

V. Évfolyam 3. szám - 2010. szeptember

Farkas Csaba

csaba.farkas@corvus-aircraft.hu

Óvári Gyula

ovari.gyula@zmne.hu

A MAGYARORSZÁGI REPÜLŐGÉPGYÁRTÁS ÚJJÁSZÜLETÉSE – AZ INNOVATÍV TERVEZÉS ÉS MEGVALÓSÍTÁS ESZKÖZEI

Absztrakt

Kellő előkészítés, megfelelő innovatív tervezés és kitartás még a magyar viszonyok között is lehetővé tehetik, hogy világszínvonalú könnyű repülőgépet állítsunk elő.

Sufficient preparation, innovative instinct and endurance allow, even during the Hungarian circumstances, to manufacture a world's state-of-the art, light, industrially produced aircraft.

Kulcsszavak: repülőgép, ipar ~ aircraft, industry

Bevezetés – a Corvus Aircraft Kft-ről röviden

A Corvus Aircraft Kft. megalakulásakor céljául tűzte ki, egy merőben új szerkezeti felépítésű, korszerű saját tervezésű repülőgépek gyártását, szakítva a hagyományos félháj sárkány építési elvvel, és kompozit repülőgépeket kínálni az ultrakönnnyű és túra-, kiképző repülőgépek piacán. Az első ilyen légi járművünk a Corvus Corone MK I típus volt, amit 2005-ben mutattunk be egy németországi kiállításon.

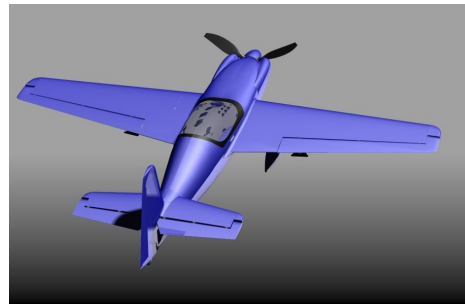
Ennek sorozatgyártása 2006 elejétől indult és ez évben egy újabb típussal jelent meg a cég a Corone MK II ultrakönnnyű változattal, amiből később a Corvus CA-21 Phantom (1. ábra) repülőgépet fejlesztettük ki. A Phantom európai export változatát a legmagasabb tervezői szervezet, a német DULV, LTF-UL építési előírásai szerint alakítottuk ki, ami 2008. februárban megkapta a német típusengedélyt. Ennek az amerikai export változata a Corvus Falcon. A Phantom és Falcon modellek kétszemélyes, kiképző-, gyakorló iskolagépek, de közkedvelten alkalmazzák sport és túra célokra is. Teherhordó sárkány szerkezete, teljes egészben prepreg technológiával kialakított kompozit héjszerkezet, bizonyos nem teherviselő és másodlagos teherviselő részek alumínium és hegesztett acél elemekből épülnek fel. A világ

különböző pontjain közel 30 repülőgépünk repül szélsőséges időjárási körülmények között, így Dél-Afrikában, Amerikai Egyesült Államokban, Egyesült Arab Emírátságokban, Thaiföldön, Németországban, Olaszországban, Spanyolországban és természetesen Magyarországon.

A Corvus Aircraft Kft. a legmodernebb CAE (*Computer Aided Engineering* - számítógéppel támogatott mérnöki tevékenység) alapú tervező rendszereket vezette be és integrálta a gyártás egyes munkafolyamataiba. Mindezek eredményeként konstrukcióink fejlesztési ideje és költségei nagymértékben csökkentek. Részben a magas fokú CAE háttér infrastruktúrájának köszönhetően vállaltuk el 2008 nyarán, Besenyei Péter, a Red Bull Air Race versenypilótája felkérését, egy korszerű, merőben új tervezői megfontolásokat igénylő, speciális „*air race*” repülőgép kifejlesztésére (2. ábra).



