz operacija slaganja slojeva, koje na kraju procesa izrade kao rezultat daju stvarni kompozitni deo, [3].

Jedna od najnovijih razvojnih mogućnosti je prelaz na sedmo-osne mašine sa više glava za polaganje slojeva kompozita. Dodatne ose za upravljanje računarski su potrebne da ostvare odgovarajući pritisak valjka na položeni laminat i kalup. Ovim se povećava obim i tačnost izrade. Prema kompleksnosti kompozitnog dela koji treba izraditi mašina sa više glava koristi uže ili šire trake platna ili preprega, koje mogu biti širine oko 6mm za veoma komplikovane delove. Sa druge strane, za veće delove koji nemaju kompleksne oblike mašine mogu da polažu šire trake u svakom prolazu. Pri ovakvom slaganju slojeva mašine sa više glava pokazuju punu svoju efikasnost jer one omogućavaju da se veća količina kompozita položi na kalup.

Primer uspešne saradnje između firmi *Forest-Line* i *Coriolis* rezultirao je u izradi mašine za automatsko polaganje ugljeničnih preprega u trakama širine 6,35mm ekstremne preciznosti. Ovakva mašina je u stanju da na veoma kompleksnim površinama polaže do 8kg preprega na sat (slika 5.).

Dodatna funkcija koja se na nove mašine sa više glava za slaganje laminata dodaje je nož za sečenje traka. Ovim se omogućuje kompaktnost sistema koji slaže slojeva laminata i seče ih na potrebnu dužinu. Neke od mašina imaju mogućnost označavanja pojedinih slojeva (ink-jet štampačima) u vidu linija bar-koda ili posebnim simbolima,



Slika 5. Automatizacija procesa slaganja kompozita povećava efikasnost u proizvodnji

čime se eliminiše naknadno tehnološko vreme, čime se znatno štedi na vremenu, a greške se eliminišu.

Trenutno u svetu postoji samo 100 sofisticiranih numeričkih računarski upravljivih mašina koje slaganjem laminata proizvode jednostavnije ili kompleksnije kompozitne delove. Pogodnim aplikativnim softverima poboljšana je i pojednostavljena upotreba ovih mašina, tako da se i složeniji kompozitni delovi sa kompleksnim konturama i promenljivom debljinom mogu izrađivati već posle nekoliko dana obuke, a da škart bude u prihvatljivih 2%. Trenutno se specijalizovanim mašinama sa više glava za polaganje laminata u kalupe proizvođača *MAG Cincinnati* proizvode kompozitni delovi i sklopovi za trup aviona Boeing B-787 i Erbas A380 i drugih manjih. Proizvođač *Hawker Beechcraft* trup svog poslovnog mlaznog aviona *Premier1* takođe proizvodi mašinama istog proizvođača što je omogućilo da je masa kompozitnog trupa za 20% manja nego da je proizvedena od legura aluminijuma. Takođe je značajno smanjen ukupan broj strukturalnih delova i manjih podsklopova sa 3000 delova (u varijanti izrade od metala) na samo dva dela (u varijanti izrade od kompozita).

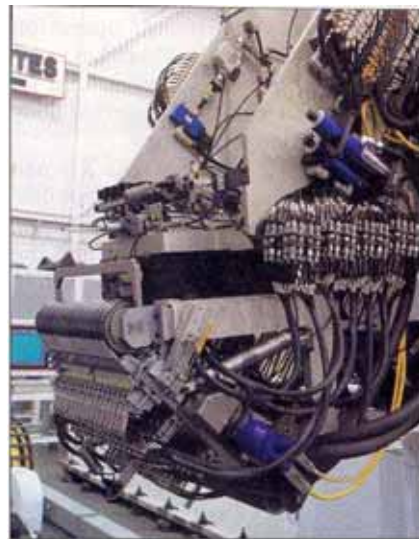


Slika 6. Izgled mašine Forest Line sa ugrađenim CNC softverom /2/

Kvalitativna kontrola već složenih laminata u alatima je takođe promenjena, modernizovana i automatizovana. Tradicionalni pristup kontroli u malo-serijskoj proizvodnji se sastoji u korišćenju šablona koji se ručno postavljaju na laminat čime se proveravaju potrebne mere. Na novim mašinama ugrađeni su laseri koji kontrolišu tačnost spoljnih ivica laminata.

