

Magyar tervezésű és gyártású repülőgép CORVUS RACER 540 hegesztett rácsszerkezetének tervezése, gyártása és ellenőrzése

Farkas Csaba

okl. gépészmérnök, szigorló PhD hallgató, CPL oktató pilóta
Corvus Aircraft Kft.
e-mail: csaba.farkas@corvus-aircraft.hu

Dr. Palotás Béla

okl. gépészmérnök, egyetemi docens
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Dunaújvárosi Főiskola
e-mail: palotasb@eik.bme.hu

Absztrakt Hosszú évek során összegyűlt tervezői, gyártói és üzemeltetési tapasztalatok birtokában mondtunk igent 2008 augusztusában egy új, nagyteljesítményű, nagy terhelhetőségű, nagy manőverező képességű repülőgép kifejlesztésére. A Corvus Aircraft Kft 1,5 éves fejlesztői munkájának eredménye, hogy terveink szerint az idei Red Bull Air Race versenysorozat második felétől Besenyei Péter a Corvus Racer 540 repülőgéppel áll rajthoz. A fejlesztés során, a repülőgép hegesztett törzsrácsának megfelelő elkészítése kiemelt munkafolyamat volt, melyet a Budapesti Műszaki Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszékkal közösen végeztünk. A hegesztési technológia kidolgozása és a szerkezet hegesztése összetett volt, mert nagy szilárdságú nehezen hegeszthető kis falvastagságú csöveket (25CrMo4) kellett alkalmazni tekintettel az optimális szerkezeti tömegre.

Értekezésünk a tervezés, a hegesztési technológia, a gyártás és a vizsgálatok egyes lépéseit ismerteti.

Kulcsszavak: Corvus Racer 540, 25CrMo4 hegesztett rács, Besenyei Péter, nagy szilárdság, CAE tervezés, nyúlásmérő bélyeg rendszer, on-line monitorozás

1. Bevezetés, a Corvus Aircraft Kft-ről röviden – Farkas Csaba

A Corvus Aircraft Kft. megalakulásakor céljául tűzte ki, hogy egy merőben új szerkezeti felépítésű, korszerű filozófiával tervezett repülőgépek gyártásába kezd, szakít a hagyományos fél-héj sárkány, építési elvvel és kompozit szendvics repülőgépeket kínál az ultrakönnnyű és túra-, kiképző repülőgépek piacán. Az első repülőgép a Corvus Corone MK I típus volt, ami 2005-ben került bemutatásra egy németországi kiállításon.

A sorozatgyártás 2006 év elejétől indult és ez évben egy új típussal jelent meg a cég a Corone MK II ultrakönnnyű változattal, amiből később a Corvus CA-21 Phantom (1. ábra) repülőgép került kifejlesztésre. A Phantom európai export változata a legmagasabb tervezői szervezet, a német DULV, LTF-UL építési előírásai szerint került kialakításra és 2008. februárban megkapta a német típusengedélyt. Ennek a repülőgépnek az amerikai export változata a Corvus Falcon. A Phantom és Falcon modellek kétszemélyes, kiképző-, gyakorló iskolagépek, de közkedvelten alkalmazzák sport és túra repülések végrehajtására is. Teherhordó sárkány szerkezete, teljes egészben prepreg héj kompozit, bizonyos részek alumínium és hegesztett acél elemekből épülnek fel. A világ különböző pontjain közel 30 repülőgép repül szélsőséges időjárási körülmények között, így Dél-Afrikában, Amerikai Egyesült Államokban, Egyesült Arab Emírátsokban, Thaiföldön, Németországban, Olaszországban, Spanyolországban és természetesen Magyarországon.

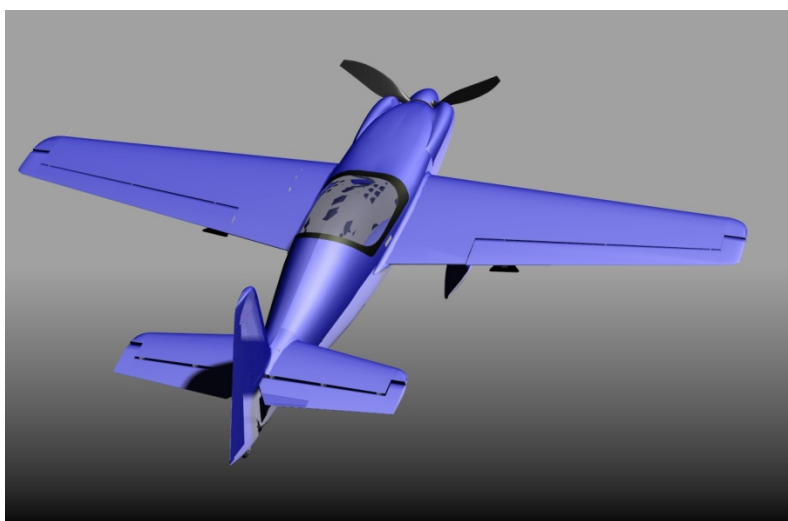


1. ábra Corvus CA-21 Phantom

A Corvus Aircraft Kft. a legmodernebb CAE (számítógéppel támogatott mérnöki tevékenység) alapú tervező rendszereket vezette be és integrálta a gyártás egyes munkafolyamataiba. A CAE rendszerek alkalmazása révén a termékek

fejlesztési ideje nagymértékben csökkent, jelentősen tapasztalható a fejlesztési költségek mérséklése is. Részben a magas fokú CAE háttér infrastruktúrájának köszönhetően vállaltuk el 2008 nyarán, Besenyei Péter Red Bull Air Race versenypilóta felkérését egy korszerű, merőben új alapokra fektetett speciális „air race” repülőgép kifejlesztésére (2. ábra).

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.



2. ábra Corvus CA-41 Racer

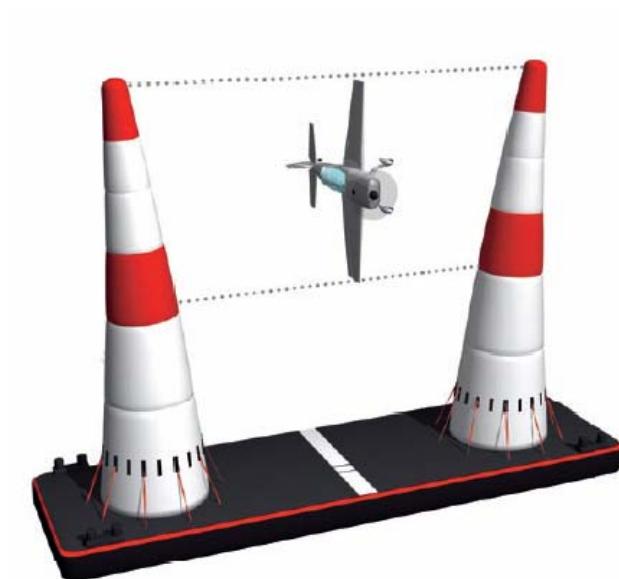
A 25. Jubileumi Hegesztés Technikai Konferencia alkalmából a törzsrács tervezési, gyártási, bevizsgálási és minősítési munkafolyamatairól kívánunk összefoglalást adni.