1. ábra Corvus CA-21 Phantom



2. ábra Corvus CA-41 Racer

Az elhatározást tették követték, a Corvus CA-41 Racer fejlesztési munkálatai lezárultak és reményeink szerint ezen évadban a Windsori, de legkésőbb a Budapesti futamon Besenyei Péter rajthoz áll új repülőgépével, aminek fő teherviselő szerkezeti eleme a törzsrács, 25CrMo4 nemesíthető acélból készített hegesztett szerkezet, az irányfelületek, a szárny és a borítás kompozit szerkezet.

Korszerű repülőgép tervezés, avagy a CAE előnyei

A fejlett ipari nagyhatalmak repülőgépgyárai körülbelül 30 évvel ezelőtt kezdték el alkalmazni és rendszerükbe integrálni a számítógépes tervezőrendszereket. Voltak olyan kutatóintézetek, melyek külön divíziókat hoztak létre több száz rendszerfejlesztőt foglalkoztatva, hogy a saját maguk igényeinek megfelelően fejlesszék ki tervezőrendszereiket. A NASA például az 1960-as évek közepétől kezdte el fejlesztését a rajzoló-tervező rendszernek (CAD), majd pár év múltán már az FEM (Finite Element Method - véges elem módszer) alapjait fektette le, melynek neve NASTRAN (NASA Structural Analysis) lett.

A számítógéppel támogatott tervezés, avagy CAD (Computer Aided Design) forradalma világviszonylatban a '90-es évek elején vette kezdetét és napjainkig - közel 15 év alatt - az ipar robbanásszerű forradalmi változása kísérte végig, és fejlődött a addig, hogy lehetővé tette egy termék tervezését, elemzését, gyártás helyességének-használhatóságának ellenőrzését és élettartam-bebecslését, annak valós fizikai megléte nélkül. Összefoglaló néven ezt nevezzük CAE-nak (Computer Aided Engineering), melynek magyar megfelelője számítógéppel támogatott mérnöki tevékenység. Mindez egy olyan átfogó komplex tervezési eljárás gyűjtőneve, ami olyan egymásra épülve magában foglalja az előzetes koncepció

kimunkálásától, a részletes külső és belső tervezésen keresztül a gyártás folyamata és technológiája kimunkálásának minden elemét, sőt a virtuálisan kész termékkel terhelési és/vagy egyéb működési modell kísérletek végrehajtását is. Az 1. számú táblázat egy ilyen CAE eljárás lehetőségeit, (felülről lefelé haladva) logikai folyamatát mutatja be.

Napjaink mérnöke már más tervezési filozófiával fejleszti az eszközöket, mint elődei tették azt 30-40 éve. A XXI. századi tervezés alapvető mozgatója a költséghatékonyság. A repülés viszonylag magas költségei és az elvárt magas biztonság a világ vezető ipari ágazatává emelte a repülőgépgyártást. A CAE alkalmazások nagy részét is a repülőipar és a hadiipar fejlesztette önmagának, természetesen ma már egyéb ipari szegmenseket is átfog. Repülőipari alkalmazását tekintve a CAE egyik előnye, hogy a prototípus legyártását megelőzően a fő szerkezeti és/vagy gyártási elemeken, de akár az egész repülőgépen is elvégezhetjük a valóság modellezését a virtuális térben. Ezzel pénz, idő és újabb módosított prototípusok legyártása takarítható meg. A virtuális szélcsatorna ellenőrzéseket és szilárdsági vizsgálatokat követően igen jó közelítéssel kaphatóak azon eredmények, melyeket a valós életben megbízhatóan hasznosíthatóak. A virtuális vizsgálatok újrakezdése nem emészt fel plusz járulékos többletköltségeket. További előnye, a parametrikus rendszerekkel integrált szimulációk alkalmazásának, hogy segítségükkel könnyen és gyorsan elemezhetőek a különböző modifikációjú virtuális prototípusok, melyekkel még azt is megbízhatóan prognosztizálható, hogy egyes szerkezeti elemi mikor és melyik keresztmetszetében törnek el, mennek tönkre. Amennyiben a megfelelő integrált CAE rendszer céltudatosan kerül alkalmazásra egy repülőgép fejlesztő üzemben, akkor a prototípus legyártása, földi- és légi tesztjeit megelőzően a múltbéli tapasztalatok alapján, közel 90% pontossággal előre jelezhető olyan aerodinamikai viselkedések és jellemzők, melyek évekkal ezelőtt csak a valós tesztek alkalmával voltak mérhetőek. Ilyen például az emelkedőképesség, a fordulósugár, a különböző külső kormányoszlopok és/vagy szárnymechanizációs eszközök hatásosság, a terhelés hatására jelentkező rugalmas alakváltozások, lengésképek vagy például a frekvenciáteljesítő és/vagy funkcionális elemek maximális élettartamra számolt túlélési rátája, stb. A technika fejlődése nem áll meg és a jövőbeli kutatások célja a virtuális modell-kísérletek megbízhatóságának, valóságosságának és komplexitásának további javítása. A CAE rendszerek további lényeges eleme az alkatrészek fizikai viselkedésének modellezésére szolgáló ún. analízis eszközök, melyek egy részét az 1. sz. táblázat harmadik sora foglalja össze.

