

TENDINȚE ACTUALE ALE *LIGHT WEIGHT DESIGN* (LWD) PENTRU AEROSTRUCTURI. INTERFERENȚE CU INDUSTRIA AUTO

Drd. ing. Gabriel DIMA¹, Prof. dr. ing. Ion BALCU²

¹NUARB Aerospace – Brașov, ²Universitatea „Transilvania” din Brașov

REZUMAT. Articolul propune o vedere integrată asupra problematicii designului structurilor ușoare (LWD – Light Weight Design), preocupare fundamentală a industriei aeronautice, care devine din ce în ce mai actuală în multe alte domenii. Realizat în urma unei experiențe directe în proiectare și project management pentru mai multe companii mari, acest articol își propune să identifice tendințe în proiectarea aerostucturilor, influența politicilor de ușurare structurală asupra industriei auto, respectiv locul cercetării și al inovației în LWD.

Cuvinte cheie: aviație, structuri ușoare, optimizare structurală, materiale compozite.

ABSTRACT. The paper proposes an integrated overview for the Light Weight Design (LWD), as fundamental constraint in aerospace industry, becoming current in many other domains. Emerged from direct experience in design and project management for few big companies, paper identifies aero-structures design trends, the lightweight policies influence over the automotive industry and innovation role in LWD.

Keywords: aviation, lightweight structures, structural optimization, composites.

1. INTRODUCERE

Problema masei minime a unui aparat de zbor a fost dintotdeauna una critică, fiind rezultatul unui compromis strâns între cerințele comerciale sau de misiune (sarcina utilă și raza de acțiune mare, implicând rezerve mari de combustibil) și cele de siguranță operațională. Dacă presiunea comercială sau cerințele militare au fost mereu crescânde, cerințele de siguranță au fost impuse de numeroase accidente în special din perioada de pionierat, sau de cele care au rămas în istoria aviației, care s-au remarcat prin numărul mare de victime și impactul mediatic deosebit.

Un producător trebuie să treacă printr-un proces de certificare pentru a convinge o autoritate aeronautică guvernamentală să emită certificatul de tip pentru o aeronavă nouă, pentru a permite vânzarea acesteia către o companie să presteze servicii de transport. Acest proces este costisitor și îndelungat, adesea o frână pentru noile tehnologii. Progresul în aviație este „condamnat” să fie unul lent.

Prin comparație, industria auto, dominată de o concurență acerbă, cu un „time to market” agresiv de scurt, cu departamente de sales care impun caietele de sarcini, dispunând de fonduri generoase pentru cercetare, de la o generație la alta de automobile progresul fiind vizibil.

Articolul este rezultat în urma unei experiențe de peste 15 de ani în proiectarea de aeronave, interferând cu industria auto, inclusiv în proiecte de

transfer de know how către producători importanți din industria auto din Franța sau Germania.

2. ABORDAREA TRADIȚIONALĂ

Conform [8] structura unui avion comercial cântărește aproximativ 25 – 30% din masa maximă la decolare. Deoarece o structură mai ușoară necesită o aripă mai ușoară, un motor mai mic, implică un consum mai mic de combustibil, se poate deduce că o reducere a masei structurii are implicații importante asupra masei maxime la decolare. Pentru o aeronavă de linie, costul estimat de combustibil pe kilogramul de structura pe o perioadă operațională de 25 de ani este de 1500 Euro [8]. Pentru o aeronavă de 200 de tone, o reducere de masă de 5%, duce la economii de 1,5 mil. Euro pentru întreaga perioadă operațională. După [1] în anii '80 economiile se ridicau la 0,5 mil. dolari, ceea ce arată o tendință de creștere.

În ceea ce privesc scaunele de pasageri, s-a calculat că reducerea masei unui scaun cu aproximativ 1,5 kg, pentru o flotă de 500 de aeronave rezultă economii de peste 10 mil. dolari anual [17].

În industria spațială problema se pune mai acut, 1 kg suplimentar de structură putând duce la creșteri de 200 kg la masa totală a unei rachete din categoria long range [2] sau la costuri de operare de 45 000 dolari [1].