SAVREMENI PRISTUP PROIZVODNJI VAZDUHOPLOVNIH KOMPOZITNIH KONSTRUKCIJA

Proizvođači koji u velikoserijskoj proizvodnji izrađuju kompozitne sklopove velikih gabarita korišćenjem preprega (pre-impregnated dry fabric with resin - prethodno impregnirana platna smolom) i naknadnim tretiranjem u velikim autoklavima suočeni su sa problemom čuvanja velikih količina preprega u hladnim komorama - hladnjacima i njihovim ograničenim vremenom skladištenja. Kada se standardnim postupkom slaganja velikog broja slojeva preprega formira konstrukcija, npr. krila, faktor vreme postaje ključan zato što se tada nekoliko tona prepreg materijala (debljine i do desetog dela milimetra) mora nabaviti, uskladištiti u hladnim komorama i pripremiti u kratkom roku, a zatim složiti na kalup krila prema dokumentaciji i da se pri tom ne prekorači vreme za koje se materijal preprega može upotrebiti, /10/.



Slika 7. Izgled mašine sa više glava za polaganje kompozita MAG Cincinnati Viper /4/

Korišćenjem slojeva unidirekcionog platna ili tkanja bez smole materijal se prvo složiti u kalup a zatim se ubrizgava predviđena smola. Tek nakon ubrizgavanja smole počinje proces polimerizacije, što znatno produžuje vreme za koje se materijal može upotrebiti. Takođe, i proces slaganja slojeva laminata (bez smole) u alat nije više ograničen kratkim vremenom upotrebljivosti preprega. Ovaj način slaganja slojeva platna sa naknadnim kontrolisanim ubrizgavanjem smole u kalup je u literaturi poznat pod nazivom **Resin Transfer Molding – RTM**. Ovaj postupak ne zahteva od proizvođača da poseduje velike hladne komore

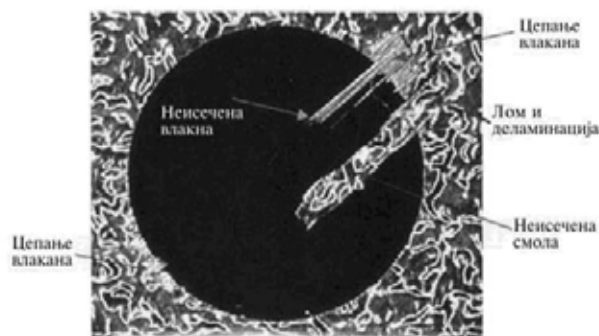
za smeštaj preprega, kao ni autoklave za polimerizaciju smole. Ovim postupkom se proizvode sklopovi zadovoljavajućeg kvaliteta i dimenzija u velikoserijskoj proizvodnji, što je i cilj velikih svetskih proizvođača. RTM postupak proizvodnje kompozitnih sklopova omogućava formiranje sklopova sa manjim brojem delova, smanjenje vremena izrade, materijala i ukupne cene, a pogodnim dizajnom omogućava da se eliminišu mnogi od do sada uobičajenih radnih postupaka.

Dalje usavršavanje RTM postupka proizvodnje kompozitnih sklopova je proizvodnja što većih integralnih kompozitnih struktura uz potpunu kontrolu tolerancija tako da, kada se proizvedeni veliki kompozitni sklopovi spoje u veće sklopove, nije potrebno naknadno doradivati sklopove ili ugrađivati dodatne međuelemente koji bi poništili zazore zbog nedovoljno tačne izrade (šimovanje).

Unapređenja proizvodnje kompozitnih sklopova se odnose i na kvalitet i materijal kalupa-alata za slaganje slojeva kompozita. Glomazni i teški metalni kalupi zamenjeni su kompozitnim kalupima. Kontrolisanim upravljanjem temperaturne ekspanzije kalupa može da se u potpunosti utiče na završne dimenzije kompozitnog sklopa (debljina sklopa i poklapanje sa zadatom teorijskom konturom). Koeficijent termičke ekspanzije kompozita od koga su napravljeni kalupi je (približno) isti kao i samog laminata koji se nalazi u kalupu, dok je značajno različit kod kalupa napravljenih od metala (čelika ili aluminijuma). Masa kompozitnih kalupa je značajno manja od metalnih kalupa, što može da bude od velikog značaja kada se izrađuju veći kompozitni sklopovi.