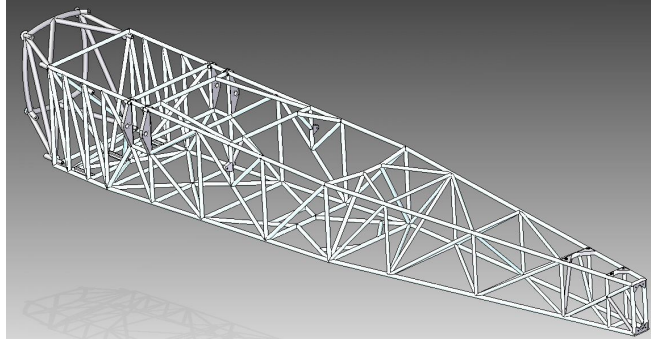
PLM = PRODUCT LIFE MANAGEMENT (ÉLETCIKLUS KEZELÉS ÉS KÖVETÉS)	CAE		
	Mérnöki munka fázis	CAE program részegység és megoldás	Magyar megfelelő
	Geometria és alkatrész modellezés	CAD 2D / 3D PART	Számítógéppel támogatott tervezés 2÷3 dimenziós test modellezés
	Alkatrész szerelési környezet modellezés	CAD 2D / 3D ASSEMBLY	Számítógéppel támogatott tervezés 2÷3 dimenziós összeállítási környezet modellezés
	Alkatrész és összeállítási környezet fizikai viselkedésének elemzése	FEA, FEM, DYNAMIC SIMULATION, MOTION SIMULATION, FLOW AND THERMAL SIMULATION, ELECTRIC SIMULATION	Végeselem analízis és vizsgálat, dinamikai, mozgástani, áramlás-tani, hőtani, elektromos viselkedések szimulációja és elemzése
	Alkatrész gyártás előkészítése, gyártási szimulációja	CAM, CAM-TOOL SIMULATION	Számítógéppel támogatott gyártás és gyártás szimuláció
	Elemzés utáni újra tervezés és újra ellenőrzés	CAD 3D PARAMETRIC SYSTEMS, PDM	Számítógéppel támogatott tervezés 3 dimenziós parametrikus környezet, revíziókövetés
	Kisegítő alkalmazások	CAD PHOTORELASTIC, SHEET METAL DESIGN, MOLD DESIGN, PIPING&CABLE DESIGN	Valóskörnyezet fotórealisztikus megjelenítése, lemez forma, öntőforma, kábelezés
Gyártási és műhelyrajz automatikus generálás	CAD DRAWINGS	Számítógéppel támogatott gyártás kész műszaki rajzok	

Innovatív tervezés és gyártás – Corvus Racer 540 Red Bull Air Race Besenyei Péter műrepülő világbajnok új repülőgépeinek fejlesztése

Hosszú évek során összegyűlt tervezői, gyártói és üzemeltetési tapasztalatok birtokában mondtunk igent 2008 augusztusában egy új, nagyteljesítményű, kimagasló terhelhetőségű és manőverező-képességű repülőgép kifejlesztésére. A Corvus Aircraft Kft 1,5 éves fejlesztői munkájának eredménye, hogy terveink szerint a 2010-es Red Bull Air Race versenysorozat második felétől Besenyei Péter már a Corvus Racer 540 repülőgéppel állhat rajthoz.

