

A REPÜLŐGÉPEK SÁRKÁNY SZERKEZETÉNEK ÁLLAPOTSZERINTI ÜZEMELTETÉSRE TÖRTÉNŐ ÁTTÉRÉSE

1. A REPÜLŐGÉPEK TERHELÉSI SZINTJÉNEK MEGÁLLAPÍTÁSA A FEDÉLZETI ADATRÖGZÍTŐ ADATAI ALAPJÁN

A manőverező repülőszerkezetek terhelési, vagy igénybevételi szintjének és az össztechnikai üzemidő meghatározásának alapvető paramétere a szerkezet súlypontján ható összesített függőleges túlterhelés (n_y). A kutatási eredmények alapján megállapítható [1, 5, 6, 13], hogy a függőleges túlterhelés ismétlődése, azaz a szerkezet (túl)terhelési (igénybevételi) szintjei repüléskor, azonos típusú repülőgépek vizsgálatakor is, jelentős, a tervezéskor normaként elfogadott túlterhelési értékekhez képest eltéréseket mutatnak. Ebből adódik az, hogy a szerkezetre meghatározott üzemidő nem teljesül minden repülőgépen, mert az anyag fáradásából adódó repedések a tényleges teherviselő keresztmetszetek rohamos csökkenését idézik elő.

Ezért, ha a (túl)terhelési szintekről és azok ismétlődésének számáról kellő mennyiségű adat áll rendelkezésre, akkor meghatározható a túlterhelés összesített ismétlődésének (ciklusszámának) görbéje $F_{\text{tö}}(N_y^{EKV})$. Ezt össze lehet vetni a tervezés során normaként meghatározott túlterhelések összesített ciklusszám görbéjével, $F_{\text{norm}}(N_y^{EKV})$, ami az üzemidő számítás alapját képezi. Az összehasonlítás után megállapíthatók a repülőgépek tényleges (túl)terhelési, igénybevételi szintjei. (Repülőgépenként vagy csoportonként, vagy modifikációnként).

Ahhoz, hogy a szárnytő keresztmetszetre, amely az üzemidőt tekintve a repülőgép törzs legmeghatározóbb zónája, a [12] megbízható terhelhetőségi számítási eredményeket kapjunk bevezetésre került a hajlító nyomatékok ekvivalens ciklusai óránkénti, összesített ismétlődésének számítási modellje $F_t(M_{\text{hajl}}^{EKV})$, és a nyomatékok által kiváltott, repült órára vonatkoztatott sérülékenységgel (meghibásodással) szembeni érzéketlenségi mutatója [54]¹ $\xi(M_{\text{hajl}}^{EKV})$. Ezek jól meghatározhatók a fedélzeti adatrögzítőről levett adatok segítségével.

$$M_{\text{Fedélzeti}}^{\text{Hajl}} = f(n_y; H; M; G_{\text{rg}})$$

ahol: n_y – függőleges irányú túlterhelés;

¹ 99 oldal A légi jármű azon tulajdonsága, hogy ellenáll a ráható igénybevételeknek és sérülések esetén is képes ellátni feladatait.

H – repülési magasság;

M - Mach - szám²;

G_{rg} – a repülőgép súlypontjában mért súlya.

A manőverező repülőgépek (túl)terheltségének, igénybevételi szintjének megállapítására különböző módszerek léteznek. Az üzemeltetés során kapott függőleges irányú (túl)terhelések nagysága, spektruma és ismétlődéseinek száma alapján a fő teherviselő elemek üzemidejének meghatározásához ki lehet számolni a repült órára vonatkoztatott sérülékenységgel szembeni érzéketlenségi mutatót $\xi_t(N_y^{EKV})$, ebből pedig a viszonylagos sérülékenységgel szembeni indexet (ξ_t^*) kapjuk meg, ami az óránkénti mutató és a tervezés során elfogadott mutató hányadosából tevődik össze: [15] ³

$$\xi_t^*(N_y^{EKV}) = \xi_t(N_y^{EKV}) / \xi_{t \text{ számított}}(N_y^{EKV}) \quad (1.1.)$$