Još jedno polje gde je moguće uticati na efikasnost i brzinu izrade kompozitnih struktura je razvoj takvih materijala i procesa koji će obezbediti izradu bez korišćenja autoklava /9/. Autoklavi su po svojoj prirodi masivni i skupi. Trenutno se u vodećim razvojnim centrima u svetu radi na takvom procesu izrade kompozitnih struktura koji će obezbediti izradu bez korišćenja autoklava. Postupak se sastoji u tome da već složeni slojevi preprega ili platna sa matricom (smolom) se prekrivaju vakuumskim prekrivkama i zagrevaju u običnim pećima sa kontrolisanom temperaturom. Takve peći su značajno jeftinije za nabavku i održavanje od skupih autoklava. Dok je kod autoklava neophodno ostvariti pritisak od oko 5÷8 bara, kod običnih peći je dovoljno da se postigne pritisak od 1 bara. Dalje, u procesu proizvodnje

autoklavi su usko grlo u veliko-serijskoj proizvodnji, jer svi kompozitni sklopovi moraju da prođu kroz njih. S obzirom da su obične peći jeftinije, moguće je, nabavkom više jedinica, ostvariti paralelnu proizvodnju, bez stvaranja uskih grla u lancu proizvodnje. Imajući sve ovo u vidu, proizvođači su počeli da proizvode takve preprega i platna za koje nije potrebno tretiranje u autoklavu. Npr., firma *Hexcel Composites* je uvrstila u svoj proizvodni asortiman tzv. sistem preprega HexPly M56 namenjen za izradu sekundarnih vazduhoplovnih struktura uz polimerizaciju u običnim pećima. Prepreg HexPly M56 je dostupan sa ugljeničnim ili staklenim tkanjem ili ugljeničnim unidirekcionim platnima, metalnim mat ojačanjem (nitima) i pogodan je za manuelno slaganje ili automatizovano mašinsko slaganje. Temperatura polimerizacije je 180 °C. Sličan sistem preprega proizvodi firma *Cytec* pod nazivom *Cycom 5320*, a firma *ACG* proizvodi sistem *MTM*⁴⁴ za istu namenu.



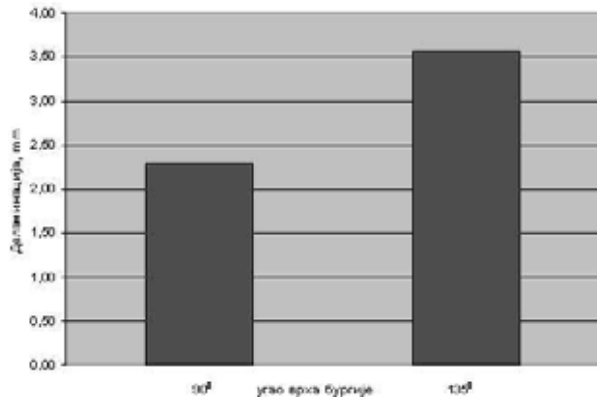
Slika 8. Izgled rupe u kompozitnoj strukturi sa primerima mogućih nepravilnosti /6/

DALJI RAZVOJ KOMPOZITNIH STRUKTURA I EKSPLOATACIJA

Razvoj kompozitnih vazduhoplovnih struktura ide u smeru sofisticiranih struktura koje će u sebi imati ugrađene senzore koji signaliziraju promene koje se dešavaju unutar same kompozitne strukture. Uočeno je da pojedine pojave koje se dešavaju tokom eksploatacije unutar kompozitnih struktura nemaju svoju manifestaciju na spoljašnjoj površini strukture. To se prvenstveno odnosi na pojavu delaminacije između unutrašnjih slojeva laminata.

Drugo polje razvoja i unapređenja kompozitnih struktura odnosi se na mehaničko spajanje kompozitnih struktura sa metalnim. Sam proces bušenja rupa u kompozitnim strukturama ih oslabljuje a sama rupa postaje mesto za pojavu inicijalnih prskotina. Sa druge strane, spoj različitih materijala na mestu spoja može

vremenom da izazove pojavu korozije na metalnim strukturama. Trenutna istraživanja u svetu idu u smeru da se polimerizacijom formiraju veliki kompozitni sklopovi zajedno za metalnim delovima (okovima i sl.), a bez mehaničkih veznih elemenata.