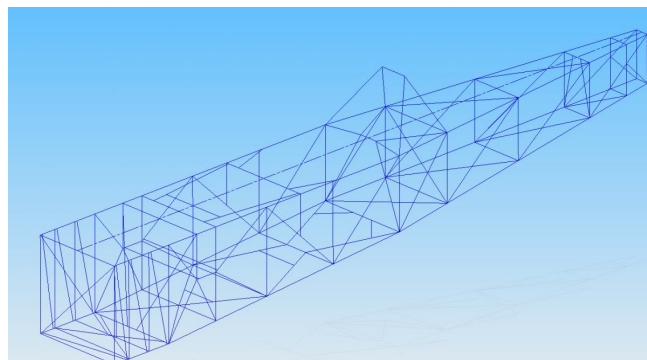
A hegesztett törzsrács tervezési és gyártási folyamata

A repülőgép fő szerkezeti elemének Solid Edge ST rendszerben készített CAD modellje a 3. ábrán látható. A modellezést a tartószerkezet alkalmazás segítségével végeztük el.



3. ábra Törzsrács Solid Edgeben készült modellje

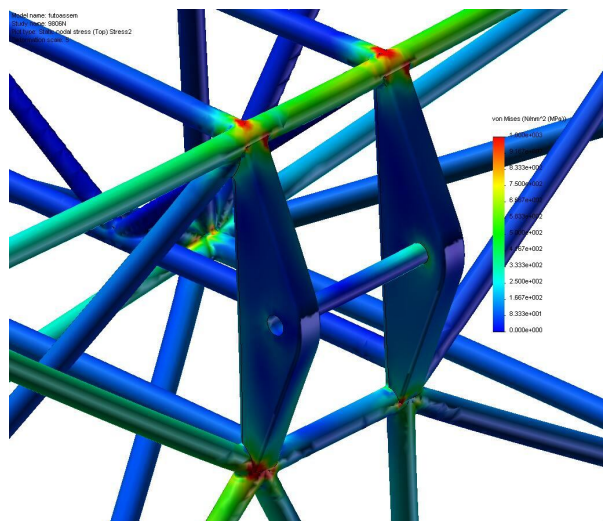
A törzsrács többszörösen összetett, és szilárdsági szempontból az egyik legkritikusabb teherviselő elem. A csatlakozó csomópontjaiban ébredő a koncentrált nyíróerők meglehetősen nagyok, például a szárny bekötési pontban, üzemi terhelés esetén $F = 41.000 \text{ N}$ nyíróerő lép fel oldalanként. A törzsrácshoz kapcsolódik minden további sárkányelem (szárny, vezérsíkok, futóművek, motor) és veszi fel az ezekről átadódó terheléseket is, de ebben helyeztük el az üzemanyagrendszert, a műszereket, a mozgató rudazatokat és a pilótát is. E váz szerkezet alapja a 3D „drót modell” vázlata (4. ábra).