Cele de mai sus duc la angajamente contractuale între companii și producători, fiind cunoscute pro-

grame în care un procent semnificativ de clienți și-au retras comenzile periclitând amortizarea costurilor de dezvoltare. Se poate concluziona că proiectantul de aeronave are misiunea de a proiecta cea mai ușoară aeronavă care să respecte cerințele de certificare. Majoritatea cărților de proiectare structurală consacră un capitol estimării masei încă din faza de proiect. În colectivele de proiectare, target-urile de masă sunt cerințe imperative, insistându-se pe un management foarte precaut al detalierii proiectului pentru a nu depăși valorile planificate [9, 10, 15].

Progresul de la o generație de aeronave la alta se face cu pași mici, unii autori afirmând că proiectarea în aviație este evolutivă și nu revoluționară [12].

Proiectanții folosesc soluții de design consacrate (structura semimonococă, panouri cu structură fagure, lonjeroane cu găuri de ușurare, panouri de înveliș frezări de ușurare) respectiv materiale (duraluminii, fibră de sticlă, fibră de carbon și local oțeluri sau titan) [7, 10].

Pe de altă parte, se calculează foarte judicios solicitările la care trebuie să reziste aeronava. Se ajunge astfel la dimensionări impuse de tipul de solicitare predominant pe fiecare segment al structurii (oboseală/ oboseală combinată cu coroziune/ forfecare/ întindere/ flambaj/ impactul cu păsări, etc.).

Structurile astfel identificate se dimensionează astfel încât coeficientul de siguranță să fie minim: 1,5–2,0, considerându-se ca orice creștere a acestuia duce la masă suplimentară. Practic se cere ca materialul să nu atingă limita de curgere la atingerea forțelor maxime posibile în exploatare.

În mod tradițional, proiectarea aeronavei se face în 2–3 iterații design / calcul după care se trece la realizarea prototipului. După demararea preseriei, proiectanții sunt implicați în programul de ușurare structurală care are de obicei 1–2 iterații, aeronavele de serie beneficiind de cel mai bun raport între masa utilă și cea a structurii (aprox. 0.65) [15]. Ușurarea structurală se focalizează pe utilizarea de repere cu pereți mai subțiri, contopirea de piese, utilizarea unui număr mai mic de elemente de asamblare, eliminarea calelor și a distanțierelor. În urma acestui proces, o reducere de 5–8% se consideră satisfăcătoare, reducerea maxim posibilă fiind de aprox. 15%.

3. TRANZIȚIA DE LA DURALUMINIU LA COMPOZIT

Ca și materiale s-a folosit începând cu anii '60 fibra de sticlă, fibra de carbon începând să fie utilizată după anii '80 [10]. Începând cu anii '80 mai multe avioane utilitare sau de business au avut structura realizată integral din compozit [11]. Motivele principale au fost proprietățile mecanice superioare

ale materialelor compozite pentru o masă mai scăzută (în special comportarea la oboseală).

Studiile realizate pe fuzelajul elicopterului BK117 și a eleronului și derivei avionului L1011 arată că un ansamblu din compozit este cu aprox. 30% mai ușor decât unul similar din duraluminii și au un număr redus de componente și elemente de asamblare, prețul de cost fiind însă mult mai ridicat [16, 11]. În [13, 1, 12] sunt date diferite elemente de structură secundară în care ecartul de reducere al masei este mai mare (10–45%). În [7] sunt indicate reduceri de masa de 10–15% pentru structuri de duraluminii și titan, 23–33% pentru combinații de aliaj de beriliu cu duraluminii și 13–31% pentru structuri compozite.

Trecerea la compozit s-a făcut lent, datorită dezavantajelor acestora față de duraluminii (comportarea în timp, comportarea la impact, dificultăților întâmpinate la reparare, dificultăți în testarea non-destructivă, lipsa de informații asupra proprietăților mecanice a combinațiilor de materiale compozite) dar în special datorită costurilor fibrelor și a celor de fabricație foarte ridicate [11]. Reducerea numărului de componente a fost un factor care a impulsat tranziția la compozite prin reducerea costurilor indirecte de producție și dezvoltare.