2. A Corvus Racer 540 tervezési koncepciói – Farkas Csaba

Az előtervezés során felállított koncepciók között szerepeltek a tervezendő repülőgép következő tulajdonságai:

- Nagy repülési sebesség (400 km/h), ebből adódóan magas manőverezési sebesség legalább 320-340 km/h,
- Az ellenállás minimalizálása, a törzs minél kisebb C_x értékének biztosítása,
- Áramvonalas forma kialakítása, a leggyakrabban végrehajtott repülési manőverek alapos tanulmányozása (3. és 4. ábra), a már említett alak és kormányzervek erre történő optimalizálása,

- Legkisebb szerkezeti tömeg, korszerű szerkezeti anyagok és gyártástechnológia alkalmazása,
- Hegesztett nagyszilárdságú törzsrács kialakítása,
- Magas terhelhetőség minimum +12g és -12g,
- Maximális felszálló tömeg MTOM (maximális felszálló tömeg) = 685...700 kg,
- Kiváló fordulékonyság és magas orsózó sebesség elérése, ebből adódóan a szárnyból az üzemanyagtank elhagyása (kisebb tömeg kisebb tehetetlenségi nyomatékot jelent, állandó elfordító nyomaték mellett, amit a csűrőlap kitérés határoz meg, így növekszik a szöggyorsulás majd ebből adódóan a szögsebesség),
- A repülési manőverekből származó, a szerkezetben ébredő feszültségek és nyúlások on-line monitorozása, az eredményekből a statikus és a kifáradási szilárdság pillanatnyi kiértékelésnek lehetősége.
- Az előtervezés során a következő feladatokat és munkafolyamatokat végeztük el:
 - Különböző repülőgépformák virtuális CAD/CAE 3D formatervezése,
 - Az előzetesen tervezett 3D formák és elemek virtuális áramlástani vizsgálata,
 - Elsődleges aerodinamikai számítások, profilok légerőtani elemzése,
 - Stabilitás vizsgálatok szélső súlypont helyzetek mellett,
 - Előzetes teljesítményszámítás,
 - A hegesztett törzsrács tervezése, annak terhelési kalkulációja, végeselemes (FEA) számítása, a hegesztési varratok szilárdsági méretezése és a technológia kidolgozása,
 - Szerkezeti elemek szilárdsági méretezése,
 - Kompozit szerkezeti elemek rétegrend analízise.



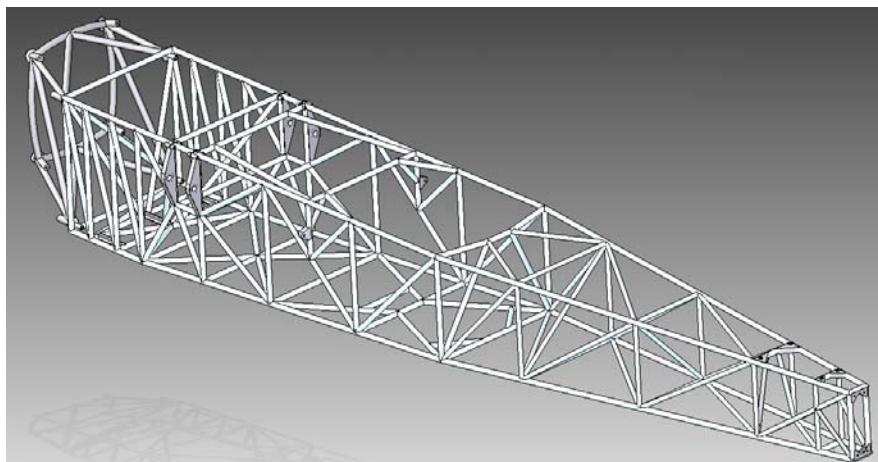
3. ábra Pilonok közötti késrepülés az egyik leggyakoribb mozgásforma



4. ábra Chicane forduló váltások szintén az egyik leggyakoribb mozgásforma

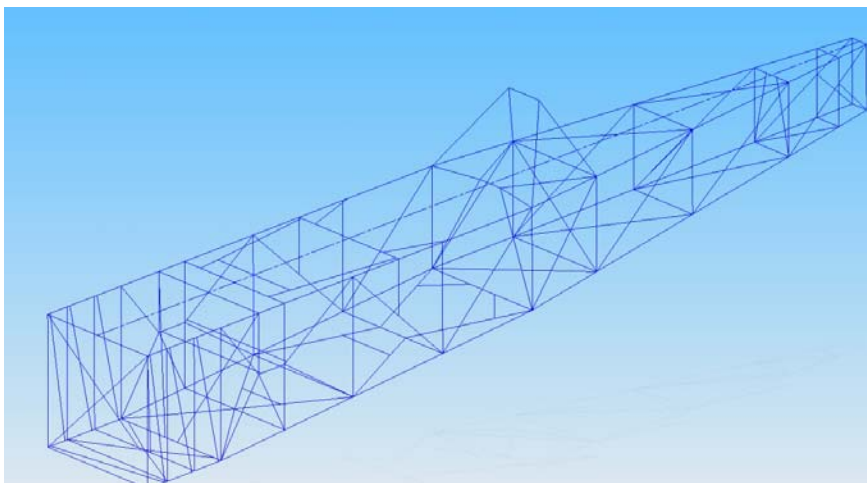
3. A hegesztett törzsrács tervezése – Farkas Csaba

A repülőgép fő szerkezeti elemének Solid Edge ST rendszerben készített CAD modellje az 5. ábrán látható. A modellezést a tartószerkezet alkalmazás segítségével végeztük el, Voloscsuk András tervezőmérnök kollégámmal közösen.