Nagy tapasztalatokkal rendelkezünk már a földön ill. a levegőben kinyerhető adatok feldolgozásában. (ARMOK) [13], illetőleg az „AVIATRONIC” Kft.-vel közösen kifejlesztett értékelő rendszer⁴ segítségével (TAVASZ-29). Minden repülőgépet külön-külön kell (túl)terheltség szempontjából a fedélzeti adatrögzítő által biztosított adatok alapján ellenőrizni és értékelni úgy, hogy nemcsak az $F_t(M_{Fedélzeti}^{hajl})$ értékét kell kiszámítani, hanem a repült órára vonatkoztatott, és a hajlító nyomatók által kiváltott, a vízszintes és a függőleges vezérsíkokra vonatkoztatott ekvivalens ciklusok összesített ismétlődésének szintjeit is meg kell határozni $F_t(M_{vzszvs}^{hajl})$; $F_t(M_{függvs}^{hajl})$.

A vízszintes vezérsíkokra vonatkoztatott $F_t(M_{vzszvs}^{hajl})$ érték meghatározásakor vizsgálni kell a repülési feladat végrehajtása során létrejött függőleges túlterhelést (n_y), magasságot (H) Mach-számot (M), a stabilizátor kitérési fokát ($\Delta\varphi_{stab}$) és a repülőgép súlyát (G_{rg}).

$$M_{vzszvs}^{hajl} = f(n_y; H; M; \Delta\varphi_{stab}; G_{rg})$$

Az $F_t(M_{függvs}^{hajl})$ értékének meghatározásához vizsgálni kell a függőleges túlterhelést (n_y), a magasságot (H), a Mach-számot (M), a stabilizátor kitérési szögét, a repülőgép súlyát (G_{rg}), az oldalkormány kitérési szögét (δ_{oldk}), a csúszás-szögét (β), az oldalirányú túlterhelés értékét (n_z) és a repülőgép valós állásszögét (α_{val}).

² A repülő test sebessége és a közeg sűrűsége által megszabott hangsebesség hányadosa. (E. Mach osztrák fizikus nevééről)

³ 22-32 oldalak

⁴ TAVASZ-29 program

$$M_{\text{függ. vs.}}^{\text{hajl}} = f(n_y; H; M; \Delta\varphi_{\text{stab}}; G_{\text{rg}}; \delta_{\text{old. k.}}; \beta; n_z; \alpha_{\text{val}})$$

Amennyiben nem áll rendelkezésünkre a fedélzeti adatrögzítők kellő mennyiségű adata, akkor a (túl)terhelési szint jó közelítéssel megállapítható ún. „**expressz**” statisztikai módszer segítségével. [15] Ebben a repült órára vonatkoztatott és a függőleges túlterhelés spektrumaiból és ismétlődéseinek számából adódó sérülékenységgel szembeni érzéketlenségi mutató szintjét a repülések során létrejött túlterhelések átlagával ($n_{y\text{átl}}$) és időtartamának figyelembe vételével határozhatjuk meg. Ez a statisztikai módszer széles körben elterjedt a MiG-29 repülőgépek túlterheltségi szintjének megállapítására, amelynek alapját a regressziós modell adja. (1.2. képlet [15])

$$\lg \xi^* (N_y^{EKV}) = A \cdot \lg n_{y\text{átl}} + B \cdot S_{n_{y\text{max}}}^2 - C \cdot \tau + D \quad (1.2.)$$

ahol $n_{y\text{átl}}$ - a repülések tartama alatt ható függőleges túlterhelések átlagértéke;

$S_{n_{y\text{max}}}^2$ - a repülések időtartama alatt ható maximális függőleges túlterhelési értékek szórásnégyzete; [57]⁵

$$S_{n_{y\text{max}}}^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (n_i - \bar{n}_y)^2$$

τ - a fedélzeti adatrögzítő alapján kiszámított egy feladatra jutó átlagos repülési időtartam.

A gyártó a saját kiindulási adataival végzett számításainak eredményei a fedélzeti adatrögzítő és elemző programunk révén kapott (túl)terhelési értékekkel lefuttatott gyártói számítási modell eredményeivel megegyeztek, ami alátámasztotta a regressziós modell használhatóságát is.