Slika 9. Manji ugao vrha burgije pravi manju delaminaciju i kvalitetnije rupe na izlazu /11/

Ova nastojanja su već primenjena na lako opterećenim sekundarnim vazduhoplovnim strukturama, a samo je pitanje vremena kada će biti primenjena i na primarnim strukturama.

OBRADA KOMPOZITNIH STRUKTURA

Najviše i najčešće korišćeni kompozitni materijali u vazduhoplovstvu poslednjih godina su na bazi ugljeničnih vlakana i epoksi smole. Iako poseduju veoma dobre mehaničke osobine i veliku zateznu čvrstoću ovi polimeri imaju takvu strukturu koja ih čini teškim za tačnu, kvalitetnu i preciznu mašinsku obradu, /11/. Dok je mašinska obrada metala kao što su čelik ili legure aluminijuma (zahvaljujući dobrim reznim osobinama i ravnomernom formiranju strugotine) dostigla nivo koji ostvaruje željene tolerancije, mašinska obrada kompozita je mnogo kompleksniji problem. Kompozitni materijali na bazi ugljeničnih vlakana i epoksi smole deluju kao abraziv koji skraćuje vek reznog alata, /6/. Mehaničkom obradom ovi kompozitni materijali često stvaraju ugljeničnu prašinu, a ne strugotinu kao metali, koja slabo odvodi toplotu što sa svoje strane omogućava da se matrica neželjeno topi zbog pregrevanja.

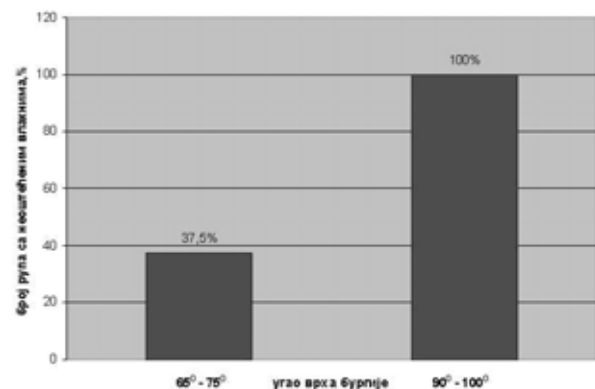
Tokom mašinske obrade kompozita dolazi do loma i krzanja vlakana i matrice (smole) usled dejstva sila pritiska i savijanja nastalih prodorom reznog alata u materijal. Usled bržeg habanja reznog alata pri obradi kompozitnih materijala dolazi do većeg cepanja vlakana na površinskim slojevima kompozitnog dela (površinski lom vlakana), do povećanog broja

neizrezanih vlakana i matrice (savijanje bez loma) i delaminacije (razdvajanja slojeva) na površini ili unutrašnjim zidovima rupa.

Bušenje rupa za vezne elemente

Najveći problem koji se javlja tokom bušenja rupa je delaminacija. Najčešće se javlja u trenutku kada rezni alat ili burgija izlazi iz materijala koji buši kada aksijalne sile vrše pritisak na izlazne slojeve laminata kompozita. Ova pojava se javlja i na samom početku procesa bušenja kada spoljni deo reznog alata usled velike obodne brzine započinje proces sečenja vlakana. Istraživanja, /11/, su pokazala da na kvalitet mašinske obrade kompozitnih materijala i vek reznog alata najviše utiču sledeći parametri:

- Geometrija reznog alata
- Parametri rezanja/bušenja
- Materijal reznog alata
- Površinska obrada ili zaštita reznog alata.



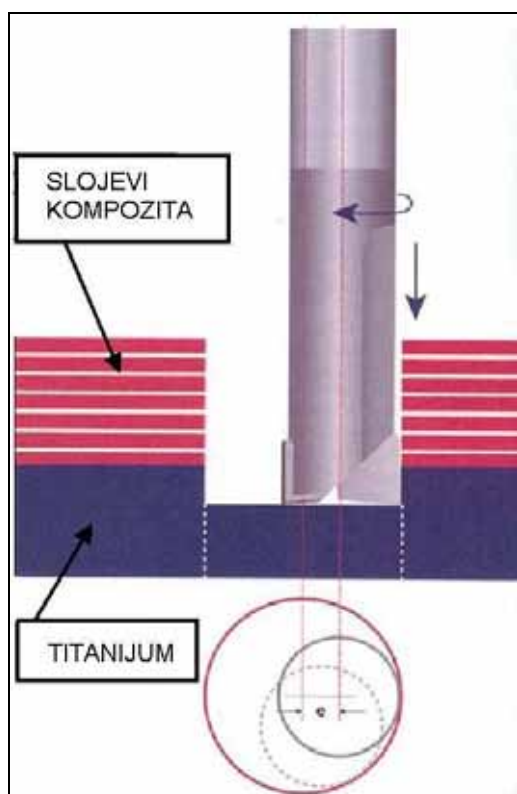
Slika 10. Veći ugao vrha burgije rezultuje u boljim površinama rupa, bez neisečenih vlakana /11/