5. ábra Törzsrács Solid Edgeben készült modellje

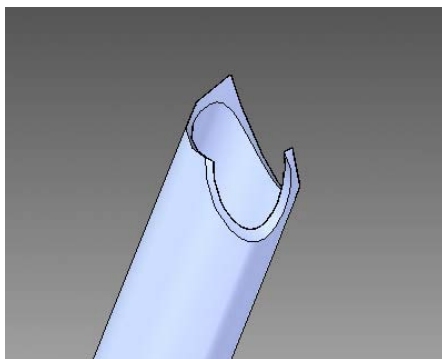
A törzsrács funkciója többszörösen összetett, és szilárdsági szempontból a legkritikusabb elem. Csatlakozó csomópontokban ébrednek a koncentrált nyíróerők, példaként említve, a szárny bekötési pontban üzemi terhelés esetén $F = 41.000 \text{ N}$ nyíróerő lép fel oldalanként. A rácsához kapcsolódik minden elem; a szárny, a vezérsíkok, a futóművek, a motor, ebben kerül elhelyezésre az üzemanyagrendszer, a műszerek, a mozgató rudazatok és a pilóta. A váz szerkezet alapja a 3D drót modell vázlata (6. ábra).



6. ábra A törzs tervezésének alap drótváz modellje

Ennek megrajzolását követően az általam létrehozott csőszelvények megadása után, figyelve a csatlakozási csomópontok gyártási követelményeire alakult ki a hegesztett váz. Az egyes csövek illesztése során tapasztaltam a Solid Edge ST rendszer intelligens képességét, ami abban nyilvánul meg, hogy a tervező rendszer folyamatosan figyel a már meglévő és újonnan beépítésre kerülő elemek aktuális helyzetére.

A hegesztési technológia ellenőrzését és a varratok szilárdsági vizsgálatát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtechnológia Tanszékén végeztük. A rács gyártása során először az alsó és felső keret került összehegesztésre sablonban, ezt követően a függőleges elemek bekötése következett, majd a kereszt és végül a diagonál merevítő elemek varratai kerültek kialakításra. 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 állt rendelkezésre és minden elemről az önálló alkatrész modell. A tervezőrendszerbe az alkalmazott csövek, 25CrMo4 anyagminőségét definiálva már a fejlesztés legelején ismerté vált a rács tömege. A 7. ábrán látható egy összetett alakú cső végkialakítása, mely a tervezett rácsból generált önálló alkatrész. Minden elemről készült ilyen modell, amely annak adta alapját, hogy CAM (számítógéppel vezérelt gyártás) szoftveres munkakörnyezetben a csőmaráshoz szükséges NC vezérlőprogramok elkészítése megtörténhessen. Sok esetben annyira bonyolult csatlakozások adódtak, hogy azt CAE alkalmazások megléte nélkül csak hosszas munkafolyamatok során lettünk volna képesek kialakítani azokat.



7. ábra Csővég kialakítás

A rács tervezése úgynevezett párhuzamos vagy szaknyelven szimultán eljárással történt, a tervezéssel együtt a szilárdsági méretezés, ellenőrzés is folyamatban volt. A Solid Edge ST rugalmasságát kihasználva a numerikus szilárdsági számításokat alapul véve több rács elrendezés is készült. Ezeket külön-külön egymástól független FEA alkalmazásokban (Cosmos, Femap) elemeztük.

4. A hegesztett törzsrács szilárdsági elemzése – Farkas Csaba

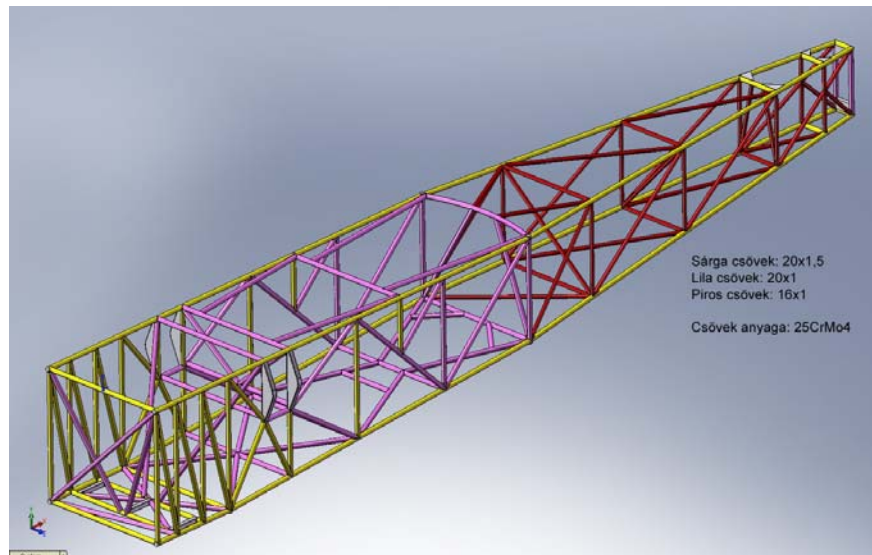
A tervezés lépéseiben több szimulációs eljárást alkalmaztunk, hogy az egyes szerkezeti elemek áramlástani és szilárdsági viselkedését modellezni tudjuk. Az egyik legérdekesebb elemzéseket a törzs rácsszerkezeten és a motortartó bakon hajtottuk végre, amik hegesztett szerkezetek. Szimuláltuk a szárnyakon, vezérsíkokon fellépő légerők keltette nyíróerők hatását a törzs bekötési és csatlakozási csomópontjaiban, melyek lokálisan a legkritikusabb hatást fejtik ki, hiszen e pontok az úgynevezett erő bevezetési helyek.

A törzsrács esetében nem az volt az elsődleges kérdés, hogy a rács rudakban fellépő erőket meghatározzuk, ez a folyamat numerikus úton Ritz-féle módszerrel vagy FEA alkalmazásokban található úgynevezett „beam” vagy „truss” elemekkel könnyedén kezelhető. A fejlesztés során a leglényegesebb kérdés az volt, hogy lehetőség van-e arra, hogy a varratok alakját és hőhatás övezeteit az egész szerkezet globális szintjén kezelve, vizsgáljuk szimulációs FEA eljárással. A Budapesti Műszaki Egyetem Gépszerkezettani Intézet igazgatójával dr. Váradi Károly Úrral, több alkalommal volt lehetőség konzultációra és erről a kérdéskörrel szakmai értekezéseket folytatni. Váradi Professzorral közösen egy olyan eljárást dolgoztunk ki, aminek segítségével a kritikus varratok és csomópontok feszültségi állapotai elemezhetővé váltak.