Dacă inițial compozitul s-a folosit exclusiv la carenaje – piese nestructurale –, care aveau geometrie complexă impusă de cerințele aerodinamice, acestea au făcut un progres lent începând cu suprafețele de comandă, ușile și trapele și abia apoi fuzelajul și aripa pentru aeronavele mici. Excepție fac palele de elicopter care încă din anii '60 se fabrică din roving, fibră de sticlă și structură fagure [12].

Compozitul încă nu a acaparat total structura aeronavelor de mari dimensiuni, procentul nedepășind 50% din masa acestora. Se păstrează din metal toate reperele de jonctiune (ferurile), piesele din lanțul de comenzi de zbor, cadrele de jonctiune, elementele de asamblare, zonele de protecție termică sau cele de uzură. Trebuie menționat că, nu în toate situațiile, structura compozită este cea mai ușoară, un exemplu fiind ilustrat în cazul unui spoiler de la un avion de transport la care, în urma unui studiu de soluții, s-au obținut variante din tablă nituită sau sudată cu 6% respectiv 13% mai ușoare [6].

Din discuțiile avute cu specialiști din colectivele de designeri ai mai multor producători mari de avioane comerciale se pare că decizia de a trece la elemente de structură primară din compozit a fost luată la presiunea managementului, tehnicienii considerând că ecartul între ceea ce se știe despre compozit și cunoștințele necesare abordării structurilor de mari dimensiuni este mult prea mare.

Feedback-ul din exploatarea A380 nu este unul încurajator în acest sens, comportarea structurii primare compozite la oboseală cerând multe update-uri.

4. TENDINȚE ÎN AVIAȚIE

La aeronavele moderne se constată următoarele tendințe:

- utilizarea de panouri sandwich cu spumă în loc de honeycomb (în special la carenaje);
- cadre uzinate în loc de cadre nituite (reducerea numărului de îmbinări, de piese și de nituri);
- utilizarea sudurii în loc de nituire (pentru lisele panourilor de fuzelaj, în zonele în care nu sunt solicitate la oboseală și care nu sunt expuse la coroziune);
- înlocuirea la scară largă a elementelor de asamblare din oțel cu cele din titan (chiar dacă titanul este de 2 – 3 ori mai scump decât oțelul);
- înlocuirea reperelor de oțel sau a celor foarte solicitate din dural cu cele din titan;
- realizarea de piese „laminat” din compozit pentru lonjeroane, profile etc.;
- realizare de piese termoformate din compozit (asemănătoare formării la cald pentru piesele ambutisate adânci) pentru piese structurale sau suporturi (bride, colțare, coaste, piese de închidere).
- migrarea spre compozit la structura primară la aeronavele mari (Boeing B787, Airbus A350).

Studii făcute pe un număr de 65 de aeronave de pasageri prin compararea eficienței structurale (prin prisma masei maxime la decolare, numărul de pasageri, raza de acțiune și viteza de croazieră) arată următoarele [5]:

- în timp se observă o utilizare tot mai judicioasă a masei structurale;
- aeronavele de mari dimensiuni sunt cele mai eficiente;
- topul este format din A350, B747-8I, A380 și B777;
- tendința generală a ultimilor 50 de ani arată în continuare posibilitatea unor îmbunătățiri la un ritm mai lent decât cel din anii ‘60–’80, cu atingerea unei limite în jurul anilor 2030–2040;
- tendința celor mai eficiente aeronave pentru ultimii ‘50 de ani indică îmbunătățiri ale eficienței de aproximativ 15% pentru 2030 față de 2010.