Az 1. táblázatban bemutatom az üzembe helyezés kezdetétől rögzített repülési adatok alapján meghatározható sérülékenységgel szembeni érzéketlenségi index, valamint az ekvivalens, vagy egyenértékű (átszámított) repülési idők számításokkal meghatározott értékeit.⁶

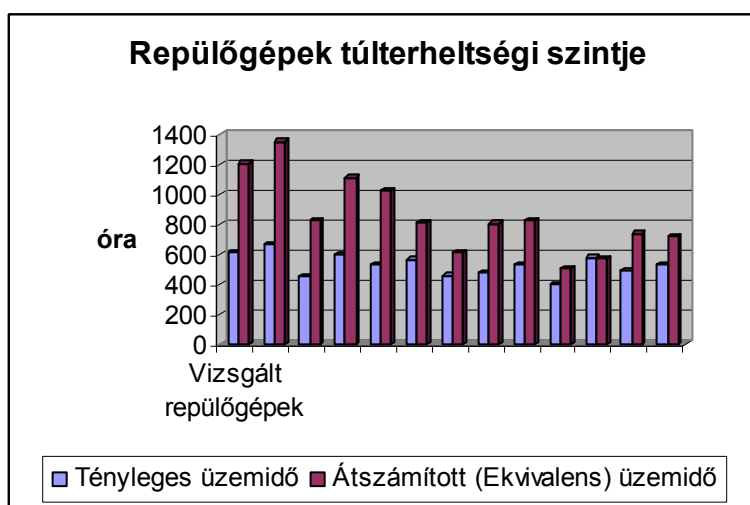
Grafikusan az 1. ábrán mutatom be a repülőgépeink terheltségi szintjeit. (Igénybevételük nagyságát)

⁵ Szórásnégyzet - nem más, mint a vételezett minta $\bar{X}$ átlaga körüli (esetünkben $\bar{n}_y$) második centrális momentuma.

⁶ Azaz a fedélzeti adatrögzítő és elemző segítségével, gépenként meghatároztuk a repülőgépre ható terheléseket, és ennek alapján az úgynevezett „**ekvivalens, vagy átszámított repült időt**”, ami azt jelenti, hogy a tervezési követelmények szerinti, az adott repülőgépre megkapott összesített terhelési ciklusszám alapján, mekkora repült idő tartozna valójában. Ez jól jellemzi a repülőgépek relatív elhasználódásának mértékét.

№	Rep.gép rendeltet.	Repült idő az üzembe helyezés kezdetétől: $T_{\bar{u}}$ [óra]	Leszállások száma az üzembe helyezés kezdetétől: [darab]	Intervallum a túlterheltség értékeléséhez:		Sér. index: ξ_t^*	Átsz.rep idő: $T_{\text{átsz}}$ [óra]	$n_{y\text{átl}}$	$S_{n_{y\text{max}}}^2$	τ [perc]
				Lesz. sz: [db]	Rep. idő: [óra]					
	I	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
1	K.-harci	616	1102	1022	590	1,96	1207	4,71	3,123	34,6
2	K.-harci	668	1128	1083	656	2,03	1356	4,98	2,853	36,4
3	K.-harci	457	773	748	442	1,8	823	4,82	2,73	35,5
4	K.-harci	600	1051	1035	589	1,86	1116	4,75	2,81	34,1
5	Harci	537	898	866	526	1,91	1026	5,01	2,62	36,5
6	Harci	567	917	890	555	1,43	811	4,7	2,563	37,4
7	Harci	458	739	713	436	1,347	617	4,658	2,38	36,8
8	Harci	477	770	745	463	1,694	808	4,94	2,46	37,3
9	Harci	537	857	825	403	1,644	883	4,88	2,713	38,3
10	Harci	396	639	615	372	1,278	506	4,57	2,39	36,3
11	Harci	580	874	860	568	0,992	575	4,54	2,17	39,7
12	Harci	493	793	775	485	1,5	740	4,77	2,583	37,6
13	Harci	534	870	848	540	1,355	724	5,2	1,362	38,2
14	Harci	424	715	676	403	1,77	750	4,79	2,79	35,8
15	Harci	492	791	765	478	1,55	763	5,01	2,12	37,6
16	Harci	474	739	681	432	1,5	711	4,71	2,82	38,1
17	Harci	259	445	413	243	3,21	831	5,33	3,36	35,4

$$\text{Átszámított repülési idő: } T_{\text{átsz}} = T_{\bar{u}} \cdot \xi_t^*$$