Izbor ugla na vrhu burgije zavisi od toga koji problem u bušenju kompozita treba da se kontroliše. Manji ugao na vrhu ($<90^\circ$) uzrokuje bolji izlaz burgije iz kompozita i bolji kvalitet rupe na izlazu, dok veći ugao ($>90^\circ$) uzrokuje bolji kvalitet ivica rupe (sa manje delaminacije i loma vlakana).

Brzina habanja reznog alata ili burgije zavisi najviše od materijala od kog je izrađen alat i od površinske obrade ili zaštite. Dijamantom ojačani sloj burgije pokazao je povećanje životnog veka alata deset puta u odnosu na nezaštićen ugljenični čelik.

Drugi način rešavanja problema bušenja ugljeničnih kompozitnih struktura umesto klasičnog bušenja je tzv. orbitalno bušenje, /9/. Ovaj

način mašinske obrade podrazumeva manji prečnik reznog alata od prečnika rupe koja treba da se izbuši, a površina rupe koja se obrađuje je samo povremeno u kontaktu sa reznim alatom. Ovakva obrada formira manje špona, a za bušenje rupa potrebna je manja aksijalna sila nego kod klasičnog bušenja. Stvaranje manje količine špona, u kombinaciji sa manjim prečnikom alata od rupe omogućava efikasno otklanjanje produkata obrade uz pomoć vakuuma. Brzo otklanjanje produkata obrade, sa druge strane, onemogućava štetno zagrevanje alata i kompozita te smanjuje rizik od topljenja matrice (smole). S obzirom da je površina kompozita koja se obrađuje samo povremeno u kontaktu sa alatom omogućeno je njeno bolje hlađenje i bušenje rupa bez rashladne tečnosti. Ovo sa druge strane produžava vek alata, smanjujući ukupnu cenu proizvodnje. U nekim slučajevima, neophodna je minimalna količina sredstva za podmazivanje u cilju smanjenja trenja.



Slika 11. Primer orbitalnog (planetarnog) bušenja kompozitne i metalne strukture [12]

Na slici 11. dat je prikaz različitih alata za bušenje otvora za vezne elemente u kompozitnim strukturama. Primetno je da različiti proizvođači imaju različit pristup rešavanju problema bušenja kompozitnih struktura, pa je stoga i geometrija reznog alata različita, od proizvođača do proizvođača. Za razliku od

obrade metala, kompozitni materijali imaju mnogo više nepoznanica ili parametara koji variraju od konkretnog dela strukture, kao što su materijal samog kompozita (ojačanje i matrica), broj slojeva platna, smer pojedinih slojeva, itd. Stoga proizvođači uglavnom nemaju utvrđene kataloge alata za obradu kompozita, već većinu alata specijano proizvode za svaku konkretnu kompozitnu konstrukciju.

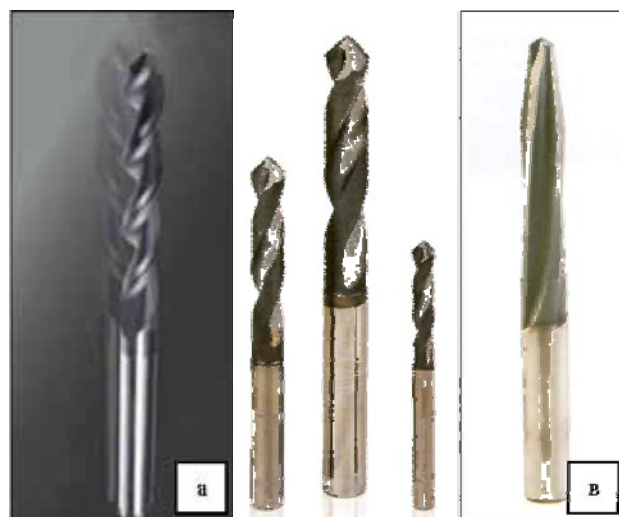
Manja aksijalna sila potrebna prilikom orbitalnog bušenja smanjuje mogućnost pojave delaminacije (raslojavanja slojeva kompozita) i neželjenog savijanja tankih kompozitnih struktura u toku bušenja.