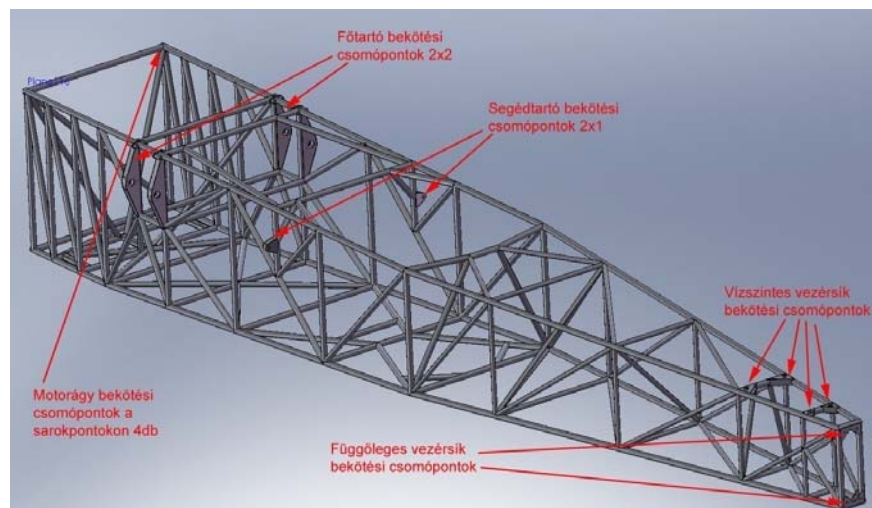
Az eljárás bemutatása előtt ismerjük meg a szerkezet általános felépítését.

A rácsszerkezetben található csövek 16x1 mm, 20x1 mm és 20x1,5 mm, anyagminőségük 25CrMo4 nemesíthető acél. A 8. ábra az egyes csövek elrendezését

szemlélteti. A 9. ábra a rácsszerkezeten található erő bevezetési csomópontokat mutatja, amelyeken keresztül kerül felerősítésre a szárny, a vízszintes vezérsík, a függőleges vezérsík és a motortartó bak.



8. ábra A rácsszerkezetben található csövek



9. ábra A rácsszerkezet erő bevezetési csomópontjai

A bekötési csomópontokat terhelő erők, nyíró igénybevétel ébresztenek azokban, amelyeket a hegesztett varratokat terhelik. A FEA számítások során, több problémával is szembesültünk, elsősorban azzal, hogy, miként szimuláljuk a meg-

fogási peremfeltételeket. A valóságban a repülőgép a szárnyán függ és a nyomás különbség hatására fellépő felhajtóerő jelenti a repülés lehetőségét. Ezt nem lehetett modellezni, így helyettesítő megfogási kényszereket kellett alkalmazni, ami az adott támaszpontban járulékos reakciónyomatékokat jelentett. Az egyes irány és kormányfelületeken ébredő hatásokat külön-külön vizsgáltuk a valós megfogási lehetőségek hiányában, így önálló vizsgálatként kezeltük a szárny, a vízszintes vezérsík, a függőleges vezérsík és a motortartó keret rácsra gyakorolt hatását.

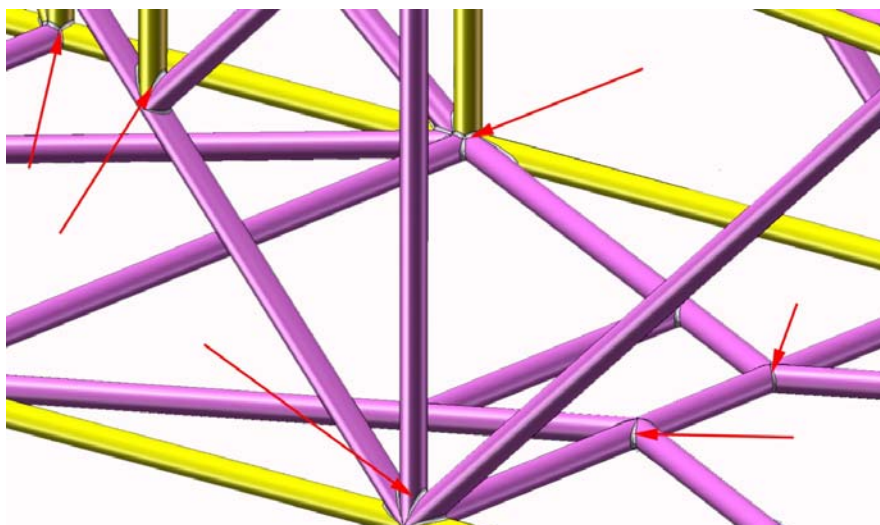
Szintén számos kérdést vetett fel a megfelelő végeelem háló felépítése. A csövek vékony falvastagsága miatt szilárdtest háló alkalmazása nem lehetséges, amint már előzőleg említett „beam” vagy „truss” elemek használata nem vezet eredményre, ott a csomópontok nem kerülnek elemzésre csak a csövekben fellépő erők keltette feszültségek.

A tartószerkezet modulban megtervezett és modellezésre került rács átalakítása mellett döntöttünk és újra modelleztük azt felületi modellként, amire héj „shell” végeelem hálót tudtuk illeszteni, ezzel az egy módszerrel vizsgálható megfelelően a rácsszerkezet. Az egyes csomópontokban, a valóságban kialakuló lekerekítési (rádiusz) átmeneteket alkalmaztuk, ahol a végeelem háló besűrítésével növeltük a számítás pontosságát. Az, hogy az egyes csövek között, mekkora átmenet adódik, nagyrészt az alkalmazott hegesztőpálca átmérőjétől függ, mivel 2,5 mm-es pálca került felhasználásra, mindenhol 2 mm-es átmenetet használtam, a próbahegesztések azt mutatták ekkora minden körülmények között adódik.

