

Dr.sc. NADA ŠTRUMBERGER
Fakultet prometnih znanosti
Faculty of Transport and Traffic Engineering
Zagreb, Vukelićeva 4

Materijali u prometnim sredstvima - Materials in Vehicle design
Pregledni članak - Review
UDK: 629.73:66.017:620.168
Primljeno-Accepted: 26.10.1995.
Prihvaćeno-Approved: 11.12.1995.

KOMPOZITNI MATERIJALI NA ZRAKOPLOVNIM LETJELICAMA

SAŽETAK

Kompozitni materijali imaju važnu ulogu u konstrukciji zrakoplovnih letjelica. Oni se sastoje od armature - punilo i matrice - nosač vezivo. Može se reći da je kompozit spoj matrice kao osnovne komponente s armaturom kao dodatnom komponentom. Dijele se na one s metalnom matricom i one s nemetalnom matricom. Najširu primjenu imaju nemetalni kompoziti - polimerni kompoziti.

Kod polimernih se kompozita kao armatura koristi stakleno vlakno, ugljično vlakno, vlakna bora i organska vlakna.

Za izradbu matrice koriste se sintetične smole, najviše epoksidne smole, pa onda poliesterske.

Kompozitni materijal ugljično vlakno - epoksidna smola jedan je od najvažnijih konstrukcijskih materijala u zrakoplovstvu, jer ima dobra fizička, kemijska i mehanička svojstva.

Uz primjenu 40% kompozitnih materijala u konstrukciji zrakoplova može se smanjiti srednja vrijednost mase zrakoplova 12%. To smanjenje, rekonstrukcijom geometrije zrakoplova, može povećati smanjenje težine na 17%. Smanjenjem mase motora i uz manju količinu goriva može se uštedjeti dodatnih 4%, što znači da se može postići ukupno smanjenje mase zrakoplova za 21%.

Kompozitni materijali ostaju i dalje najperspektivniji materijali u zrakoplovnim i svemirskim letjelicama sutrašnjice i sve će se više primjenjivati.

1. UVOD

Zrakoplovstvo ima važnu ulogu u povezivanju država u svijetu, što zahtijeva sve bolje uvjete letenja i bolje tehničke značajke letjelica. Pritom važnu ulogu imaju kompozitni materijali, kojih je u zrakoplovnoj konstrukciji 35-45%. Težnja je da se njihov udjel povećava. Primjenom kompozitnih materijala postižu se smanjenje mase strukture, povećanje nosećih sposobnosti, bolje dinamičke značajke kao i produženi vijek trajanja konstrukcije.

Početak primjene kompozitnih materijala datira iz 1943. godine, kada je izrađena prva zrakoplovna struktura od kompozitnih materijala. Prvo krilo proizvedeno je i presvučeno i ojačano "pleksiglasom". Upotrijebljena je sendvič-konstrukcija s jezgrom od acetata celuloze sačastog oblika. Primjena kompozitnih materijala je stagnirala do 1963. godine, kada se pojavljuju novi materijali.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

Kompozitni materijali su homogeni materijali, dobiveni umjetnim spajanjem dvaju ili više različitih materijala (punilo ili ojačalo + odgovarajuća matrica), u cilju postizavanja specifičnih značajki i svojstava.

KOMPOSITWERKSTOFFE BEI FLUGZEUGEN

COMPOSITE MATERIALS USED IN AIRCRAFT

Composite materials play a major role in aircraft structural design. They comprise the filler frame and matrix support binder. It can be stated that the composite structure has the binder as the main component with the filler as an additional component. Further division refers to metal and non-metal binders. Non-metal composite materials i.e. polymer composite materials have been most widely used.

With polymer composite materials glass fibre, carbon fibre, pine and organic fibre are used as fillers.

Synthetic resins are used for the production of binder component, of which epoxy resins and polyester resins are most common.

Composite material, carbon fibre - epoxy resin is one of the major structural materials in aircraft industry, for its advantageous physical, chemical and mechanical properties.

By 40% utilization of composite materials in aircraft structural design, the mean value of aircraft mass can be reduced by 12%. The mentioned reduction can by way of restructuring the aircraft geometry result in a reduction of aircraft weight by 17%. Respective reduction of the engine mass and lesser quantities of fuel can introduce further 4% savings resulting in a total reduction of aircraft mass by 21%.

Composite materials shall in the future stay the most promising aircraft and spacecraft materials of tomorrow and their applications shall steadily grow in number.

1. EINFÜHRUNG

Die Luftfahrt hat eine wichtige Rolle bei den Weltstaaten, somit wird nach immer besseren Flugbedingungen und technischen Eigenschaften der Flugzeuge verlangt. Eine wichtige Rolle haben vier Kompositwerkstoffe, deren Verwendung in Luftfahrt-Konstruktionen bei 35 bis 45% liegt. Der Trend ist weiterhin wachsend. Mit der Verwendung von Kompositwerkstoffen bei Flugzeugkonstruktionen werden verminderte Strukturmassen, vergrößerte Tragfähigkeiten, bessere dynamische Eigenschaften sowie verlängerte Lebensdauer der Konstruktionen erzielt.

Begonnen hat die Verwendung von Kompositwerkstoffen im Jahre 1943, als die erste Flugzeugkonstruktion aus Kompositwerkstoffen gebaut wurde. Der erste Flügel wurde hergestellt, überzogen und verstärkt mit "Plexiglas". Man benutzte die "Sandwich"-Konstruktion mit einem Kern aus Zellwollateuten in Wabenform. Die Anwendung von Kompositwerkstoffen stagnierte dann bis 1963, als neue Materialien auftauchen.

2. KOMPOSITWERKSTOFFE

Kompositwerkstoffe sind homogene Werkstoffe gewonnen aus der künstlichen Verbindung zweier, oder mehrerer, Materi-

Punilo-ojačanje čini armatura a matricu nosač-vezivo. Može se reći da je kompozit spoj matrice kao osnovne komponente s armaturom kao dodatnom komponentom. Osnovna uloga matrice je povezivanje elemenata dodatne komponente u jednu cjelinu.

Kompozite možemo podijeliti u one s metalnom i one s nemetalnom matricom.

Metalni kompoziti su:

- metalni kompoziti ojačani česticama (ojačani čvrstom fazom trodimenzionalnog oblika - česticama)
- slojeviti kompoziti (ojačani čvrstom fazom dvodimenzionalnog oblika - vlaknima)
- vlaknasti kompoziti (ojačani čvrstom fazom jednodimenzionalnog oblika - vlaknima)

Nemetalni kompoziti su polimerni kompoziti a najviše se rabe u suvremenoj zrakoplovnoj industriji.

Najčešće ih dijelimo prema vrsti materijala ojačanja, gdje su glavni nosioci vlakna.

Vlakna mogu biti organskog prirodnog i sintetičnog podrijetla te sintetična anorganska i metalna. Najčešće se susreću staklena, borna, ugljična, berilijeva, silicij-karbidna i druga vlakna. Mogu se koristiti i kombinirana vlakna.

Podjela prema materijalu matrice čini se dodatno, zbog šireg izbora primijenjenih smola i njihovih kombinacija. Kao matrice se danas primjenjuju epoksidne, poliesterske, fenolne, silikonske, melaminske i druge smole.