Novi prenosni sistem za orbitalno bušenje (firme *Novator*, [12], slika 13.) razvijen je za potrebe proizvodnje aviona B-787 i sastoji se od sledećih sklopova:

Titanijum

Slojevi kompozita

- Orbitalna jedinica za bušenje
- Fiksator glave za bušenje
- Elektro-pneumatska jedinica za napajanje
- Računar sa softverom za optimizaciju parametara bušenja
- Kontroler kretanja jedinice za bušenje
- Sistem za identifikaciju pozicija rupa.



Slika 12. a) Parabolična burgija firme Onsrud [6]; b) Kennametal-ove burgije proizvede minimum delaminacije na ulazu i na izlazu [11]; c) Amamco burgija sa volframom na vrhu i karakterističnog oblika [2]

Prenosni sistem izvršava softverski optimizovano istovremeno bušenje kompozitnih (ugljeničnih) i metalnih struktura ostvarujući

komplikovane režime brzine bušenja, prilaza i zahvata alata. Ovaj sistem omogućava kvalitetno bušenje sklopova kompozitnih i metalnih struktura bez potrebe da se nakon bušenja strukture razdvajaju i čiste od produkata bušenja, bilo da je reč o česticama kompozitnih i metalnih struktura, ili tečnosti za hlađenje ili podmazivanje.



Slika 13. Izgled prenosnog sistema za orbitalno bušenje; bušenje rupa pri montaži

Opsecanje izrađenih kompozitnih delova

Opsecanje ili tzv. trimovanje izrađenih kompozitnih delova se izvodi nakon završene polimerizacije matrice i neophodno je zbog razloga što se tokom proizvodnje kompozitnih delova slaganje slojeva kompozitnog platna vrši na način da svi slojevi kompozitnog platna budu širi i duži od zahtevanih dimenzija dela koji se proizvodi. Dovođenje na potrebnu konstruktivnu meru se izvodi opsecanjem koje se može izvršiti na više načina.

Standardan način opsecanja podrazumeva mašinsku obradu posebnim alatima. Kao što je ranije rečeno mapinska obrada najčešće uzrokuje cepanje i delaminaciju slojeva kompozita u zoni mašinske obrade. Kompozitni materijali, kao anizotropni materijali, se pri mašinskoj obradi relativno dobro ponašaju kada slojevi kompozitnog platna zaklapaju ugao od 90° u odnosu na rezni alat. Svaki drugi sloj kompozita koji ima različit ugao u odnosu na rezni alat pokazuje znake cepanja ili delaminacije. Poslednja iskustva u obradi kompozitnih delova su pokazala da se umesto rezanjem bolji rezultati pokazuju kontrolisanim lomom slojeva kompozita. Kontrolisani lom se može izvesti korišćenjem postupka sečenja vodenim mlazom (waterjet cutting) kome je dodat abraziv u vidu dodatih mikroskopskih čestica minerala dragog kamena granata, /5/. Skorija iskustva pokazuju da se korišćenjem mlaza prečnika 1mm i pritiskom 4000 bara postiže 75 puta brže sečenje kompozita nego korišćenjem reznog alata prečnika 10mm koji se obrće brzinom od 15000 obrtaja u minuti. Pri tom se ne stvara temperatura koja bi dovela do

topljenja matrice, nema mikroskopskih pukotina na slojevima kompozita ili delaminacije slojeva.

Firma *Flow* je izradila šestoosni obradni centar za obradu kompozitnih delova na bazi vodenog mlaza sa abrazivom koja se danas upotrebljava u firmi Mitsubishi za sečenje velikih kompozitnih delova aviona Boeing 787, kao što su oplata krila, oplata krme pravca, ramenjača krila i repova, oplata trupa i napadne ivice krila, itd. Obradni centar ima radni sto dužine 36m i širine 9m koji ima fleksibilni sistem za prilagođavanje obradne glave sa vodenim mlazom i računarski kontrolisane aktuatore, sve u cilju da se sklop obratka i obradne glave održi stabilnim.