4. ábra A törzs tervezésének alap drótváz modellje

Ennek megrajzolását, valamint a csőszelvények adatainak megadását követően - figyelve a csatlakozási csomópontok gyártási követelményeire - alakult ki a hegesztett váz. Az egyes csövek illesztése során tapasztalható a Solid Edge ST rendszer „intelligens képessége” azáltal, hogy, folyamatosan figyel a már meglévő és újonnan beépítésre kerülő elemek aktuális helyzetére. A rács gyártása során először az alsó és felső keretet hegesztettük össze sablonban, majd a függőleges elemek bekötése következett, végül a kereszt és diagonál merevítő elemekre került sor. A tartószerkezet tervezése is ebben a sorrendben történt, az egyes elemeket ennek megfelelően lépésről-lépésre illesztettük rá a 3D drótváz modellre. A modellezés befejeztével a gyártáshoz vágási lista és darabjegyzék, valamint minden elemről az önálló alkatrész modell állt rendelkezésre és. A tervezőrendszerbe az alkalmazott csövek, 25CrMo4 anyagminőségét definiálva már a fejlesztés legelején ismertté vált a rács szerkezet tömege. Ennek tervezése úgynevezett párhuzamos vagy un. szimultán eljárással történt, ami azt eredményezte, hogy járulékosan a szilárdsági méretezés, ellenőrzés is megtörtént. A Solid Edge ST alkalmazási rugalmasságát kihasználva, a numerikus szilárdsági számítások több rács elrendezés is elkészülhetett. Ezeket, külön-külön, egymástól független FEA alkalmazásokban (Cosmos, Femap) elemeztük.

A tervezés során több szimulációs eljárást alkalmaztunk azért, hogy az egyes szerkezeti elemek áramlástani és szilárdsági viselkedését modellezhessük. Az egyik legérdekesebb elemzést a hegesztett törzs rácsszerkezetén és a motortartó bakon hajtottuk végre. Szimuláltuk a szárnyakon, vezérsíkokon fellépő légerők keltette, a törzs bekötési és csatlakozási csomópontjaiban átadódó nyíróerők hatását két állapotra, a „*limit load condition*”-re, azaz repüléskor a maximális statikus üzemi terhelésre, valamint az „*ultimate load condition*”-re, a törő határterhelésre. Utóbbi - a szerkezetet minősítésekor is szükséges bevizsgálás részeként – törést nem, de maradó deformációt megenged. A limit terhelések vizsgálatokor nem talákoztunk olyan kiterjedt területtel vagy varrat-átmenettel, ahol az ébredő feszültség a folyáshatár értékét meghaladta volna, de a törő terheléskor egyes elemi csomópontokban, már néhol lokálisan kimutatható volt a szakítószilárdság értéke, de kiterjedt zónát ebből sem észleltünk sehol. Számunkra a legfontosabb a kritikus csőcsatlakozások és a legjobban terhelt csövek meghatározása volt. Végig figyelembe vettük azt a tényt, hogy a szerkezet rögzítettsége következtében járulékos feszültségek is jelentkeztek az egyes elemeken, ezért döntöttünk úgy, hogy a feszültségek elemzésekor a bennük fellépő átlagos állapotot (*average stress*) tekintjük a méretezés és ellenőrzés kiinduló alapjának. Az 5. ábra példaként a szárny-törzs csatlakozás, vagyis a főtartó bekötés feszültség eloszlását szemlélteti.



5. ábra Feszültség eloszlás a főtartó bekötés körül

A hegesztett törzsrács gyártás-technológiai kidolgozása

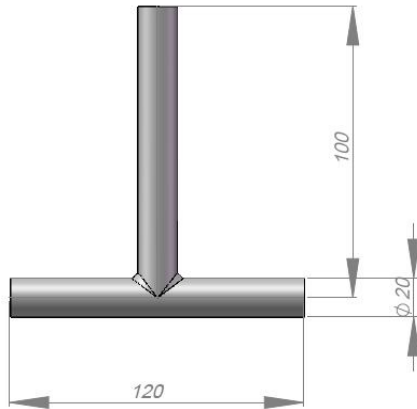
A repülőgép rendeltetéséből adódóan a vázszerkezet igen nagy, váltakozó (túl-) terhelésnek van kitéve üzemi körülmények között, így a bevizsgálás során a 18-szoros szilárdsági túlterhelhetőséget kellett igazolni kellett. A hegesztett rács alap-anyagának ebből adódóan a repülőiparban elterjedt nemesített acélt 25CrMo4 csövet választottunk. Ismert, hogy ezek hegesztése