2.1. Kompozitni materijali na osnovi polimernih vlakana

U sustavu vlaknastih polimernih kompozita ulaze kao armatura staklena vlakna, ugljična vlakna, vlakna bora i organska vlakna. Za izradbu matrice koriste se sintetične smole koje se dijele na termoplastične i termostabilne.

Kod smola postoje sljedeća temperaturna ograničenja:

- poliesterske smole 353 - 373 K
- epoksidne smole 393 - 423 K
- fenolne smole 573 K

Fenolne smole primjenjuju se samo za izradbu dijelova izloženih povišenim temperaturama i za sekundarne elemente strukture.

2.2. Kompozitni materijali na osnovi staklenih vlakana

Kompozitni materijali na osnovi staklenih vlakana primjenjivali su se prvo u industrijske svrhe. Ideja o povezivanju staklenih vlakana s organskim smolama realizirana je četrdesetih godina u zrakoplovstvu. Kompozit staklo-smola ima visoku čvrstoću znakovitu za stakleno vlakno, ali je izgubio krutost stakla. Granična površina staklo-smola je kompaktna pa je možemo usporediti s prirodnim kompozitima poput drveta i kosti.

Za primjenu kompozita u primarnim strukturama zrakoplova (izuzev jedrilica i bespilotnih letjelica) nužan je mali Youngov modul (E). Kompoziti na osnovi staklenih vlakana su najjeftiniji i najbolji materijali tamo gdje se ne traže prevelike vrijednosti krutosti i čvrstoće. Imaju veću gustoću u odnosu na ugljične kompozite.

Postoji nekoliko tipova staklenih vlakana koji se koriste kao armatura: A, C, E, S i R. Najčešće se koriste bezalkalna vlakna E i S. Najjednostavnija je izradba poliesterskih smola

(Füllung oder Stärkung + entsprechende Matritze), mit dem Ziel spezifische Eigenschaften oder Charakteristika zu erreichen.

Die Füllung - Stärkung besteht aus der Armatur, die Matritze aus dem Träger - Binder. Man kann sagen daß die Komposite eine Verbindung aus Matritze, als Grundkomponente, und Armatur, als Zusatzkomponente, sind. Die Hauptaufgabe der Matritze ist es Elemente der Zusatzkomponenten in eine Einheit zu verbinden.

Komposite können zweifach gegliedert werden, in solche mit Metallmatritze und die anderen mit Nichtmetallmatritze.

Metallkomposite sind:

- mit Partikeln verstärkte Metallkomposite (verstärkt durch eine feste Phase dreidimensionaler Form - Partikel)
- Mehrschichtkomposite (verstärkt durch eine feste Phase zweidimensionaler Form - Faser)
- Zellwollkomposite (verstärkt durch eine feste Phase eindimensionaler Form - Faser)

Nicht-Metall-Komposite sind Polymere-Komposite und haben die größte Verwendung in der heutigen Luftfahrtindustrie.

Sie werden meist nach Art des Stärkungsmaterials gegliedert, wobei Faser die Hauptträger sind.

Die Faser können organisch natürlicher, organisch künstlicher oder anorganisch künstlicher Herkunft sein und auch aus Metall. Am häufigsten begegnet man Glasfasern, Kiefferfasern, Kohlefasern, Fasern aus Beryllium, Silizium-Carbyd u.a. Man kann auch Faserkombinationen benutzen.

Zusätzlich wird eine Gliederung nach Matritzenmaterial durchgeführt, wegen der großen Auswahl von Harzen. Als Matritze benutzt man heuer Epoxydharze, Polyesterharze, Phenolharze, Silikonharze, Melaminharze u.a.

2.1. Kompositwerkstoffe aus Polyesterfasern

Ins System der Komposite aus Polyesterfasern werden als Armatur Glasfaser, Kohlefaser, Kiefferfaser und organische Faser eingeführt. Die Matritze wird aus Kunstharzen gebildet die in thermoplastische und thermostabile gegliedert werden.

Bei Harzen bestehen folgende Temperaturbeschränkungen:

- Polyesterharze 353 - 373 K
- Epoxydharze 393 - 423 K
- Phenolharze 573 K

Phenolharze werden nur bei Teilen verwendet die erhöhten Temperaturen ausgesetzt sind und bei sekundären Strukturelementen.

2.2. Kompositwerkstoffe aus Glasfasern

Kompositwerkstoffe aus Glasfasern wurden zuerst zu Industriezwecken verwendet. Die Idee Glasfaser mit natürlichen organischen Harzen zu verbinden wurde in den vierziger Jahren in der Luftfahrt verwirklicht. Die Komposite Glas - Harz hat eine hohe Festigkeit, typisch für Glasfaser, aber nicht die Zerbrechlichkeit des Glases. Die Grenzfläche Glas - Harz ist so kompakt daß man sie mit natürlichen Kompositen wie Holz oder Knochen vergleichen kann.

Die Anwendung der Komposite in primären Strukturen des Flugzeugs (außer Segelflugzeugen und nicht-bemannten Flugkörpern) ist durch das kleine YOUNG -Modul (E). Die Komposite aus Glasfasern sind die preiswertesten und besten überall dort wo keine zu großen Werte der Festigkeit und Steif-

jer se ne zahtijevaju posebni uvjeti polimerizacije, a ujedno je i najjeftinija.

U zrakoplovu se najviše upotrebljavaju kompozitni materijali na osnovi staklenih vlakana, poliesterskih i epoksidnih smola, i to u proizvodnji zračnih jedrilica i bespilotnih letjelica, u sekundarnim strukturama vojnih i putničkih zrakoplova, helikoptera.

2.3. Kompozitni materijali na osnovi vlakana bora

Kompoziti na osnovi vlakana bora često se primjenjuju. Pritom se kao matrica koristi epoksidna smola.

Osnovne značajke ovih kompozita su visoke vrijednosti zatezne čvrstoće i Youngova modula. Odlično svojstvo je posljedica dobrih adhezijskih svojstava vlakana bora prema epoksidnoj matrici, tako da se postižu visoke vrijednosti međuslojnog smicanja. Kompoziti od bora odlikuju se velikom otpornošću na habanje.

Danas je uporaba kompozitnih materijala na osnovi bora u zrakoplovstvu svedena na hibridne strukture (zajedno s ugljičnim vlaknima), za kompozite s metalnom matricom (dural).

2.4. Kompozitni materijal ugljik-epoksid

Kompozitni materijal ugljično vlakno-epoksidna smola jedan je od najvažnijih konstrukcijskih materijala današnjice u zrakoplovstvu. To se može vidjeti u tablici 1. gdje su predočena svojstva ugljičnih vlakana koja se nalaze u proizvodnji u svijetu. I po tim podacima usvojena je proizvodnja ukupno šest tipova ugljičnih vlakana, od kojih se u zrakoplovstvu najviše koriste ugljična vlakna visoke zatezne čvrstoće i visokog modula elastičnosti, kao dva standardna tipa.

Osnovna značajka ugljičnih vlakana je jedinstvena kombinacija fizikalnih, kemijskih i mehaničkih svojstava. Osim visoke vrijednosti zatezne čvrstoće i modula elastičnosti, ugljična vlakna imaju dobru otpornost na trenje i umor, niski koeficijent termičkog širenja, visoku otpornost u kemijskoj sredini, dobru električnu provodljivost, otpornost na nuklearna zračenja, a posebno je bitna mala gustoća.