Nu putem ignora o tendință de a elimina pilotul în aeronavele unde acest lucru este posibil (aeronavele cu sarcină utilă mică) sau necesar (în special aeronavele militare, cele pentru misiuni lungi etc.) lăsând loc dronelor. Acest trend a devenit unul deosebit de interesant, de la departamentele de apărare până la amatori, numărul de modele noi fiind unul pe cat de mare, pe atât de divers.

Trebuie menționat și că, datorită împingerii la extrem a politicilor LWD, în anumite colective de proiectare, inginerii de calcule mai conservatori consideră că aeronavele nu mai sunt la fel de sigure ca pe vremuri; acest fapt nu trebuie să ne îngrijoreze

atât timp cât procesul de certificare demonstrează pas cu pas că cerințele de certificare sunt îndeplinite.

5. UTILIZAREA OPTIMIZĂRII STRUCTURALE

Un designer proiectează cel mai adesea în baza experienței, designul fiind adesea expresia simplității tehnologice, a costurilor de fabricație minime și a cunoștințelor legate de coroziune și oboseală provenite din exploatare. În ceea ce privește forma pieselor, acestea sunt generate funcție de solicitările predominante, având idealul de forma cilindru gol pentru torsiune și flambaj, profilul I pentru încovoiere, cutia de rezistență (torsion box sau caisson) pentru forțele combinate. De asemenea, pentru structuri de mari dimensiuni grinda cu zăbrele, se consideră a fi cea mai economică. Proporțiile acesteia, împărțirea pe celule de forma triunghiulară reprezintă tipare care sunt consacrate.

În aviație, structura predominantă este semimonococă, unde s-a stabilizat soluția cu cadre (paralele cu secțiunea transversală) și lise (paralele cu generatoarea suprafeței aerodinamice). Aranjamentul structural, pasul de așezare al cadrelor și lisele, grosimile de material se aleg adesea din experiență, calculele având rolul doar de verificare a capacității portante a structurii.

Cazurile de calcul sunt în număr foarte mare (de ordinul sutelor), încărcările acestora fiind o combinație de forțe și momente, la care se adaugă presiuni în cazul aeronavelor presurizate. Designer-ul este pus în postura de a proiecta o structură care trebuie să se comporte bine într-un număr foarte mare de combinații de încărcări, ceea ce face aproape imposibilă o abordare tradițională.

În ultimii ani au început să se folosească tehnici de optimizare structurală care permit realizarea de piese care rezistă la aceleași solicitări în condițiile unei mase mai mici.

Programele software de optimizare structurală oferă pe un model simplificat al pieselor traseele principale de eforturi, indicând proiectantului calitativ unde este nevoie de rigidizări (ambutisate pentru optimizarea topografică) respectiv îngroșări de material (pentru optimizarea topologică). Într-o iterație ulterioară de optimizare se pot obține valori recomandate pentru grosimile de material, unealtă foarte utilă pentru dimensionare.

Dimensiunile finale se pot stabili într-un număr restrâns de iterații (două – trei) de design/ verificare FEA prin ajustarea finală a grosimilor de pereți sau a razelor de racordare unde tensiunile depășesc valorile admisibile.

Bombardier raportează, într-o comparație între design-ul clasic și cel utilizând programe de optimizare

structurală, pentru o nervură de aripă, reduceri de 10% [3], iar în [4], o reducere de 19% pentru brațul ușii pasageri de la Fairchild Dornier 728.

Airbus declara în 2006 că, utilizând softuri pentru optimizarea topologică, a reușit reduceri de masă între 20% pentru A350 și 40% pentru A380 [14].

Mai mult decât atât, optimizarea topologică vine cu concluzii foarte interesante care demolează superioritatea structurii semimonococă în fața grinzii cu zăbrele, o structură hibridă semimonococă, cu un număr mai mic de cadre dotat cu contrafise interioare și cu diafragme care să preia forfecarea, prezentând tensiuni mai mici pentru o masă structurală redusă [14].

6. TRANSFERUL DE KNOW HOW CĂTRE AUTOMOTIVE

La prima vedere, subiectul LWD poate fi abordat astfel:

- se centralizează know how din aviație;
- se centralizează know how din automotive;
- se compară cele două rezultate anterioare;
- se identifică ideile din aviație neexploatare încă în automotive;
- se importă în automotive ideile de mai sus.