legtöbb esetben nem egyszerű feladat, csak gondos előzetes és utólagos intézkedésekkel hajtható végre. Ilyen acélok hegesztése során leggyakrabban a hőhatásövezetben hidegrepedés érzékenységgel kell számolni, ami keletkezésének oka összetett, megjelenését rendszerint sok tényező együttes hatása befolyásolja. Nemesített acélok esetében a hegesztéskor keletkező nagy keménységű szövetelemek, (pl. martenzit vagy bainit) kis alakváltozó képességű szövetszerkezetet eredményeznek, ami a hidegrepedés kialakulását elősegíti.

A Tennant GmhH-tól beszerzett csövek kémiai összetétele a következő: C = 0,27%, Mn = 0,71%, Si = 0,27%, S = 0,026%, P = 0,012%, Cr = 1,06%, Mo = 0,24%, Ni = 0,095%

Ebből adódóan a karbonegyenérték:

$$K = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} = 0,27 + 0,118 + 0,212 + 0,06 + 0,0063 = 0,66\%$$



6. ábra A vizsgált próbatest méretei

Mivel a karbonegyenérték magas értékűre adódott, már ebből látható volt, hogy előmelegítés szükséges a hegesztést megelőzően. A megfelelő kötés vizsgálatához próbatesteket készítettünk és különféle technológiai paraméterek változtatásával, (pl. előmelegítés, utóhőkezelés, áram-erősség) igyekeztünk a legmegfelelőbb eljárást kidolgozni. A próbatestek 20 x 1,0 mm-s csövekből a 7. ábrának megfelelően hegesztett T-idomok voltak.

A vizsgálatok azt mutatták, hogy előmelegítés, utólagos hőkezelés és impulzus technika alkalmazása képes a legstabilabb kötetést biztosítani. Így a hőhatásövezet képlékenysége javul, az alakváltozó képessége nő. További előny, hogy az esetleges varrathibákból kiinduló repedések terjedését az anyag képlékeny alakváltozással, nagy valószínűséggel megakadályozza.

A valóság problémája

A valóságban a kemencében történő hőkezelést nem tudtuk elvégezni fizikai korlátok miatt, így minden varratot lokálisan kellett fölmelegíteni valamivel kisebb hőntartási idővel, mint amit a próbavizsgálatok mutattak. Egyebek mellett ez okból is helyeztünk el nyúlásmérő bélyegeket, azaz, hogy meggyőződhessünk arról valós repülési körülmények között mekkora szilárdsági tartaléka van a szerkezetnek a folyáshatárhoz képest.

A törzsrácson a hegesztését követően elvégeztük a varratok anyagvizsgálatát. Ennek során a következő módszereket alkalmaztuk:

- varratok ellenőrzése penetrációs eljárással;
- varratok ellenőrzése nyomáspróbával;
- szilárdsági bevizsgálás, terheléspróba.