1. ábra

Az 1. táblázat adatainak elemzése azt mutatja, hogy az $n_{y\text{max}}$ (1.2 képlet) átlagos értéke a harci repülőgépek esetében 4,85446, a kiképző-harci gépek esetében pedig 4,815. A viszonylagos sérülékenységgel szembeni érzéketlenségi index (ξ^*) ennek megfelelően az összes vizsgált repülőgépre vonatkoztatva 1,695, ezen belül a kiképző-harci repülőgépeké 1,91, a harci repülőgépeké 1,63. Utóbbi adatokból egyértelmű a következtetés, hogy a **vizsgált repülőgépek túlterhelési értékei nagyobbak a tervezéskor számítottaknál**, így az átszámított (ekvivalens) üzemidő egyenérték 836 óra, ami a kiképző harci repülőgépek esetében 1118 óra, a harci repülőgépeké pedig 749 óra. Mindez pedig arra bizonyíték, hogy a magyar repülőgép-vezetők kiképzési programja a

–túlterheléseket tekintve – eltért a tervezetett szintektől. Ennek ellenére a technikai állapotfelmérés azt mutatta, hogy a repülés biztonságát befolyásoló teherviselő elemek sérülése elhanyagolható, nem csökkentik a szerkezet teherviselő képességét egészében, ezért a valós túlterheltség ellenére is a gyártó főmérnöke az össztechnikai üzemidőt 300 órával és 3 évvel minden további nélkül meghosszabbította. A feltárt hibák technológia szerinti kijavítása után – különös tekintettel az anyagfáradásból adódó repedésekre - a repülőgépek az előírt következő technikai állapotfelmérésig **korlátozás nélkül üzemeltethetők maradtak**.

2. A VIZSGÁLT REPÜLŐGÉP TÍPUS (MIG-29) ELLENŐRZÉSRE, DIAGNOSZTIZÁLÁSRA VALÓ ALKALMASSÁGA

Ellenőrzésre való alkalmasság alatt értjük a vizsgálandó objektum, repülőszerkezet azon tulajdonságát, hogy szerkezeti elemei kialakításával, hozzáférhetőségével lehetővé teszi a szükséges ellenőrzések különféle eszközökkel történő végrehajthatóságát, olyan adatok biztosításával, amelyek alkalmasak diagnosztizálásra. Ezt az automatikus ellenőrző berendezések és a roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek párhuzamos alkalmazásával érhetjük el. [8, 9] Az **automatikus eszközökkel** a repülőgép különböző rendszerei (sárkány, hajtómű, rádió, lokátor, fedélzeti műszerek és navigációs rendszerek, fegyverzet) alkalmazhatóságát, üzemképességét tudjuk értékelni.

A **roncsolásmentes anyagvizsgálatok** a teherviselő elemek sérülései, alakváltozásai felfedezésére, megfigyelésére szolgál. A sok fajta anyagvizsgálati módszer (pl. nyúlásbélyegek, nanotechnológia stb) alkalmazásával az ellenőrzésre való alkalmasságot a szerkezet egyik meghatározó, alap tulajdonságaként értelmezzük azért, hogy a teherviselő elemek üzemben tartás szempontjából legfontosabb elváltozásait hatékonyan és időben be tudjuk határolni. Ilyenek:

- repedések;
- sérülések;
- anyagfolytonosság változása;
- anyagsűrűség változása;
- korrózió.;
- maradandó alakváltozások, stb.

Ezek vizsgálata, megfigyelése tehát lehetővé teszi a sárkányszerkezet berendezései, teherviselő elemei állapotának felmérését, értékelését, az üzemképtelenséget megelőző állapot időben történő felismerését és kiváltó okainak elemzését.

A repülőgépek ellenőrzését, technikai állapotának felmérését a repülőgéphez rendszeresített eszközökön túl döntően a **Magyar Honvédség a saját fejlesztésű** eszközeivel, módszereivel hajtotta végre. (fedélzeti adatrögzítő és kiértékelő szoftver fejlesztése, endoszkópia, anyagvizsgálati módszerek, berendezések, hajtómű vibráció ellenőrzése, tribológia stb).