Slika 14. Flow obradni centar sa glavom za sečenje kompozita vodenim mlazom i abrazivom sa radnim stolom dužine 36 metara /5/

ZAKLJUČAK

Nesporna je uloga koju savremeni kompozitni materijali imaju u savremenom vazduhoplovstvu. Njihovom primenom vazduhoplovi su postali bezbedniji, brži, možda skuplji za izradu ali jeftiniji u eksploataciji, itd. Strana iskustva pokazuju da je neophodna automatizacija procesa izrade ako se želi dobiti jeftinija a kvalitetnija kompozitna struktura. Primena kompozitnih materijala na borbenim avionima u budućnosti zavisice od osvajanja i usvajanja novih tehnologija proizvodnje kompozita i njihove primene na novim konstrukcijama, kao i smanjenja vremena izrade velikih kompozitnih sklopova i cene korišćenja novih materijala primenom novih metoda proizvodnje. Istovremeno, sadašnje i nove generacije projekatata nužno će se prilagoditi filozofiji projektovanja kompozitnih vazduhoplovnih struktura.

Daljim razvojem u oblasti automatizacije i robotizacije proizvodnje kompozitnih delova i sklopova neminovno će se primena kompozitnih struktura sa vazduhoplovstva raširiti i na druge grane, kao što su automobilska industrija, brodogradnja i drugo.

LITERATURA

- /1/ Birch S., Aerospace proves its metal, SAE International, Aerospace engineering & Manufacturing, page 40-43, June 2008.
- /2/ Costlow T., Composite designs benefit from blending, SAE International, Aerospace engineering & Manufacturing, page 16-19, June 2009.
- /3/ Costlow T., Light material brings heavy challenges, SAE International, Aerospace engineering & Manufacturing, page 36-39, January/February 2008.
- /4/ Gardner R., Automation in composite manufacturing, SAE International, Aerospace engineering & Manufacturing, page 26-28, June 2009.
- /5/ Michael M., Precision Cutting, Aviation Week & Space Technology, Page 50-51, September 7, 2009.
- /6/ Morey B., The edge on cutting aerospace composites, SAE International, Aerospace engineering & Manufacturing, page 10-15, August 2009.
- /7/ Ott J., Cloth and Glue, Aviation Week & Space Technology, Page 44, January 19, 2009.
- /8/ Perrett B., Keeping Secrets, Aviation Week & Space Technology, Page 39-40, February 9, 2009.
- /9/ Rosenberg B., Composites come clean, SAE International, Aerospace engineering & Manufacturing, page 32-35, October 2008.
- /10/ Rosenberg B., Carbon fiber gets bigger footprint, SAE International, Aerospace engineering & Manufacturing, page 28-31, April 2008.
- /11/ Sampath K., Wang-Yang Ni, Kennametal makes the cut on composites, SAE International, Aerospace engineering & Manufacturing, page 7-9, March 2009.
- /12/ Whinnem E., Lipczynsky G., Eriksson I., Orbital drilling goes mainstream for the Dreamliner, SAE International, Aerospace engineering & Manufacturing, page 7-9, March 2009.
- /13/ Dassault Systemes, CATIA V5.R17, Composite material tutorial.

MODERN COMPOSITE MATERIALS IN DESIGN AND PRODUCTION OF AIRCRAFT STRUCTURES

Composite materials have been used in aircraft industry for many years. There are many undisputable advantages of composite materials in comparison to metallic aircraft structures, such as better strength to weight ratio, less maintenance time during exploitation, extended aircraft service life, less structural part count, less number of fastenings, better corrosion and fatigue performance, etc. The short overview of composite materials usage in military and civilian aircraft industry is presented in this paper. The modern technology attainments in design, production and mechanical processing of composite materials are shown. New achievements in automated laying up processes, such as multy-head machines, layer markings and quality control are presented. The Resin Transfer Molding – RTM method with a gain to eliminate prepregs and huge refrigerators in composite structure production is also shown. Manufacturer endeavours to substitute expensive autoclaves with cheaper thermal ovens for resin polimerisation are highlighted. New breakthroughs in classical and orbital drilling of composite materials are presented.

Keywords: aircrafts, composite materials, design, production, processing

Rad poslat na recenziju: 23.11.2009. godine

Rad spreman za objavu: 08.12.2009. godine