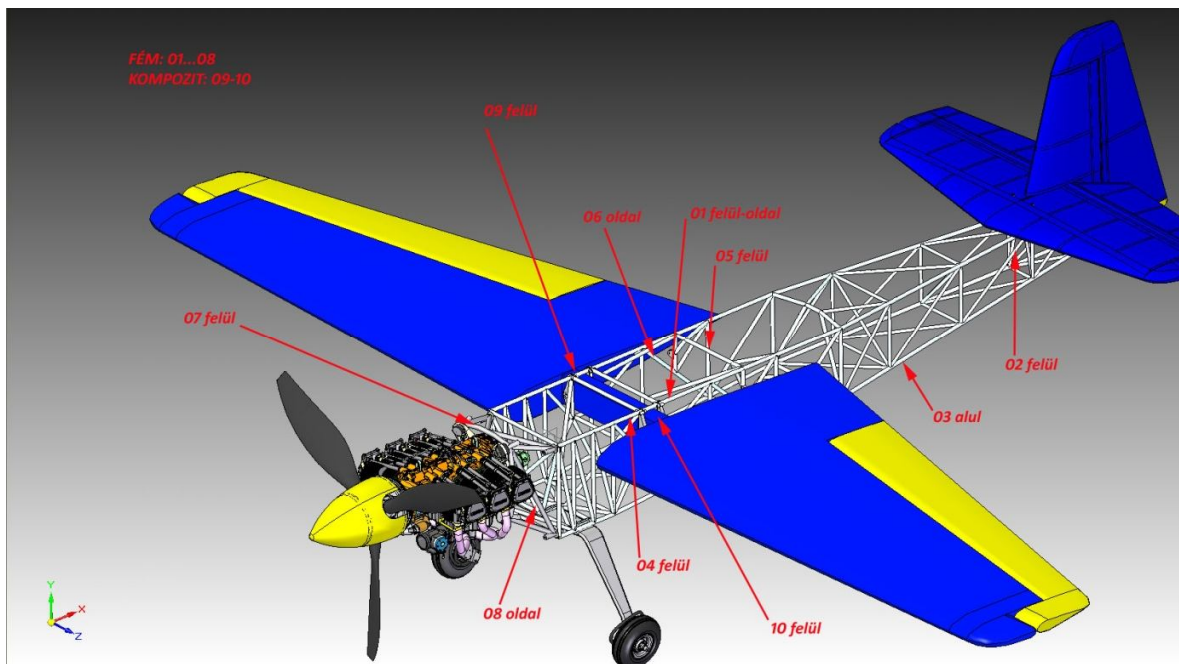
A hegesztést követően, annak megfelelőségét nyomáspróbával ellenőriztük, a csövekben $\Delta p = 2$ bar belső túlnyomást létrehozva és azt 24 órán keresztül fenntartva. Nyomásesést nem tapasztaltunk.

A szerkezet szilárdsági ellenőrzése

A Racer 540-es típusjelű, nagy terhelhetőségű, speciálisan az „air race” verseny-sorozathoz kifejlesztett repülőgép. Ez tette indokolttá egy egyedi fejlesztésű terhelés rögzítő berendezés megépítését, melynek segítségével a szerkezeti elemeken ébredő külső erőhatásokból ébredő feszültségek mérhetőek, tárolhatóak és elemezhetőek. E berendezés segítségével több lépcsős

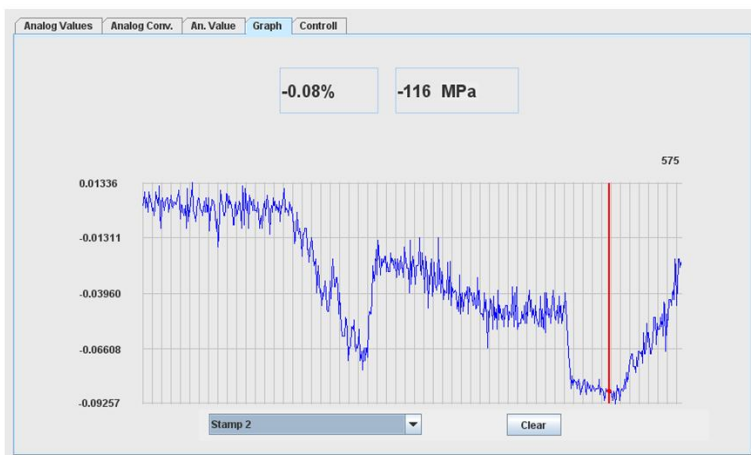
kontrollt alkalmazhatunk és repülésbiztonsági szempontokat figyelembe véve állapíthatjuk meg a szerkezeti elemek terhelhetőségi tartományait.