Fedélzeti és földi ellenőrző eszközök

A technika fejlődésével a repülőeszközökön egyre több különböző működési elven alapuló és rendeltetésű eszközt, műszert, berendezést és módszert alkalmaznak. Ezek:

- a rendszerbe beépített ellenőrző eszközök;
- fedélzeti adatrögzítők;
- ellenőrző, vizsgáló berendezések;
- az üzemeltetés során alkalmazott mérőeszközök;
- komplex, automatizált rendszer-ellenőrző berendezések;
- beépített biztonsági és diagnosztikai eszközök, továbbá a földi támogató rendszerek (GSE, Ground Support Equipment) alkalmazása.⁷

Az ilyen berendezések alkalmazásával lehetővé válik a repülőgépek alkalmazhatósága, üzemképességi szintjének megbízható vizsgálata, értékelése, amennyiben az alábbi feltételeknek megfelelnek [24]:

- jelzi a meghibásodást;
- jelzi az üzemkész állapot elérését;
- jelzi a kiválasztott paraméterek szélső értékeinek elérését, a hibaelhárító (megelőző) munkálatok elvégzésének szükségességét;
- a hibameelőző (elhárító) munkálatok elvégzésének szükségessége esetében rövidtávú prognózist is képes adni (a meghatározott időintervallumra) az adott rendszer működőképességéről;
- képes a szélső paramétereit elért vagy meghibásodott berendezés, elem kiválasztására, (meghatározására);
- képes az összegyűjtött adatok alapján értékelést adni a vizsgált rendszer, vagy berendezés technikai állapotáról.

A fenti feltételeknek is megfelelő ellenőrző berendezéseket alkalmazni tudjuk a repülőgép feladatra történő felkészítése során, bonyolult meghibásodások behatárolására, a profilaktikus [54]⁸, utó és időszakos munkák, periodikus ellenőrzések során és technikai állapotfelméréskor. A MiG-29 típusú repülőgépek légi és földi üzemeltetése során alkalmazott gyári ellenőrző eszközök:

1. TESZTER: (fedélzeti adatrögzítő) („Fekete Doboz”)

Rendeltetése, mivel a repülés adatainak összegyűjtése, rögzítése és megőrzése alkalmas:

- a repülőtechnika üzemképességének földi elemzésére (analizálására);
- a repülőgép vezető ténykedésének elemzésére;
- repülőesemények okainak vizsgálatára;

2. EKRÁN: (beépített ellenőrzés és figyelmeztető rendszer)

Rendeltetése:

⁷ A korszerű diagnosztikai berendezések földi támogató rendszerek alkalmazása a repülőgépek üzemeltetésében (GRIPEN előadás) (Pogácsás Imre 2008 Szolnok)

⁸ 22. oldal Profilaktikus munkák azok, amelyek a fokozatos meghibásodások feltárására, elhárítására szolgálnak.

- *földön* egy egységes körfolyamat alapján végzett automatikus ellenőrzés az adatok és a mérési eredmények rögzítése a repülőgép rendszereinek 50-55%-ára vonatkozóan;
- *levegőben* pedig a berendezések és a rendszerek automatikus ellenőrzése, a repülőgép-vezető meghibásodásokról időben történő tájékoztatása, adatok rögzítése és prioritások felállítása a repülőgép rendszereinek 75-80%-ára vonatkozóan;
- A meghibásodások jellegének, idejének rögzítése a későbbi dokumentálás elősegítésére a repülőgép rendszereinek 95%-ára vonatkozóan.

Az „EKRÁN” adatait – a „TESZTERREL” ellentétben – dekódoló berendezés nélkül, szalagon szavak és számok formájában megkapjuk.

A „TESZTER” segítségével számos fedélzeti rendszert üzemeltetünk a megbízhatósági szint ellenőrzésén alapuló kiszolgálási stratégia alkalmazásával úgy, hogy eltekintünk a javításközi üzemidők meghatározásától, azaz a berendezést a meghibásodásig történő üzembentartási elv szerint üzemeltetjük.

3. MK-9.12: (földi mobilellenőrző komplexum)

Rendeltetése: A repülőgép és a hajtóművek rendszerei üzemképessége ellenőrzése valamint hibabehatárolás.