3. ZNAČAJKE KONSTRUKCIJSKIH KOMPOZITNIH MATERIJALA UGLJIČNO VLAKNO - EPOKSIDNA SMOLA

Za ove su materijale, osim visokih svojstava čvrstoće i krutosti, otpornosti na umor i vibracije, znakovita još neka svojstva, dosad neobrađena, koja nisu tipična i ne iskazuju se kod klasičnih materijala.

Otpornost na trenje. Najvažniji je čimbenik u odredbi te otpornosti, s obzirom na to da su ugljična vlakna izuzetno otporna na trenje a smola nije, smjer postavljanja vlakana u kompozitu. Kada je opterećenje u smjeru vlakana, izduženje pri trenju je malo i neznatne su deformacije nakon prestanka opterećenja.

Termičko širenje. Koeficijent termičkog širenja kompozita u smjeru vlakana je negativan i varira s promjenom temperature, dok je poprečno na pravac vlakana pozitivan i također promjenjiv. Te promjene koeficijenta termičkog širenja nisu linearne.

heit erfordert werden. Ebenso haben diese Komposite eine größere Dichte im Vergleich zu Kohlefasern.

Es gibt mehrere Glasfasertypen die als Armatur verwendet werden, und zwar A, C, E, S und R. Am häufigsten werden die alkalischen Faser E und S verwendet. Am einfachsten ist die Erzeugung von Polyesterharz weil keine besonderen Polymerisationsbedingungen gestellt werden und sie am billigsten ist.

In der Luftfahrt werden meist Kompositwerkstoffe aus Glasfasern, Polyester- und Epoxydharzen benutzt und zwar bei der Herstellung von Segelflugzeugen und nicht-bemannten Flugkörpern, bei sekundären Strukturen von Militär- und Passagierflugzeugen sowie bei Hubschraubern.

2.3. Kompositwerkstoffe aus Kiefferfasern

Die Kompositwerkstoffe aus Kiefferfasern haben eine breite Anwendung gefunden, dabei dienen Epoxydharze als Matritze.

Die Grundeigenschaften dieser Komposite sind hohe Werte der Spannungsfestigkeit und des YOUNG-Moduls. Dies ist die Folge einer sehr guten Adhäsion der Kiefferfasern zur Epoxyd-Matritze, so daß hohe Werte der zwischenschichtlichen Gleitung erzielt werden. Die Kiefer-Komposite zeichnen sich durch einen großen Abnutzungswiderstand aus.

Heuer werden Kompositwerkstoffe aus Kiefferfasern in der Luftfahrt bei Hybridstrukturen (zusammen mit Kohlefasern) und Komposite mit Metall-Matritze (Dural) verwendet.

2.4. Kompositwerkstoffe aus Kohle-Epoxyd

Einer der wichtigsten Werkstoffe in der heutigen Luftfahrt ist die Komposite aus Kohlefaser-Epoxydharz. In Tabelle 1 ist dies zu sehen, dort sind Eigenschaften von Kohlefasern die in der Welt erzeugt werden, dargestellt. Nach diesen Daten wurde die Herstellung von insgesamt sechs Kohlefasertypen übernommen, wovon in der Luftfahrt vor allem die mit hohen Spannungsfestigkeiten und großen Elastizitätsmodulen, als zwei Standardtypen, verwendet werden.

Die Grundeigenschaft von Kohlefasern ist die einzigartige Kombination physikalischer, chemischer und mechanischer Merkmale. Neben der hohen Spannungsfestigkeit und großem Elastizitätsmodul haben Kohlefaser einen guten Reibungswiderstand, Ermüdungsfestigkeit, einen niedrigen Dilatationskoeffizient, ein großes Widerstandsvermögen in chemischen Umgebungen, eine gute elektrische Leitfähigkeit, ein Widerstandsvermögen gegenüber nuklearer Strahlung und vor allem eine geringe Dichte.

3. EIGENSCHAFTEN DER KOMPOSITWERKSTOFFE KOHLEFASER-EPOXYDHARZE

Neben der hohen Festigkeit und Steifheit, der großen Vibrations- und Ermüdungsfestigkeit, gibt es noch einige, bisher nicht bearbeitete, atypische Eigenschaften die bei klassischen Materialien nicht erwähnt werden.

Reibungswiderstand. Beim Bestimmen dieses Widerstands ist der wichtigste Faktor die Richtung in welcher die Fasern verlegt werden, da Kohlefaser einen hohen, der Harz aber einen niedrigen Reibungswiderstand aufweist.

Termička provodnost. Ovi materijali pokazuju relativno visoku termičku provodnost u pravcu vlakana i prilično nisku poprečno na pravac vlakana. Vlakna visokog modula elastičnosti pokazuju bolju termičku otpornost od komercijalnih ugljičnih vlakana, tako da se kompoziti od ovih vlakana približuju čelici-ma i u uzdužnom pravcu provodljivosti.

Otpornost na utjecaj okoline. Tijekom iskorištavanja kompoziti ovog tipa upijaju u prosjeku oko 1% vlage. Ta vlaga s efektima visoke temperature smanjuje značajke kompozita, poglavito one određene matricom (čvrstoća na tlak i smicanje). Na temperaturama višim od 393 K, one mogu opasti za oko 30%. Razvitkom novih sustava plastičnih matrica trebali bi se dobiti kompoziti s otpornošću u uvjetima istovremenog djelovanja vlage i topline.

Otpornost na udar. Na povećanje ove otpornosti može se utjecati odabirom pojačala i matrice. U načelu, ako je izduženje do kidanja vlakna veće, onda je veća i otpornost na udar. Stoga su vlakna s velikom čvrstoćom i izduženjem otpornija na udar od onih s velikim modulom elastičnosti.

4. PREDNOSTI I NEDOSTACI KOMPOZITNIH MATERIJALA

Primjena kompozita u zrakoplovnoj industriji jedno je od najvećih postignuća u posljednjih nekoliko desetljeća. Kao što

Termische Dehnung. Der thermische Dilatationskoeffizient von Kompositen ist in Längsrichtung der Fasern negativ und veränderlich in Abhängigkeit von der Temperatur, während er in Querrichtung positiv und auch veränderlich ist. Diese Veränderungen sind nicht linear.

Thermische Leitfähigkeit. Die Komposite zeigen eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit in Längsrichtung und eine ziemlich niedrige in Querrichtung. Faser mit großem Elastizitätsmodul widersetzen sich thermischen Einflüssen besser als kommerzielle Kohlefasern, so daß sie sich der Stahlleitfähigkeit nähern, auch in Längsrichtung.

Widerstandsfähigkeit gegenüber atmosphärischen Einflüssen. Während der Nutzung beziehen Komposite diesen Typs im Durchschnitt 1% Feuchtigkeit aus der Umgebung. Diese Feuchtigkeit mindert, in Verbindung mit Wärme-effekten, die Eigenschaften der Komposite, vor allem die Matritze-abhängigen (Druck- und Gleitungs-festigkeit). Bei Temperaturen über 393 K können diese um 30% fallen. Mit der Entwicklung von neuen Kunststoffmatritzen müßte man Komposite bekommen die sich gleichzeitigen Einflüssen von Feuchtigkeit und Wärme widersetzen könnten.