În realitate, însă lucrurile stau cu totul altfel:

– este aproape imposibil de cuantificat experiența colectivă din aerospace, datorită numărului mare de producători dar și al know how de firmă care încă este în multe cazuri confidențial

– este greu de urmărit stadiul actual al cunoștințelor la care a ajuns industria auto datorită dinamismului sau și a cercetărilor recente aflate în stadii avansate

Metodele de ușurare a structurii nu sunt identice datorită:

– caietelor de sarcini diferite ale celor două mijloace de transport:

- aero – sarcini de evoluție/aterizare/ oboseală/ rafală;
- auto – sarcini de crash;

– configurațiilor diferite ale structurilor celor două mijloace de transport:

- aero – fuzelaj, care preia majoritatea sarcinilor prin înveliș;
- auto – structură cu deschideri mari datorate ușilor și suprafețelor vitrate se comportă în special ca o structură de grinzi;

– filozofiei de comportare la sarcini:

- aero – structura este calculată în ipoteza micilor deformații, baza fiind comportarea la flambaj și oboseală (un avion de linie zboară în medie 100 mil. km în perioada de exploatare);

- auto – structura este calculată la crash, importanța fiind înmagazinarea energiei cinetice
- principiilor de îmbunătățire a siguranței:
 - aero – sisteme anticolidiune, procedurare, check list, training
 - auto – realizarea unor structuri care să compenseze eroarea umană.

Tehnologiile din cele două industrii diferă radical datorită seriilor de producție:

– aero – serii mici, unde nu se justifică cheltuieli mari cu SDV;

– auto – serii mari, unde accentul se pune pe productivitate și pe viteza de reacție la cererea pieței.

Astfel, tehnologiile din aviație trebuie să treacă printr-un program de calibrare la cadență de producție cerută de industria auto, ceea ce de multe ori presupune programe de cercetare tehnologică dedicate.

Cu toate cele de mai sus, putem afirma că în timp a existat un transfer de know how din aviație către automotive, în special în ceea ce privește materialele utilizate, dar și tehnicile de calcul utilizând metoda elementului finit.

Ultima perioadă se remarcă printr-un interes crescând pentru transferul de tehnologie legată de materialele compozite, aviația având un avans semnificativ în acest sens.

7. TRANSFERUL DE KNOW HOW DINSPRE AUTOMOTIVE

Trebuie să menționăm că transferul de know how nu este unidirecțional. Ca și evoluție istorică și automobilele au plecat de la ideea unei mase minime, materiale ca lemnul fiind prezente în toate modelele primare. În timp, structura acestora a cunoscut altă evoluție, plecându-se de la premiza că o mașină mai grea este mai stabilă și mai sigură în cazul unui crash. Ultimii ani se remarcă printr-o activitate acerbă de căutare a LWD, ca o continuare firească a reducerii consumului de combustibil.

Pe linie de LWD nu putem face afirmații specifice, totuși ca domenii complementare, putem afirma că în ceea ce privesc ambutișările adânci (termoplastice forming), știința materialelor sau metodele de simulare (calcul cu element finit, analiza dinamică etc.) și optimizarea topologică, industria auto este partener cu aviația la capitolul noutăți.

De asemenea, infuzia de specialiști din automotive din ultimii ani își spune cuvântul, în colectivele de designeri sau de ingineri de calcul aceștia venind cu un suflu nou.

Tehnologiile de realizare a structurilor din fibră de carbon sunt încă foarte scumpe iar în aviație, prevalând „design for safety”, acest lucru este acceptabil. Industria auto fiind dominată de „design

for cost” face eforturi de a aduce compozitul la costuri mici în condițiile unei producții de serie mare.