A vizsgálat elsődleges célja, a visszacsatolás, a szilárdsági numerikus és végeelem számítások eredményeinek összehasonlítására, a földi szerkezeti bevizsgálás és a valós légerők okozta hatásokkal. Ebből adódóan a számítások során alkalmazott módszerek és peremfeltételek megfelelősége, azok jósága ellenőrizhetővé válik. Másodsorban pedig megállapítható, hogy az egyes extrém (túl-)terhelések fellépésekor a szerkezet milyen deformációt szenved, az ébredő nyúlások mennyire közelítik meg az anyagszerkezetek rugalmas alakváltozási határainak szélső értékeit. A rendszer kialakítását az SGF Technológia Fejlesztő Kft-vel közösen végeztük, akik igényeinknek megfelelően építették meg a terhelés regisztert és alkották meg a működéshez szükséges vezérlő szoftvert. A DABAS fantázianevű berendezés 16 mérő csatornán képes érzékelni, mintavételezési sebessége másodpercenként 100 darab, minden külön telepített szenzor esetében (egy szenzor egy csatornának felel meg).



7. ábra A repülőgépen elhelyezett nyúlásmérő bélyegek helye

A 7. ábrán látható a jelenleg alkalmazott 10 mérőpont, ahová nyúlásmérő bélyegek helyeztünk, az ott fellépő helyi feszültségek regisztrálására. Az alkalmazott „intelligens” szoftver a nyúlásokat [%] automatikusan átszámítja feszültségekre [MPa], így az elemzések alkalmával mindkét értékről elsődlegesen információt kapható.



8. ábra A DABAS kiértékelő felülete.



9. ábra A motortartó bakon elhelyezett nyúlásmérő bélyeg

A 8. ábrán a szoftver kiértékelő felülete, a 9. ábra a motortartó bakon a nyúlásmérő bélyeg elhelyezése látható.

Összefoglalás

Ismert, hogy az elmúlt évtizedekben Magyarországon több különböző rendeltetésű – döntően sportcélú - könnyűrepülőgép épült. Ezek egy része saját konstrukcióként, több pedig külföldről beszerzett kitek összeállításával született. A létrehozás körülményeit azonban rendszerint az egyedi, eseti, manufakturális (házi) előállítási viszonyok jellemezték. Az elkészült légitársaságok korszerűségét, hatékonyságát, vizsgálva, a jellemzők széles spektrumával találkozunk.



10. ábra Corvus Racer 540

A **Corvus Racer 540** megépítése (10. ábra) és sikeres alkalmazása igazolja, hogy elszántsággal, kiemelkedő kreativitással, magas színvonalú szakmai felkészültséggel, innovatív hajlammal, a piac elvárásainak ismeretében, megfelelő közgazdasági felkészültséggel, Magyarországon, akár előzmények nélkül is létrehozható, professzionális, korszerű technológiával, iparszerűen előállított, világszínvonalú termék a repülőiparban is.

A létrehozott sikeres konstrukció hozzájárulhat a magyar repülőipar újjáéledéséhez, a szakmai kultúra továbbéléséhez és fejlődéséhez, illetve bázisul szolgálhat további fejlesztéseknek, hazai túra, illetve polgári és katonai hasznosíthatóságú kiképző repülőgépek kimunkálásához.

Felhasznált irodalom

1. Czvikovszky-Nagy-Gaál: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó Budapest, 2000.
2. Corvus Aircraft Kft belső dokumentációs rendszer, típuskézikönyvek
3. Eger: Proektirovanie letatelnih apparatov (oroszc nyelv) MASINOSZTROENIE, Moszkva, 1984
4. G. Lubin: Handbook of Composites Reinhold in New York 2002.
5. Michael C. Y. Niu: Airframe Structural Design Lockheed Aeronautical Systems, Company Burbank, California USA 1990. ISBN No. 962-7128-04-X
6. Óvári Gyula dr.: A repülőgép-tervezés alapjai (multimédiás tansegédlet, kézirat) ZMNE BJKMK RLI, 2008.
7. Serge Aberte: Impact on Composite Structures, Cambridge England 1998. ISBN 0-521-47389-0
8. S. R. Reid and G. Zhou: Impact Behavior of Fibre-Reinforced Composite Materials and Structures Cambridge, England 2000. ISBN 1 85573 423 0