Stoßfestigkeit. Mit der Auswahl von Stärkung und Matritze kann eine erhöhte Stoßfestigkeit bewirkt werden. Je größer die Dehnfestigkeit der Fasern, ohne daß die Fasern reißen, desto größer ist eigentlich auch die Stoßfestigkeit. Daher sind Faser mit großer Dehnfähigkeit bzw. Festigkeit in dieser Hinsicht besser als Faser mit großem Elastizitätsmodul.

Tablica 1.
Tabelle 1

Vrste ojačala Stärkungsart	Promjer vlakna (μm) Faser Durchmesser (μm)	Gustoća (g/m^3) Dichte (g/m^3)	Zatezna čvrstoća (MPa) Spannungs- festigkeit (MPa)	Modul zatezanja (gpA) Spannungsmodul (gpA)	Izduženje do kidanja (%) Dehnung bis zum Reißpunkt (%)
ugljično vlakno Kohlefaser					
– visoke zatezne čvrstoće (T300) – Hohe Spannungs-festigkeit (T300)	7	1,75	3500	230	1,5
– visokog izduženja (T400H) – Große Dehnung (T400H)	7	1,80	4500	250	1,8
– srednjeg modula (T800H) – Mittel-Modul (T800H)	5,5	1,80	5600	249	1,9
– visokog modula M 30 – Hohes Modul M 30	6,7	1,70	3900	294	1,3
– visokog modula M40 – Hohes Modul M 40	6,5	1,81	2740	392	0,6
– vrlo visokog modula – Sehr hohes Modul	6,3	1,91	2450	490	0,5
vlakno bora Kieferfaser	100-140	2,55	3000	420	0,5-0,8
armidno vlakno kevlar-49 Kevlarfaser 49	–	1,45	3600	124	2,4
stakleno vlakno Glasfaser					
– stakleno vlakno tipa R – Glasfaser typ R	–	–	4400	86	–
– stakleno vlakno tipa E – Glasfaser typ E	–	–	2400	69	–
Al-slitina (I 65) Al-legur (I 65)	–	2,8	460	72	–
Titan (TiA 16-V4) Titanium (TiA 16-V4)	–	4,5	930	110	–
čelik (BS 970) Stahl (BS 970)	–	7,8	620	207	–

je već navedeno glede konstruktivnih zahtjeva, primjenom kompozita u zrakoplovnim konstrukcijama postiže se povećanje pouzdanosti i produžetak vijeka trajanja.

Usprkos tim odlučujućim prednostima za uporabu kompozita u konstrukcijama zrakoplova, ne smije se zaboraviti da je riječ o anizotropnim materijalima, koji su tijekom uporabe u zrakoplovnim strukturama izloženi nizu složenih i intenzivnih statističkih opterećenja, kao i djelovanju atmosferskih utjecaja tijekom eksploatacije.

Stoga je tijekom postupka proračuna i projektiranja strukture od kompozitnih materijala nužno uzeti u obzir i te čimbenike, jer smanjuju dopuštene vrijednosti njihovih mehaničkih značajki i svode ih u realne okvire.

4.1. Prednosti kompozitnih materijala

Ocjena mogućnosti primjene bilo kojeg materijala u zrakoplovnim konstrukcijama u prvom redu se obavlja sa stajališta - može li se njegovom uporabom postići povećanje efektivnosti konstrukcije. Korištenje kompozitnih materijala na osnovi visokočvrstih vlakana i epoksidne smole, kao matrice (vezivnog elementa) u zrakoplovnim konstrukcijama pokazalo je brojne prednosti nad klasičnim materijalima (ponajprije metalima) dosada upotrebljivanim u zrakoplovstvu.

Opće prednosti mogu se formulirati kao:

- prednosti kompozita u izradbi i nosivosti
- prednosti kompozita pri opsluživanju i iskorištavanju.

Prednosti kompozita u izradbi i nosivosti

S obzirom na to da se radi o vlaknastim strukturama, dodatna čvrstoća materijala postiže se orijentacijom vlakana u smjeru djelovanja glavnih napona i sila na strukturi.

Cijepanje jednog ili čak snopa vlakana ne uzrokuje odmah katastrofalne lomove, jer se opterećenje prenosi na okolnu strukturu i druga vlakna. Polimerizacijom, pak, više elemenata strukture (npr. zajedno oplate i remenjače krila) dobiva se "žilava" konstrukcija relativno visoke nosivosti i nakon djelomičnog oštećenja.

Osnovna konstrukcija može biti izvedena od malog broja sklopova i podslopova.

U skladu s prethodnim, može se smanjiti broj mehaničkih vezanih elemenata.

Prednosti kompozita pri opsluživanju i iskorištavanju

- Kompozitni materijali imaju visoka antikorozivna svojstva i odlike.
- Kompozitni materijali imaju malu toplinsku provodljivost.
- Površine izrađene od kompozita su aerodinamički čiste i ne zahtijevaju naknadnu obradu.
- Proces popravka i remonta strukture od kompozita je relativno jednostavan i ne zahtijeva posebne uvjete.

Nabrojene značajke odnosno prednosti, iako važne, ne zauzimaju središnje mjesto u primarnim svojstvima kompozita i prema njima se ne može potpuno sagledati prava vrijednost primjene kompozitnih materijala.

Ove materijale, uz visoku čvrstoću i krutost, obilježuju otpornost na umor i vibracije. Visoke antivibracijske osobine i otpornost na umor su pak čimbenici koji izravno utječu na produžetak vijeka iskorištavanja dijelova izrađenih od (ugljičnih) kompozita, u odnosu na adekvatne metalne dijelove. Na slici 1. predočena je otpornost na umor za različite konstrukcijske materijale kada su izloženi naizmjeničnom djelovanju ponavljano opterećenja. Iz slike je vidljivo da se znatno

4. VOR- UND NACHTEILE DER KOMPOSITWERKSTOFFE

Die Verwendung von Kompositen in der Flugzeugindustrie ist eine der größten Errungenschaften der Luftfahrt in den letzten Jahrzehnten. Wie schon erwähnt wurde, ist, bezüglich der Konstruktionsforderungen, mit der Verwendung von Kompositwerkstoffen die Lebensdauer und Verlässlichkeit der Flugzeuge gewachsen.

Dennoch darf nicht vergessen werden daß es sich hier um anisotropische Stoffe handelt, welche während der Nutzung in Flugzeugstrukturen einer Reihe von komplexen und intensiven statischen Belastungen, sowie atmosphärischen Einflüssen, ausgesetzt sind.

Deswegen ist es notwendig während Planung und Berechnung von Kompositstrukturen diese Faktoren mit einzubeziehen, denn sie mindern die Toleranzen der mechanischen Eigenschaften auf ein reales Niveau.

4.1. Vorteile der Kompositwerkstoffe

Die Verwendungsmöglichkeiten irgendwelcher Werkstoffe bei Flugzeugen werden, in erster Linie, vom Standpunkt der möglichen Effizienzsteigerung von Flugzeugstrukturen bewertet. Die Verwendung von Kompositwerkstoffen aus hochfesten Fasern und Epoxydharz als Matritze (Bindeelement) erwies sich in der Luftfahrt als vorteilhaft gegenüber klassischen Werkstoffen (vor allem Metallen) die bisher verwendet wurden.

Allgemein können die Vorteile Folgendermaßen formuliert werden:

- Vorteile der Tragfähigkeit und während der Herstellung
- Vorteile während der Nutzung.