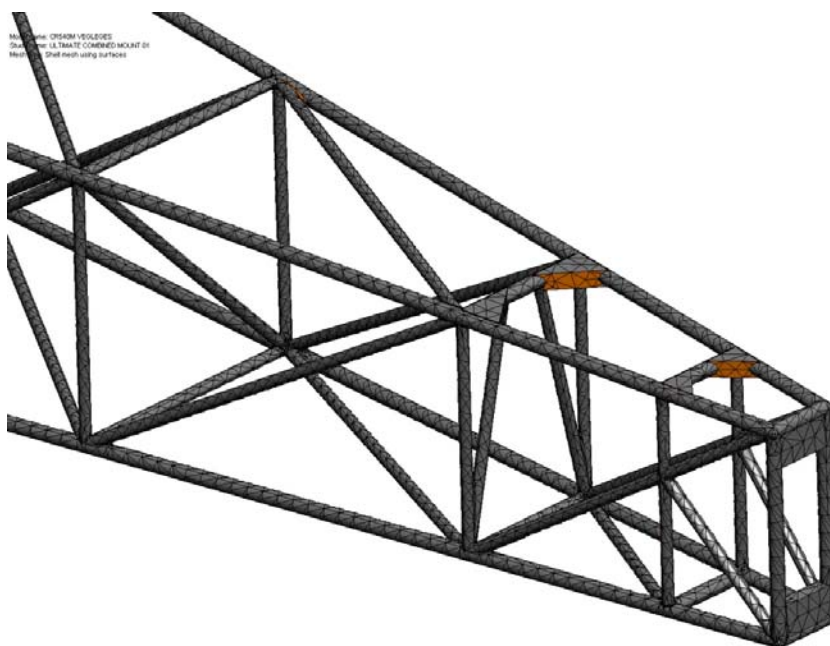
Addig nem végeztük el a számítást, amíg dr. Palotás Béla kollégával nem voltunk biztosak abban, hogy olyan technológiával hegesztünk, hogy minden esetben a varraton és hőhatás övezetén kívül következik be a tönkremenetel. Ehhez számos próbatestet készítettünk és számos technológiai vizsgálatot hajtottunk végre (lásd bővebben később). A megfelelő technológia kézbentartása jelentette számunkra azt a biztonságot, hogy feltételeztük a szerkezet egyenszilárdságát, így nem kellett különböző anyagi paramétereket megadni a csomópontokban, az egész szerkezetre a beszállító által küldött műbizonylaton található 25CrMo4 anyag szilárdsági értékei voltak érvényben. A 10. ábra a FEA vizsgálatokhoz készített szerkezet egy részletét szemlélteti, ahol láthatók a varrat átmenetek egyes részei is (piros nyíllal jelölve). Erre illesztettük rá a 11. ábrán látható végeelem hálót, ami a szilárdsági számítások alapjait jelentette.

Az egyes csomópontokba bevezetett nyíróerők, a légerők keltette hatások reakció támaszerő és nyomatékai, amely szerint:

- A szárny főtartó bekötést terhelő reakció erő üzemi maximális értéke 41.000 N, törő terhelési értéke 77.000 N,
- A vízszintes vezérsíkon fellépő erő kritikus esetben 11.500 N,
- A függőleges vezérsíkot terhelő erő pedig 6.500 N.



10. ábra A FEA vizsgálatokhoz készített felületi modell

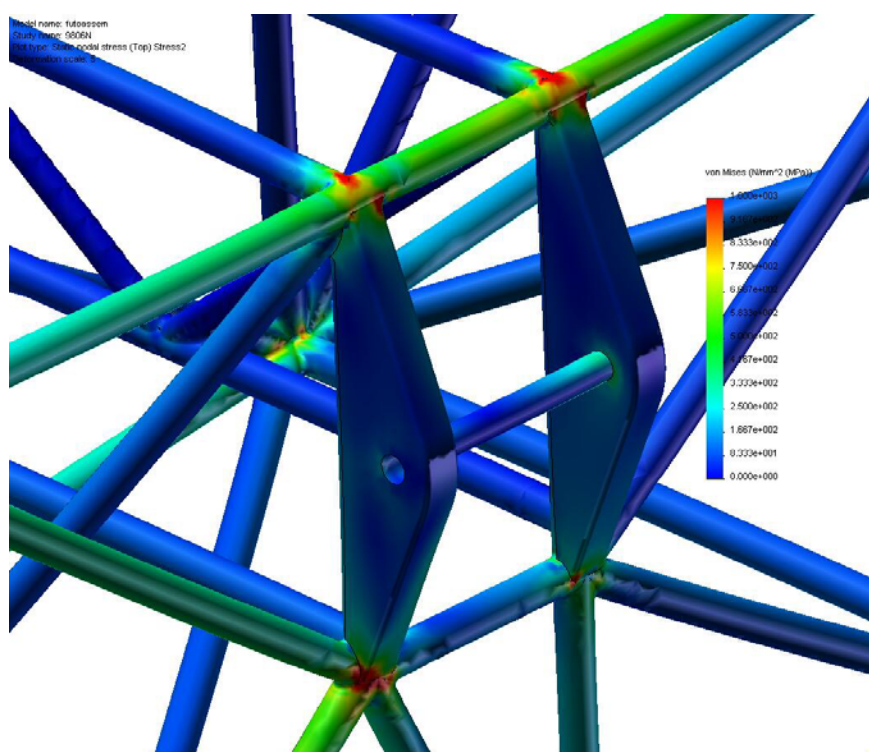


11. ábra A szilárdsági számításokban alkalmazott végelem háló modell

A számításokat két állapotra végeztük el, az egyik az úgynevezett „limit load condition” ezt a repülésben a maximális statikus üzemi terhelésnek nevezzük, a másik pedig az „ultimate load condition” ez a törő határterhelést jelenti, amire a

szerkezetet minősíteni kell a bevizsgálás során. Ebben az állapotban a szerkezet nem törhet el, de maradó deformáció felléphet benne.

A limit terhelések vizsgálata során nem talákoztunk olyan kiterjedt területtel vagy varrat átmenettel, ami a folyáshatár értékét meghaladta volna, a törő terhelés esetén bizonyos elemi csomópontok már meghaladták, néhol elérték a szakítószilárdság értékét, de ezek is csak lokális helyeken jelentkeztek kiterjedt zóna sehol nem volt. Számunkra a legfontosabb a kritikus csőcsatlakozások és a legjobban terhelt csövek meghatározása volt. Végig figyelembe vettük azt a tény, hogy a szerkezet rögzítettsége következtében járulékos feszültségek is jelentkeztek az egyes elemeken, ezért döntöttünk úgy, hogy a feszültségek elemzésekor az adott elemen fellépő átlagos (average stress) állapotot tekintjük a méretezés és ellenőrzés kiinduló alapjának. A következő, 12. ábra példaként a szárny-törzs csatlakozás, vagyis a főtartó bekötés feszültség eloszlását szemlélteti.