8. LOCUL INOVAȚIEI ÎN LWD

Printre inovațiile cele mai semnificative pentru LWD enumerăm:

- înlocuirea fuzelajului tip grindă cu zăbrele carenată cu semimonococa (fundamentală pentru structurile presurizate);
- găurile de ușurare cu marginea ambutisată pentru inima lonjeroanelor;
- utilizarea structurii tip cheson pentru aripă și ampenaje;
- uzinarea chimică pentru reducerea locală a grosimii de material a învelișurilor;
- panourile sandwich cu structură fagure (rigiditate mare la o masă mică, comportare bună la vibrații și flutter) [13];
- obținerea unei tehnologii care să permită utilizarea la scară largă a fibrei de carbon.

Inovația are ca motor principal mediul concurențial, care între marii producători de aviație este destul de redus doar la câțiva factori principali. Există totuși o presiune destul de mare din partea operatorilor:

- consumul minim pentru o masă utilă maximă (în special pentru aviația civilă);
- reducerea costurilor de exploatare și mentenanță (în special pentru aviația militară).

Dacă ceea ce nu se poate rezolva în proiectare se face prin cercetare, ce nu se poate obține prin cercetare se poate obține prin inovație. Doar inovația poate revoluționa un mod de gândire și valabilitatea acestui concept s-a demonstrat în timp.

În ultimii ani, top managementul marilor companii a înțeles acest lucru și deja inovația dublată de cercetare are parte de bugete consistente în unele firme multinaționale. Ideile inovative urmează proceduri în care acestea sunt evaluate, testate și apoi implementate.

Ca și concept de marketing, acest lucru se mediatizează în foarte multe cazuri însă fără suport. Adesea inovația e doar un slogan, o chestiune de imagine. În cele ce urmează sunt prezentate câteva impedimente ale stimulării și implementării inovațiilor:

- proiectanții nu au timp alocat pentru inovații; aceștia nu au libertatea de gândire datorită automatismelor care le-au fost create în timp;
- o firmă de proiectare nu are (sau nu respectă) procedurile care să permită identificarea și tratarea corectă a unei idei inovative;
- mediul industrial are o inerție mare și este foarte greu receptiv la nou;
- procesul de brevetare este foarte lung, birocratic și costisitor;

- o inovație presupune riscuri financiare și pierdere de timp în caz de nereușită, ceea ce face ca proiect managerii să prefere soluții clasice;
- testarea și implementarea unei inovații necesită resurse mari.

Se formează așadar un cerc vicios care ține multe companii prizoniere ale trecutului. În acest sens propunerile autorilor sunt:

- crearea de către management a unui mediu favorabil inovării și alocarea de resurse în acest sens; prevederea de clauze avantajoase în contractele de muncă ale angajaților (de obicei acestea prevăd că pentru o inovație realizată în perioada de program angajatul nu are nici un drept asupra acesteia – un puternic factor inhibitor);
- implicarea angajaților tineri în procesul creativ inovativ, celor experimentați revenindu-le sarcina evaluării și industrializării;
- implicarea tuturor angajaților în procesul inovativ, nu doar al proiectanților;
- mediatizarea provocărilor tehnice în afara companiei și încurajarea persoanelor din exteriorul firmei să participe la găsirea soluțiilor inovative (ex: mediul universitar);
- crearea de locuri de practică pentru studenți și implicarea acestora în optimizarea proceselor interne.

Unele din propunerile de mai sus au fost testate cu succes de autori. Considerăm că fundamentală nu este doar flexibilitatea companiilor de a apela la cercetare și inovare ci și capacitatea lor de a-și îmbunătăți procesele interne și produsele prin raportarea acestora la noile cunoștințe dobândite și implementarea lor în cadrul întregii companii.

9. CONCLUZII

Cursa ușurării structurale (weight saving) devine tot mai accentuată chiar dacă tendințele arată că ne apropiem de un prag în ceea ce privește maximul eficienței.

Prin comparație cu tranziția lemn-metal care a durat 20 de ani, tranziția metal-compozit a început în anii '60 și încă nu s-a încheiat. Compozitul se pare că nu va înlocui complet metalul.