Vorteile der Tragfähigkeit und während der Herstellung:

Da es sich um Faserstruktur handelt wird eine zusätzliche Festigkeit erreicht indem die Fasern in Richtung der größten Spannungen orientiert werden.

Das Reißen einer Faser oder gar eines Faserbündels führt nicht gleich zu katastrophalen Brüchen da sich die Belastung auf naheliegende Fasern bzw. Strukturen verlegt. Ebenso ist eine Polymerisation mehrerer Strukturelemente möglich, womit "zähe" Konstruktionen gewonnen werden, die auch nach teilweiser Beschädigung relativ hohe Tragfähigkeiten aufweisen.

Die Grundkonstruktion kann aus einer kleinen Anzahl von Teilen zusammengesetzt werden.

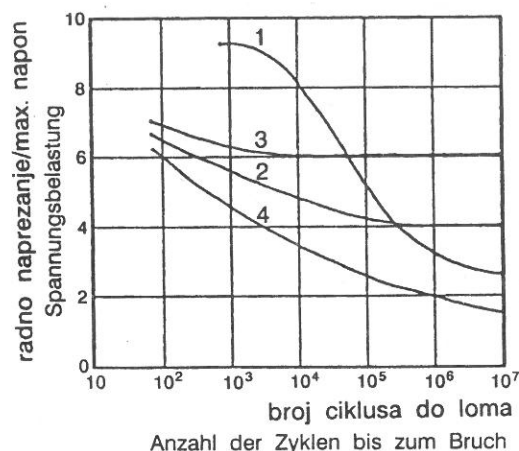
Demnach kann die Zahl mechanisch verbundener Elemente gesenkt werden.

Vorteile während der Nutzung

- Kompositwerkstoffe haben gute Antikorrosionseigenschaften
- Kompositwerkstoffe haben eine geringe Wärmeleitfähigkeit
- Oberflächen aus Kompositen sind aerodynamisch rein und benötigen keine nachträgliche Bearbeitung
- Kompositstrukturen sind einfach zu reparieren und die Überholung verlangt keinerlei besondere Bedingungen.

Die aufgezählten Vorteile sind, obwohl wichtig, nicht die Haupteigenschaften der Komposite und ihr wahrer Nutzwert ist hieraus nicht zu ersehen.

Diese Werkstoffe zeichnet, neben hoher Festigkeit und Starrheit, auch Vibrations- und Ermüdungsfestigkeit aus. Es



1. Aluminium
2. Čelik
3. Ugljični kompozit
4. Stakleni kompozit

1. Aluminium
2. Stahl
3. Kohle-Komposite
4. Glas-Komposite

Slika 1.
Abbildung 1

veći odnos radnog prema maksimalnom naprezanju može postići primjenom kompozita. Istovremeno se zadržava visok postotak statičke čvrstoće vlakna i poslije 107 ciklusa. Trajna čvrstoća na umor pojedinih kompozita (ugljičnih, bornih) iznosi oko 80% statičke čvrstoće, dok je ta veličina za aluminij 35%.

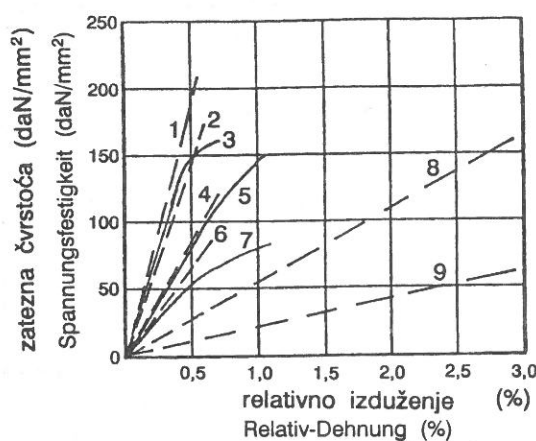
Glede izlazne čvrstoće očigledna je prednost kompozita nad drugim klasičnim konstrukcijskim materijalima (sl. 2.). Međutim, za razliku od metala, oni su potpuno elastični do loma. S dijagrama, na kojemu je grafički prikazan odnos osobina naprezanje-izduženje, također se vidi da je izduženje do loma vrlo malo.

Izduženje do kidanja najčešće primjenjivanih ugljičnih kompozita je vrijednosti 1,5%. Tek u novije vrijeme, tj. u novoj generaciji kompozitnih materijala ta veličina je povećana na 1,7%.

Prednost kompozita je i njihova mala gustoća, što izravno utječe na smanjenje mase zrakoplovne konstrukcije. Gustoća ugljičnih kompozita u granicama je od 1600 do 1700 kg/m³ što je za oko 40% niže od gustoće duraluminija (2800 kg/m³), a po

sind gerade die Vibrations- und Ermüdungsfestigkeit die, unmittelbar, eine längere Nutzungsdauer bei Kohle-Kompositen ermöglichen, als es bei Metallteilen der Fall ist. Abbildung 1 zeigt die Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit von der Anzahl wiederholter, wechselwirkender Belastungen, bei einigen Werkstoffen. Es ist klar zu sehen wie groß bei Kompositwerkstoffen die Dauerbelastbarkeit im Verhältnis zur größten Belastung ist. Gleichzeitig wird ein großer Anteil der statischen Festigkeit beibehalten, selbst nach 10⁷ Zyklen. Die Dauerbelastbarkeit der Komposite (Kohle- und Kieferfasern) beträgt etwa 80 % der statischen Festigkeit, während sie bei Aluminium nur 35 % beträgt.

Ein klarer Vorteil der Komposite gegenüber klassischen Werkstoffen liegt in ihrer Dauerfestigkeit, (Abb. 2). Im Unterschied zu Metallen sind Komposite vollkommen elastisch bis zum Bruch. An der Abbildung des Verhältnisses von Spannungs- und Dehnungseigenschaften ist auch zu sehen wie klein die Dehnung bis zum Reißpunkt ist. Dieser Wert beträgt bei den meistverwendeten Kohlefaser-Kompositen 1,5 %. Erst die



1. Bor-epoksid (60-40%)
2. Ugljik-epoksid (60-40%)
3. Čelik
4. Titan
5. Bor-epoksid (30-70%)
6. Staklo-epoksid (60-40%)
7. Dural
8. Ugljik-epoksid (30-70%)
9. Staklo-epoksid (30-70%)

1. Kiefer-Epoxyd 60-40
2. Kohle-Epoxyd 60-40
3. Stahl
4. Titanium
5. Kiefer-Epoxyd 30-70
6. Glas-Epoxyd 60-40
7. Dural
8. Kohle-Epoxyd 30-70
9. Glas-Epoxyd 30-70

Slika 2.
Abbildung 2

nekoliko puta manje od gustoće titana (4300 kg/m^3) i čelika (7800 kg/m^3). Realne mogućnosti smanjenja mase ovise o složenosti konstrukcije, njenom volumenu i o vrijednosti djelovanja naprezanja. Ako se radi o sekundarnim strukturama, smanjenje mase se postiže jednostavnom zamjenom metalnih dijelova onima od kompozita. Ali, kod primarnih struktura, gdje se pojavljuju koncentrirana opterećenja i sile, projektni uvjeti uvođenja kompozitnih materijala su znatno složeniji. U tom slučaju postižu se relativno male uštede u masi, nekih 20%.