12. ábra Feszültség eloszlás a főtartó bekötés körzetében

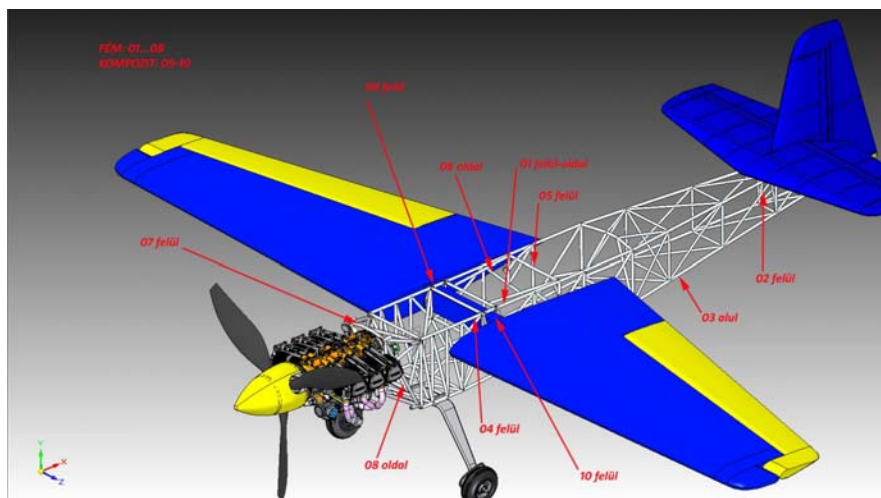
5. A rácsszerkezet szilárdsági bevizsgálása – Farkas Csaba

A Racer 540-es típus nagy terhelhetőségű, speciálisan az „air race” versenysorozatba kifejlesztett repülőgép. Ez tette indokolttá egy egyedi fejlesztésű terhelés rögzítő berendezés megépítését, amely segítségével a szerkezeti elemeken ébredő külső erőhatásokból ébredő feszültségek mérhetők, tárolhatók és elemezhetők. A berendezés segítségével egy több lépcsős kontrollt alkalmazunk és repülésbiztonsági szempontokat figyelembe véve állapítjuk meg a szerkezeti elemek terhelhetőségének tartományait.

A vizsgálat elsődleges célja, a visszacsatolás, hogy a szilárdsági numerikus és végeelem számítások eredményeit összehasonlítsuk a földi szerkezeti bevizsgálás (13. ábra) és a valós légerők okozta hatásokkal. Ebből adódóan a számítások során alkalmazott módszerek és peremfeltételek megfeleltetése, azok jósága ellenőrizhetővé válik. Másodsorban pedig megállapítható, hogy az egyes g-hatások okozta túlterhelések fellépésekor a szerkezet milyen deformációt szenved, az ébredő nyúlások mennyire közelítik meg az anyagszerkezetek rugalmas tartományának szélső értékeit. A rendszer fejlesztését az SGF Technológia Fejlesztő Kft-vel közösen végeztük el, akik igényeinknek megfelelően építették meg a terhelés regisztert és alkották meg a működéshez szükséges vezérlő szoftvert. A DABAS fantázianevű berendezés 16 mérő csatornán képes mérni, mintavételezési sebessége másodpercenként 100 darab minden külön telepített szenzor esetében (egy szenzor egy csatornának felel meg). A 14. ábrán látható a jelenleg alkalmazásra kerülő 10 mérőpont, ahová nyúlásmérő bélyegek kerülnek felhelyezésre, hogy az ott fellépő helyi feszültségek regisztrálása megtörténhessen.

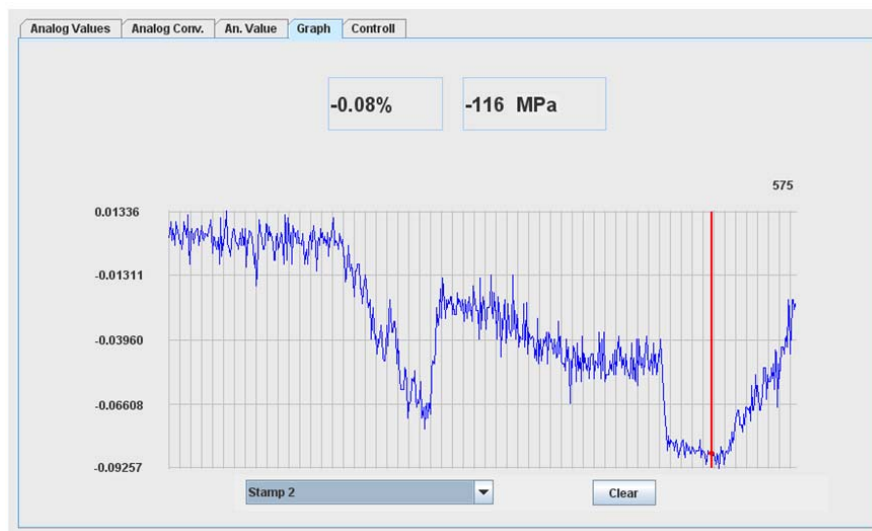


13. ábra A Racer szilárdsági vizsgálata



14. ábra A repülőgépen elhelyezésre került nyúlásmérő bélyegek helyei

A rendszer intelligens alkalmazása abban nyilvánul meg, hogy a kiértékelő szoftver a nyúlásokat [%] automatikusan átszámítja feszültségre [MPa] így az elemzések alkalmazásával mindkét értékről elsődlegesen kapunk információt. A 15. ábrán a szoftver kiértékelő felülete látható, még a 16. ábra a motortartó bakon található nyúlásmérő bélyeg elhelyezését szemlélteti.



15. ábra A DABAS kiértékelő felülete



16. ábra A motortartó bakon elhelyezett nyúlásmérő bélyeg

6. A megfelelő hegesztési technológia kidolgozása és a hegesztett rács varratainak ellenőrzése – Farkas Csaba, Dr. Palotás Béla

A repülőgép rendeltetéséből adódóan a vázszerkezet igen nagy terhelésnek van kitéve üzemi körülmények között, másfelől pedig a bevizsgálás során a 18-szoros szilárdsági túlerhelést is igazolni kellett. A hegesztett rács alapanyagának ebből adódóan nemesíthető acélt 25CrMo4 csövet választottunk, ez a repülőiparban igen elterjedt.

Mint köztudott a nemesíthető acélok hegesztése legtöbb esetben nem egyszerű feladat, csak gondos előzetes és utólagos intézkedésekkel hegeszthetők [1]. Ilyen acélok hegesztése során leggyakrabban a hőhatásövezetben hidegrepedés érzékenységgel kell számolnunk. A hidegrepedés keletkezésének oka összetett, megjelenését sok tényező együttes hatása befolyásolja. Nemesíthető acélok esetében a hegesztéskor keletkező nagy keménységű szövetelemek, úgymint a martenzit és a bénit kis alakváltozó képességű szövetszerkezetet eredményez, ami a hidegrepedés kialakulását elősegíti.

A Tennant GmbH-től beszerzésre került 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:

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

Mivel a karbonegyenérték magas, már ebből látható volt, hogy előmelegítés szükséges a hegesztést megelőzően.