Programele de optimizare structurală au depășit faza incipientă chiar dacă funcționează cu acuratețe mare doar pe repere și nu la nivel de ansamblu, necesitând încă iterații stress/ design.

LWD, deși presupune costuri ridicate de dezvoltare duce la economii importante în costurile de operare.

După ce ani la rând, aviația a condus în domeniul masei minime, industria auto a făcut pași semnificativi în ultimii ani, în special în zona metodelor de simulare. Pentru structurile compozite, putem afirma că în aviație know how s-a maturizat, așteptându-ne la o evoluție lipsită de realizări spectaculoase.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Backer A., Dutton S., Kelly D., *Composite Materials for Aircraft Structures*, American Institute of Astronautics and Aeronautics, Inc., 2004.
- [2] Bruhn E. F., *Analysis and design of flight vehicle structures*, Tri-State Offset Company, 1973.
- [3] Buchanan S., *Development of a Wingbox Rib for a Passenger Jet Aircraft using Design Optimization and Constrained to Traditional Design and Manufacture Requirements*, CAE Technology Conference/ Altair Engineering, 2007.
- [4] Cervellera P., *Optimising Driving Design Process: Practical Experience on Structural Components*, Proc. 14th Convegno Nazionale ADM/AIAS, Bari, 2004.
- [5] Dima G., Balcu I., *Considerații privind proiectarea pentru masa minimă a aerostururilor*, Recent, Vol 13, 2012.
- [6] Dima G., Balcu I., Tesula I., *Composite vs. welded secondary structures in aerospace lightweight design*, COMAT Proceedings, Brasov, 2012.
- [7] Hertel H., Leichtbau., *Bauelemente, Bemessungen und Konstruktionen von Flugzeugen und anderen Leichtbauwerken*, Springer, New York, 1980.
- [8] Kaufmann M., *Cost/ Weight Optimisation of Aircraft Structures*, KTH School of Engineering Sciences, Stockholm, 2008.
- [9] Nita M. M., Moraru Fl., V., Patraulea R. N., *Avioane și rachete. Concepte de proiectare*, Editura militară, București, 1985.
- [10] Niu M. C. Y., *Airframe Structural Design*, Hong Kong Conlimited Press, 1988.
- [11] Niu M. C. Y., *Composite Airframe Structures*, Hong Kong Conlimited Press, 1992.
- [12] Paul D., Kelly L., Venkayya V., *Evolution of US Military Aircraft Technology*, Journal of Aircraft, Vol 39, 2002.
- [13] Perry D. J., Azar J.J., *Aircraft Structures*, McGraw-Hill, 1982.
- [14] Schuhmacher G., *Optimising Aircraft Structures*, Concept to Reality/ Altair Engineering, 2006.
- [15] Sheynin V. M., Kozlovskiy V. I., *Problems of designing passenger aircraft*, Mashinostroyenie Press, Moscova, 1972.
- [16] Udroi R., *Materiale compozite – tehnologii și aplicații în aviație*, Universitatea „Transilvania” Brasov, 2006.
- [17] * * *, *What’s a few pounds here and there?*, International Conference Innovative Aircraft Seating Proceedings, Hamburg, 2011.

Despre autori

Drd. ing. **Gabriel DIMA**
 NUARB Aerospace – Brașov

Absolvent a Universității „Transilvania” din Brașov. Din anul 2010, Director tehnic in cadrul Companiei NUARB Aerospace din Brașov, cu competențe în utilizarea programelor FEM de calcul și simulare precum și specializări multiple în cadrul CAD.

Prof. dr. ing. **Ion BALCU**
 Universitatea „Transilvania” din Brașov

A absolvit Facultatea de Tehnologia Construcțiilor de Mașini in anul 1974; este dr. ing. din anul 1988. Este profesor universitar in cadrul Facultății de Inginerie Mecanică, predă cursuri de Rezistența materialelor și Vibrații. Este membru al societăților: SRMTA; ARTENS; AOS. Conducător de doctorat în specializarea Inginerie mecanică.