U tablici 2. su procijenjene vrijednosti smanjenja mase konstrukcije prilikom prelaska na kompozitnu strukturu. Na osnovi tog tabličnog prikaza može se zaključiti da je srednja vrijednost smanjenja mase zrakoplova 12% primjenom 40% kompozitnih materijala u konstrukciji. Uzevši u obzir navedeno smanjenje težine, može se rekonstrukcijom geometrije zrakoplova povećati smanjenje težine na 17%. Također, smanjenjem mase motora i manjom količinom goriva može se uštediti dodatnih 4%, što rezultira ukupnim smanjenjem mase zrakoplova od nekih 21%.

4.2. Nedostaci kompozitnih materijala

Uz dosada izložene prednosti, postoje i određeni nedostaci, koji su uglavnom posljedica fizikalne strukture kompozitnih materijala, kemijsko-fizikalnih osobina njegovih sastavnih komponenata i tehnologije izradbe.

Najutjecajniji su čimbenici koji smanjuju dosad navedene prednosti kompozita:

- anizotropna svojstva
- varijacija svojstava
- osjetljivost na koncentraciju napona
- podložnost djelovanju okolnih utjecaja.

Po teoriji elastičnosti, elastično tijelo se naziva anizotropnim kada ima različita svojstva u ravninama materijalne simetrije. Kompoziti kao anizotropni materijali imaju specifičan oblik veze naprezanje/deformacija. Konkretna formula, odnosno veza između tih veličina, ovisi o strukturi materijala, orijentaciji armirajućih (ojačavajućih) elemenata i o odnosu značajki matrice i armature. Zbog složenoga napreznog stanja u elementima zrakoplovnih struktura obavlja se križno slaganje slojeva

neue Generation von Kompositwerkstoffen hat einen erhöhten Wert von 1,7 %.

Ein weiterer Vorteil der Komposite ist ihre kleine Dichte, was unmittelbar zur Minderung der Konstruktionsmasse beiträgt. Die Dichte von Kohlefaser-Kompositen liegt zwischen 1600 und 1700 kg/m^3 , was 40 % unter dem Dichtewert von Dur-Aluminium liegt und um ein vielfaches kleiner ist als die Dichte von Titanium (4300 kg/m^3) und Stahl (7800 kg/m^3). In Wirklichkeit hängt die Massenminderung von der Komplexität der Konstruktionen, ihren Volumen und den Spannungswerten ab. Bei sekundären Strukturen wird die Massenminderung durch Ersetzung der Metallteile mit Kompositstrukturen erreicht. Bei primären Strukturen sind die Bedingungen zur Verwendung von Kompositwerkstoffen, wegen konzentrierter Belastungen, wesentlich komplizierter. In diesem Fall werden relativ kleine Einsparungen von etwa 20 % erreicht.

Die Tabelle 2 zeigt geschätzte Massenminderungswerte von Konstruktionsteilen mit Kompositstrukturen. Daraus läßt sich schließen daß das Flugzeug mit 40 % Kompositstrukturen eine, im Durchschnitt, um 12 % kleinere Masse hat. Unter Berücksichtigung des erwähnten könnte mit der Rekonstruktion der Flugzeuggeometrie eine Minderung von 17 % erreicht werden. Weiterhin könnte eine 4 %-ige Minderung der Motor-masse und Kraftstoffmenge zur Gesamt-minderung der Flugzeugmasse um etwa 21 % führen.

4.2. Nachteile von Kompositwerkstoffen

Neben den bisher genannten Vorteilen bestehen auch gewisse Nachteile die hauptsächlich auf physikalische Strukturen, chemisch-physikalische Eigenschaften und Produktionstechnologien zurückzuführen sind.

Einflußreiche Faktoren die zu Nachteilen führen sind:

- unisotropische Eigenschaften
- Eigenschaftsschwankungen
- Empfindlichkeit auf Spannungskonzentrationen
- Abhängigkeit von Umgebungseinflüssen.

Folgend der Elastizitätstheorie ist ein elastischer Körper unisotropisch wenn er auf verschiedenen Ebenen der Materialsymmetrie unterschiedliche Merkmale aufweist. Komposite haben, als unisotropischer Stoff, ein spezifisches Verhältnis

Tablica 2.
Tabelle 2

Konstrukcija Konstruktion	Opseg uporabe kompozita (%) Komposite-Anteil (%)	Smanjenje mase uporabom kompozita (%) Massenminderung durch Komposite-Verwendung (%)	Ukupno smanjenje mase (%) Gesamtmasenminderung (%)
Krilo Flügel	20	70	14
Vertikalni rep Senkrechter Schwanzflügel	45	40	18
Horizontalni rep Waagerechter Schwanzflügel	45	40	18
Trup Rumpf			
Prednji dio Vorderteil	40	40	16
Srednji dio Mittelteil	17	40	7
Zadnji dio Heckteil	30	50	15

vlakana pri čemu se mijenjaju svojstva jednosmjernog (unidirekcionalnog) materijala u svojstva laminata (materijali s višesmjerno orijentiranim slojevima, obično 0, 45 i 90 stupnjeva). Križnim slaganjem se osim toga smanjuju i efekti koncentracije naprezanja na području otvora ili pukotina u strukturi. Nastanak naprezanja u tim područjima posljedica je fizičke strukture kompozita (ista pojava sreće se kod klasičnih materijala ali nisu isti mehanizmi razaranja). U kompozitnoj strukturi noseći element je vlakno a matrica sredstvo kojim se opterećenje prenosi na vlakna. Svaki prekid nosećeg elementa ili armature pojavljuje se kao singularitet u strukturi, a kako kompozit praktično nema plastičnu zonu deformacije, što je osnovna odlika metala, dolazi do širenja postojećeg prekida i konačnog razaranja. Ispitivanja su pokazala da se zbog smanjene sposobnosti prilagodbe na naprezanje znatno smanjuju lokalne značajke čvrstoće kompozita oko otvora.

Varijacija svojstava je uvjetovana utjecajem velikog broja parametara u tehnologiji izvedbe i time što se svojstva matrice mijenjaju tijekom skladištenja. Stoga se pri proračunu kompozitnih struktura u obzir moraju uzeti prosječne vrijednosti mehaničkih značajki, jer se inače teško postiže reproduktivnost izradbe.

Što se tiče problema ambijentnih utjecaja ili utjecaja oko-line, oni se mogu sagledati kao:

- utjecaj agresivnih tekućina u dodiru sa strukturom
- utjecaj atmosfere
- utjecaj temperature.

Utjecaj agresivnih tekućina i kemijskih agenasa, poput kerosina, hidrauličnih ulja i maziva, kao najčešćih u eksploataciji zrakoplova, odnosi se uglavnom samo na kompozite na osnovi stakla i bora (iako se smatra da nisu izraziti), dok su na ugljične kompozite ti utjecaji skoro nikakvi ili veoma mali.

Utjecaj je atmosfere, za razliku od prethodnog, velik i mora se u proračunima obuhvatiti korektivnim čimbenikom, koji prilično smanjuje vrijednost mehaničkih značajki. Najnegativnije djelovanje ima utjecaj apsorbirane vlage. U uvjetima temperaturnih razlika 223 do 333 K, što je česta i realna situacija, apsorpcija vlage se povećava, a sprega zajedničkog djelovanja vlage i temperature izaziva bubrenje polimerne matrice i uzrokuje degradaciju mehaničkih značajki ako se povećava vrijeme njihova trajanja. U suprotnom, ako dođe do brzog sušenja i odstranjivanja vlage, svojstva kompozita "vraćaju" se na prvotnu razinu. Ultraljubičasto zračenje, također, uzrokuje snižavanje vrijednosti pozitivnih svojstava, jer se uslijed dugotrajne izloženosti matrica razgrađuje.