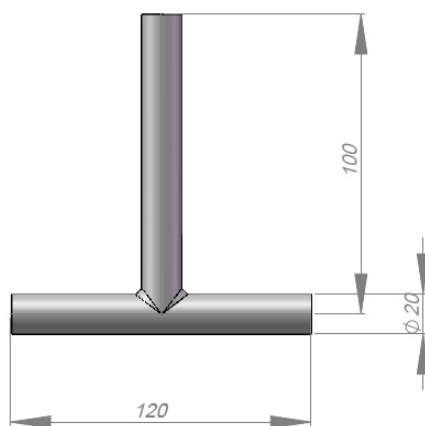
Az alapanyag kémiai összetételének ismeretében a következő pálcákat választottuk lehetséges hegesztőanyagként:

- UNION X 96,
- UTP A-651,
- ER 90 S-73,
- Roob Gasse 1.7734.2.

A legmegfelelőbbnek az UNION X 96 és a Roob gasse 1.7734.2 hegesztőanyagok bizonyultak, melyeknek a kémiai összetételük a következő:

- UNION X 96, közepesen ötvözött, tömör huzalelektroda nemesített, finom szemcsés szerkezeti acélok hegesztéséhez a daruépítés és a járműgyártás területén. Összetétele: C = 0,12%, Si=0,8%, Mn = 1,9%, Cr = 0,45%, Mo = 0,55%, Ni = 2,35%
- Roob Gasse 1.7734.2 speciálisan repülőipari alkalmazásra kifejlesztett hegesztőanyag nemesíthető acélokhöz. Összetétel: C = 0,15%, Cr = 1,4%, Mo = 0,9%, V = 0,25%.

A megfelelő kötés vizsgálatához próbatesteket készítettünk és különféle technológiai paraméterek változtatásával, úgymint előmelegítés, utóhőkezelés, áramerősség igyekeztünk a legmegfelelőbb eljárást kidolgozni. A próbatestek 20 x 1,0 mm-s csövekből a 17. ábrának megfelelően hegesztett darabok voltak.



17. ábra A vizsgált próbatest méretei

Hegesztett kötések vizsgálata:

Vizsgálat kódja: Racer U96 / 01

- Alapanyag: 25CrMo4 20 x 1,0 mm cső,
- Hegesztési eljárás: AWI, hőbevitel nincs szabályozva
- Hegesztőanyag: UNION X 96, $d_h = 1,2$ mm
- Előmelegítés: 250°C
- Áramerősség: 35A
- Utóhőkezelés: nem került alkalmazásra

Kötések szakadás után a 18. ábrán láthatók:



18. ábra Racer U96 / 01 vizsgálat szakadási töretei

A Racer U96 / 01 kódszámú vizsgálat azt mutatta, hogy csupán előmelegítést alkalmazni 250°C hőmérsékleten nem elegendő a hőhatás övezet beedződésének elkerülésére. Csak az egyik darab szakadt el a hőhatásövezeten kívül $F = 40.000$ N terhelés esetén.

Vizsgálat kódja: Racer U96 / 02

- Alapanyag: 25CrMo4 20 x 1,0 mm cső
- Hegesztési eljárás: AWI, hőbevitel nincs szabályozva
- Hegesztőanyag: UNION X 96, $d_h = 1,2$ mm
- Előmelegítés: nem került alkalmazásra
- Áramerősség: 40A
- Utóhőkezelés: 350°C

Kötések szakadás után (19. ábra):



19. ábra Racer U96 / 02 vizsgálat szakadási töretei

A Racer U96 / 02 kódszámú vizsgálat azt mutatta, hogy az utólagos hőkezelés alkalmazása csökkenti a rideg törés veszélyét, a csövek már kontrakcióval szakadtak, nagy képlékenységi tartalékkal, maximális szakítási erő 41.000 N.

Vizsgálat kódja: Racer 1.7734 / 01

- Alapanyag: 25CrMo4 20 x 1,0 mm cső,
- Hegesztési eljárás: AWI, hőbevitel nincs szabályozva,
- Hegesztőanyag: Roob Gasse 1.7734.2, dh = 2,5 mm,
- Előmelegítés: nem került alkalmazásra,
- Áramerősség: 35 A,
- Utóhőkezelés: 350 °C.
- Kötések szakadás után (20. ábra):



20. ábra Racer 1.7734 / 01 vizsgálat szakadási töretei

A Racer 1.7734 / 01 kódszámú vizsgálat azt mutatta, hogy az utólagos hőkezelés ennél a hegesztő anyagnál is szükséges de nem elégséges feltétel a rideg törés elkerülésre. Bár a szakadási erő értéke magas volt ~ 40.000 N de a hőhatás övezet ment tönkre.

Vizsgálat kódja: Racer 1.7734 / 02

- Alapanyag: 25CrMo4, 20 x 1,0 mm cső
- Hegesztési eljárás: AWI, hőbevitel impulzustechnikával szabályozva
- Hegesztőanyag: Roob Gasse 1.7734.2, D = 1,2 mm
- Előmelegítés: 200 °C
- Áramerősség: 55-5 A
- Utóhőkezelés: 350 °C kemencében hevítve 30 percig, hűtőtartás 30 percig, kihűlés kemencében
- Kötések szakadás után a 21. ábrán láthatók.



21. ábra Racer 1.7734 / 02 vizsgálat szakadási töretei

A Racer 1.7734 / 02 kódszámú vizsgálat azt mutatta, hogy előmelegítés, utólagos hőkezelés és impulzus technika alkalmazása képes a legstabilabb kötést biztosítani. Így a hőhatásövezet képlékenysége javul, az alakváltozó képessége nő, másik előnye, hogy az esetleges varrathibákból kiinduló repedések terjedését az anyag képlékeny alakváltozással, nagy valószínűséggel megakadályozza, amelyet a 22. ábrán látható szakító diagram is igazol.