Utjecaj temperature vezan je za atmosferu, ali i za druge čimbenike. Tako je, npr., primjena klasičnih epoksidnih smola u zrakoplovstvu djelomično ograničena radnom temperaturom do 393 K, smanjenom otpornošću u vlažnoj atmosferi i smanjenom otpornošću na udar. Zbog tih nezadovoljavajućih kvaliteta klasičnih epoksidnih smola, njihovom modifikacijom dobivene su smole viših kvaliteta, koje se danas koriste u zrakoplovstvu. Kompoziti na osnovi tih smola su, po mišljenju stručnjaka, izuzetno efikasni pri visokim temperaturama, 453 K, u uvjetima leta što se pojavljuju kao posljedica povećanja brzine koja utječe na zagrijavanje konstrukcije zrakoplova odnosno njegovih dijelova. Međutim, i kod ovih smola pojavljuju se problemi pri eksploataciji - njihova žilavost i tolerancija na oštećenje - jer dok su ugljična vlakna vrlo čvrsta ($2,56 \text{ N/m}^2 - 3,56 \text{ N/m}^2$), smole su relativno slabe i krte. Tijekom leta strukture zrakoplova izrađene od ugljičnih kompozita izložene su udarnom

Spannung-Deformation. Die konkrete Formel, welche dieses Verhältnis beschreibt, ist abhängig von der Materialstruktur, der Orientation von Armaturelementen und dem Verhältnis von Matritze- und Armaturmerkmalen. An Elemente von Flugzeugstrukturen werden hohe Spannungsforderungen gestellt, weshalb die Faserschichten kreuzweise verlegt werden. Dabei wechseln Merkmale von gleichgerichteten Stoffen zu Merkmalen von Laminaten (Stoffe mit kreuzweise verlegten Schichten; meist im 45 und 90° Winkel). Mit der kreuzweisen Verlegung werden außerdem Spannungskonzentrationen, im Bereich von Öffnungen oder Rissen, gemindert. Spannungen in diesen Bereichen sind eine Folge der physikalischen Kompositstruktur (diese Erscheinung trifft man auch bei klassischen Materialien, jedoch mit anderen Zerstörungsvorgängen). In der Kompositstruktur ist die Faser das Tragelement während die Matritze Belastungen auf die Fasern übertragen soll. Jeder Riß im Tragelement bzw. Armatur führt zur Struktursingularität und da Composite, im Gegensatz zu Metallen, sogut wie keine plastische Deformationszone haben, kommt es zur Rißverbreiterung und letztendlichen Zerstörung. Untersuchungen haben gezeigt daß Composite, wegen der geringen Anpassungsfähigkeit zu Spannungen, um Öffnungen herum nur sehr verminderte Festigkeiten aufweisen.

Eigenschaftsschwankungen werden beeinflusst von vielen Parametern der Produktionstechnologie sowie von der Tatsache daß sich Matritzenmerkmale während der Lagerung verändern. Deswegen müßten beim Berechnen von Kompositstrukturen Mittelwerte der mechanischen Eigenschaften berücksichtigt werden, ansonsten wird die Reproduktionsfähigkeit nur schwer erreichbar.

Was das Problem der Umgebungseinflüsse angeht, so kann dieses folgendermaßen gegliedert werden:

- Einflüsse aggressiver Flüssigkeiten in Berührung mit der Struktur
- atmosphärische Einflüsse
- Temperatureinflüsse.

Die Einflüsse aggressiver Flüssigkeiten wie z.B. Kerosin, hydraulisches Öl und Schmierstoffe, um nur die meistgebrauchten zu erwähnen, beziehen sich hauptsächlich nur auf Composite aus Glas- und Kieferfasern, während Kohlefaser fast überhaupt nicht beeinflusst werden.

Atmosphärische Einflüsse sind, im Unterschied zu vorher genannten, groß und sie müssen bei Berechnungen mit einem Korrekturfaktor berücksichtigt werden der die mechanischen Eigenschaften sehr mindert. Am schlimmsten ist der Einfluß absorbierter Feuchtigkeit. In Bedingungen schwankender Temperaturen, von 223 bis 333 K, was häufig der Fall ist, steigt die Absorbierung und im Zusammenwirken von Feuchtigkeit und Wärme kommt es zum Anschwellen der Polymermatritze, was bei fortlaufender Andauer zu immer größeren Degradierungen der mechanischen Eigenschaften führt. Wenn es aber zum schnellen Trocknen kommt kehren die anfänglichen Eigenschaften wieder. Ultraviolette Strahlen wirken ebenfalls nachteilig da die Matritze, bei langfristigem ausgesetzt sein, zersetzt wird.

Der Temperatureinfluß hängt mit der Atmosphäre zusammen, aber auch mit anderen Faktoren. So wird die Verwendung von Epoxydharzen in der Luftfahrt beschränkt durch die Arbeitstemperatur von 393 K, das niedrigere Widerstandsvermögen bei Luftfeuchtigkeit und die kleinere Stoßfestigkeit. So wurden klassische Epoxydharze modifiziert und man erhielt Harze besserer Qualität die in der heutigen Luftfahrt Verwen-

oštećenju, uslijed čega nastaju mikropukotine, koje mogu uzrokovati lom. Zato se pri konstrukciji kompozitnih komponenata mora imati na umu mogućnost unutarnjeg oštećenja, koje može smanjiti čvrstoću na tlak 60 do 70%, zbog čega se ne može ostvariti potpuna ušteda težine koja se postiže primjenom ugljičnih kompozita.

Kao sljedeći problem i nedostatak treba navesti problem izradbe alata za polimerizaciju kompozita. Naime, alat mora biti takav da na temperaturi polimerizacije (450 K) i kasnije stabilizacije 468 K daje egzaktne dimenzije komada, odnosno kompletne strukture. Glede činjenice da kompozit, za razliku od metala, ima negativan koeficijent toplinskog širenja (ili nula), tom problemu se mora posvetiti posebna pažnja. Ako se uzmu u obzir problemi vezani za formiranje proračunskog modela za kompozitne strukture, kao i obvezna zaštita od udara groma i erozivnog djelovanja, primijetiti ćemo smanjenje prvotnih izrazitih prednosti kompozitnih materijala u odnosu na klasične.

5. ZAKLJUČAK

Na temelju izloženih bitnih značajki kompozita, može se zaključiti da se njihovom primjenom u zrakoplovnim konstrukcijama postiže povećanje nosivosti, povećanje vijeka trajanja i uporabe, povećanje pouzdanosti i smanjenje mase konstrukcije.

Napredak u razvoju kompozitnih materijala visokih značajki rezultat je napretka u nekoliko različitih oblasti znanosti: neorganskoj i organskoj kemiji vlakana, tehnologiji preradbe vlakana, tehnologiji smola, fizici vlakana i polimera, teoretskoj mehanici, interakciji između vlakana i matrice, inženjerskoj analizi strukture, koncepciji projektiranja i razvitku metoda proizvodnje za izradbu struktura od kompozitnih materijala.

Ugljična vlakna, koja se industrijski proizvode u svijetu, rezultat su opsežnih istraživačkih radova, kako na poboljšanju mehaničkih značajki tako i na razvoju vlakana koja će karakterizirati sljedeća optimalna kombinacija osobina: zatezne čvrstoće, modula elastičnosti i izduženja do kidanja. Zahtjevi vojne zrakoplovne industrije usmjeruju istraživanja na razvoj novih supervlakana, koja će imati visoku zateznu čvrstoću i izduženje do cijepanja veličine 2%.

Znatno veći napredak se ipak očekuje razvojem i primjenom kompozitnih materijala s matricom od termoplastičnih smola. Njih u odnosu na kompozite s epoksidnim smolama obilježuju bolja otpornost na visokim temperaturama (453 K), veća tolerancija oštećenja, bolja otpornost na utjecaj okoline, jednostavniji postupak izradbe struktura (jer ne zahtijeva pažljivu kontrolu temperature), mogućnost ponovnog oblikovanja i, što je posebno važno, skladištiti se ne mora na nižim temperaturama. Razvitak kompozita na osnovi termoplastičnih matrica uvodi kompozitne materijale u potpuno novo područje.

Međutim, kompozitni materijali ostaju i dalje najperspektivniji materijali u zrakoplovnim i svemirskim letjelicama sutašnjice, i sve će se više primjenjivati u budućnosti.

LITERATURA

- [1] D. GOLUBOVIĆ: Kompozitni materijali u vazduhoplovstvu. Glasnik RV i PVO, 5, 1988, 36-42.
- [2] H. DŽANIĆ: Tehnologija materijala za tehniku prometa. FPZ, Zagreb, 1990, 138-142.

ding finden. Komposite aus solchen Harzen sind, nach Meinung der Experten, besonders effizient bei hohen Temperaturen (453 K), die in Flugbedingungen bei Geschwindigkeitssteigerungen an Flugzeugteilen entstehen. Schwierigkeiten die während der Exploitation bei diesen Harzen auftreten sind ihre Zähigkeit und Stoßfestigkeit, denn haben Kohlefaser noch eine hohe Festigkeit (2,56 N/m² bis 3,56 N/m²), sind Harze doch relativ schwach und zerbrechlich. Flugzeugstrukturen aus Kohlefaser-Kompositen sind während des Fluges heftigen Stößen ausgesetzt die Microrisse zur Folge haben, was wiederum zu Brüchen führen kann. Es sollte daher im Auge behalten werden daß bei Kompositkonstruktionen innere Beschädigungen entstehen können, welche die Spannungsfestigkeit 60 bis 70 % senken, weshalb die Gewichtseinsparung, bei Verwendung von Kohlefasern, doch nicht in vollem Maße verwirklicht werden kann.

Als weiterer Nachteil gilt die Herstellung von Werkzeugen zur Kompositpolymerisation. Dieses Werkzeug muß nämlich bei einer Polymerisationstemperatur von 450 K und der späteren Stabilisationstemperatur von 468 K Stücke bzw. Strukturen genauer Größe hergeben können. Der Tatsache, daß Komposite, im Unterschied zu Metallen einen negativen Wärmedehnungskoeffizient haben (oder dieser gleich Null ist), muß besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Berücksichtigt man die Schwierigkeiten beim Erstellen des Berechnungsmodells für Kompositstrukturen, wie auch die pflichtige Absicherung gegen Donnerschläge und Erosion, so schwinden doch die anfänglichen, ausdrücklichen Vorteile dieser Komposite im Verhältnis zu den klassischen.

5. SCHLUBFOLGERUNG

Auf Grund der geschilderten wichtigen Composite-Eigenschaften läßt sich schließen daß mit ihrer Verwendung bei Flugzeugkonstruktionen erhöhte Tragfähigkeiten, verlängerte Nutzungsdauer, erhöhte Verlässlichkeit und kleinere Massen erreicht werden.

Fortschritte in der Entwicklung hochwertiger Kompositwerkstoffe sind das Ergebnis des Fortschritts in verschiedenen wissenschaftlichen Gebieten: Anorganische und organische Faserchemie, Technologie der Faserbearbeitung, Harztechnologie, Faser- und Polymere-Physik, theoretische Mechanik, Interaktionen zwischen Fasern und Matritze, Strukturanalyse, Projekt- und Entwicklungskonzeption von Produktionsmethoden zur Erzeugung von Kompositwerkstoffstrukturen.

Kohlefaser die heute in der Welt industriell produziert werden sind das Ergebnis umfangreicher Forschungsarbeiten, sowohl an mechanischen Eigenschaften als auch an der Entwicklung von Fasern mit der folgenden optimalen Kombination von Eigenschaften: Spannungsfestigkeit, Elastizitätsmodul und Dehnung bis zum Reißpunkt. Forderungen der militärischen Luftwaffenindustrie führen die Forschungen zur Entwicklung von neuen Superfasern mit hohen Spannungsfestigkeiten und einer Dehnung bis zum Reißpunkt in der Größe von 2%.

Ein wesentlich größerer Fortschritt wird dennoch von der Entwicklung und Anwendung von Kompositwerkstoffen mit Matritze aus thermoplastischen Harzen erwartet. Diese werden im Gegensatz zu Kompositen aus Epoxydharzen, ausgezeichnet von: besserem Verhalten bei Hochtemperaturen (453 K), verminderter Beschädigungsempfindlichkeit, größerem Widerstand zu Umgebungseinflüssen, einfacheren Produktions-

- [3] **H. HARINGTON, J. REED:** Farnborough 86 - A Look into the Next Decade. Armade International 7, 1986.
- [4] **Prospektni materijal:** Use of Composite Materials in Modern Aircraft Structures. Avions Marcel Daussalt Brequet Aviation, 1984.
- [5] **T. SHORPLES:** Applications of Carbon Fibre Composites to Military Aircraft Structures. Aeronautical Journal 84, 1980.

verfahren für Strukturen (keine Temperaturkontrolle erforderlich), möglichem erneuten Formen und, was besonders wichtig ist, die Lagerung muß nicht bei niedrigen Temperaturen erfolgen. Die Entwicklung von Kompositen mit thermoplastischer Matritze führt Kompositwerkstoffe in ein vollkommen neues Gebiet ein.

Schließend ist festzustellen daß Kompositwerkstoffe auch weiterhin die perspektivsten Materiale in der zukünftigen Luftfahrttechnik bleiben werden und ihre Verwendung wird immer mehr wachsen.

LITERATUR

- [1] **GOLUBOVIĆ, D.:** Kompozitni materijali u vazduhoplovstvu, Glasnik RV i PVO 5., 1988. (36-42);
- [2] **DŽANIĆ, H.:** Tehnologija materijala za tehniku prometa, FPZ, Zagreb, 1990. (138-142);
- [3] **HARINGTON, H., REED, J.:** Farnborough 86 - A Look into the next Decade, Armade International 7 (1986);
- [4] **Prospekte :** Use of Composite Materials in Modern Aircraft Structures, Avions Marcel Daussalt Brequet Aviation 1984;
- [5] **SHORPLES, T.:** Applications of Carbon fibre Composites to Military Aircraft Structures, Aeronautical Journal 84 (1980) 834.