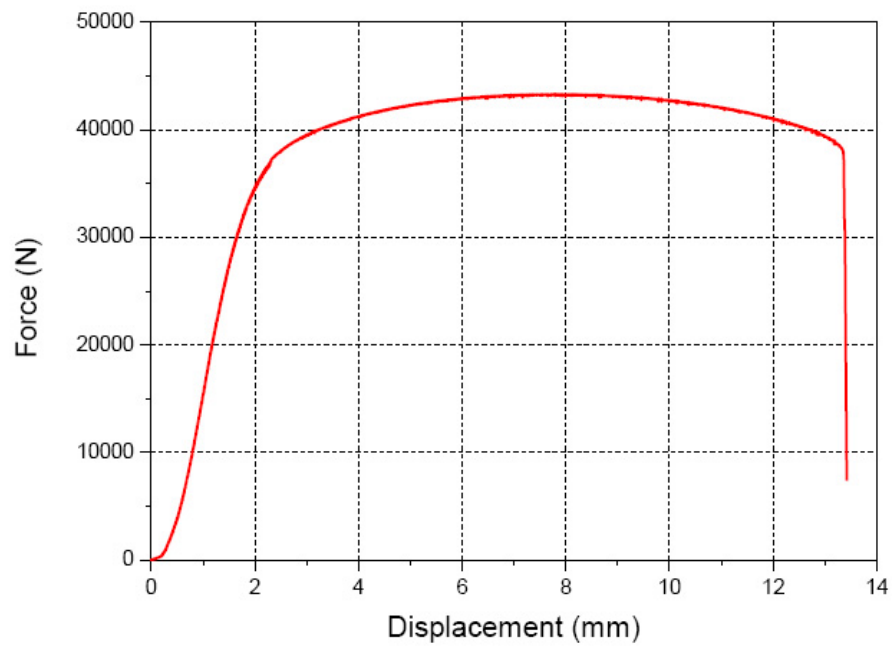
A valóság problémája:

A valóságban a kemencében történő hőkezelést nem tudtuk elvégezni fizikai korlátok miatt, így minden varrat lokálisan került fölmelegítésre valamivel kisebb hőtartási idővel, mint amit a próbavizsgálatok mutattak. Többek között ez okból is kerültek felhelyezésre a nyúlásmérő bélyegek, hogy valós repülési körülmények között mekkora szilárdsági tartalékok vannak a folyáshatárhoz képest.

A törzsrácson a hegesztését követően a varratok anyagvizsgálatát elvégeztük, melyek során a következő módszereket alkalmaztuk:

- Varratok ellenőrzése penetrációs eljárással,
- Varratok ellenőrzése nyomáspróbával,
- Szilárdsági bevizsgálás, terheléspróba.

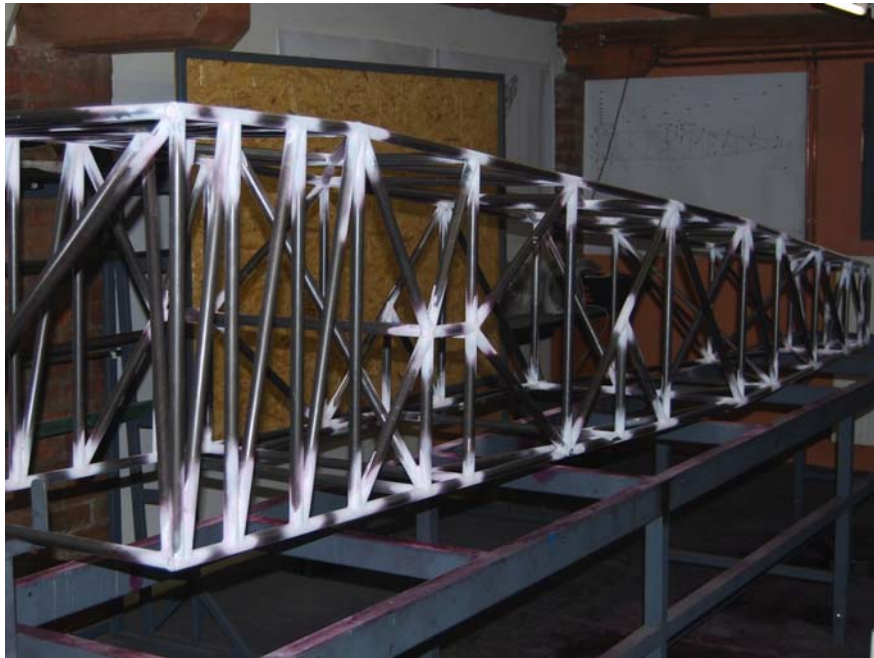
A hegesztést követően annak megfelelőségét első körben nyomáspróbával ellenőriztük. A csövekben a belső nyomást $p = 2$ bar értékig növeltük (23. ábra) és 24 órán keresztül tartottuk fent ezt az állapotot. A nyomásveszteség ez időtartam alatt 0,3 bar volt. Ebből arra következtettünk, hogy valamely varratok porozitást tartalmaznak. Ezt követően minden varratot penetrációs vizsgálatnak (24. ábra) vetettünk alá, amely során, négy helyen találtunk nem megfelelően zárt varratot. Ezeket kijavítottuk és a nyomáspróbát követően veszteséget nem tapasztaltunk.



22. ábra Racer 1.7734 / 02 vizsgálat egyik darabjának szakítódíagramja



23. ábra Belső nyomással történő terhelés



24. ábra Penetrációs vizsgálat

Összefoglalás – Dr. Palotás Béla

A Corvus Aircraft Kft. nem kis feladatra vállalkozott, amikor elvállalta a Corvus CA-41 Racer repülőgép megtervezését és megépítését, amellyel Besenyei Péter Red Bull Air Race versenypilóta (25. ábra) már ebben az évben szeretne versenyezni. A repülőgép elkészült, a berepülése folyamatban van és igen jó paraméterekkel rendelkezik.

A gép tervezése, a szükséges számítások és modellezések elvégzése a legkorszerűbb módon történt. A gyártók büszkék lehetnek a formatervezési nívódíjra is, amelyet a repülő elnyert.

A repülőgép vázszerkezete nemesíthető acélcsőből épült, ennek hegesztése nem volt egyszerű feladat. A hegesztett kötések vizsgálatai azt mutatták, hogy megfelelő képlékeny alakváltozó képességgel az előmelegített és utólagosan hőkezelt kötések rendelkeznek.

A vázszerkezet hegesztett kötéseit előmelegítéssel készítették, de az utólagos próbahegesztések során igazoltan szükséges hőkezelésre nem volt lehetőség fizikai korlátok következtében, így csak bízhatunk abban, hogy a csövek rendelkeznek annyi képlékeny tartalékkal, hogy nem jön létre ridegtörés. Erre garanciát a repülés közben fellépő folyamatos feszültségmérés adhat.



25. ábra Besenyei Péter az új Racetel 2010. februárban Tököl repülőtér pilon repülés tesztkor

Felhasznált szakirodalom:

- [1] G. Lengyel, B. Palotás: Weldability investigation of tamper-grade steels, Materials Science Forum, Vol. **589** (2008), pp. 31-35, (Nemesíthető acélok hegeszthetőségének vizsgálata)
- [2] Michael C. Y. Niu: Airframe Structural Design Lockheed Aeronautical Systems, Company Burbank, California USA 1990. ISBN No. 962-7128-04-X
- [3] RICHARD D. Hiscocks Design of Light Aircraft ISBN 0-9699809-0-6