A felsorolt üzemeltetés-ellenőrzési eszközök lehetővé teszik a repülőszerkezetek alkalmazhatóságának, üzemképességének és technikai állapotának értékelését, de nem akadályozzák az állapot szerinti üzemeltetésre történő átállás folyamatában más automatikus ellenőrző berendezések mind szélesebb körű alkalmazását, a meghibásodások feltárását, mind pontosabb behatárolását, illetőleg az egyéb felmerülő problémák megoldását.

A meghibásodásokat alapvetően három csoportba oszthatjuk [15]⁹

1. A szerkezetekben, anyagokban keletkező és dinamikusan fejlődő nem elektromos, illetőleg a különböző stabil, de nem zajvédett elektromos és elektromágneses jelek csoportja.

Ezek a mechanikai és hidraulika rendszereket és az elektromos erőátviteli eszközöket jellemzi. Az ezzel kapcsolatos adatokat, jeleket megbízhatóan lehet rögzíteni, feldolgozni olyan berendezésekkel, műszerekkel, mint az EKRÁN, a TESZTER, és a különböző, számítógépes anyagvizsgálati eszközök révén.

2. Nagy frekvenciájú műszaki jellemzők, vagy elektromos jelek pontos mérése, digitális formában való rögzítése, majd egy megengedett értékkel való összehasonlítása és a változások jellegének meghatározása. E jelcsoport a fedélzeti rendszerek viszonylagosan egyszerűbb berendezéseit jellemezi, elősegítve a megbízhatóság szintje szerinti üzemeltetést, ha az adatok feldolgozása legalább olyan berendezésekkel történik, mint az MK-9.12; TESZTER; LUCS stb.

3. Nagy mennyiségű dinamikus információ algoritmus szerinti feldolgozása és elemzése.

⁹ 29. oldal

Azon rendszerekben lehet eredményes, ahol a legmeghatározóbb és legjellemzőbb, de sok más paramétertől függő jellemzőket sikerül kiválasztani és ezen adatokat nagy mennyiségben is képesek vagyunk feldolgozni. Változásaik jellegét képesek vagyunk meghatározni, nagy mennyiségű, véletlenszerű információhalmaz esetében is és a feladatnak megfelelően a már tárolt adathalmazt össze tudjuk hasonlítani a kiindulási (etalon, vagy minta) adatokkal. A két első jelcsoport mérési módszerei, az erre felhasznált eszközök folyamatos fejlesztése már olyan szintet ért el, hogy a továbbiakban már csak a minőségről, a teljesítményről illetőleg a megoldási módozatokról beszélhetünk.

A harmadik problémakör (jelcsoport kezelése) már sok új megoldandó feladat elé állít bennünket. Az automatizált ellenőrző rendszerek és berendezések alkalmazása sem teszi lehetővé a közvetlen és egyenes megoldásokat, ezért az információ feldolgozó rendszereket célszerű két csoportra osztani:

1. **Speciális** - a vizsgált objektumról kapott elsődleges analóg és digitális információs jelek összegyűjtése, összegzése és rögzítése.

A szükséges technikai eszközök:

- fedélzeti adatrögzítő;
- a fedélzeti gyors adatátldolgozó és kijelző rendszer, amely lehetővé teszi a szükséges adatok levételét és ezek számítógépes kiértékelését;
- földi automatikus ellenőrző eszközök, melyek kompatibilisek a fedélzeten már meglévő automatikus számítógépes ellenőrző rendszerekkel illetőleg azok központi feldolgozó elemivel.

2. **Egységesített** - az információs adatbázis folyamatos bővítésével a begyűjtött digitális adatok és információ másodlagos feldolgozása, a technikai állapot és annak változásának meghatározására.

A szükséges elemek, eszközök:

- könnyen és gyorsan telepíthető és átszállítható számítógépes eszköz;
- a számítógépes program, algoritmus, mely biztosítja a feladat végrehajtását

3. A REPÜLŐGÉP SÁRKÁNSZERKEZETÉNEK KISZOLGÁLÁSI STRATÉGIÁJÁNAK KIVÁLASZTÁSÁNAK MÓDJA ÉS AZ AZT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

Korábbi munkáimban már ismertetett módszertani eljárások a fedélzeti rendszerek és a repülőgép különböző összetevő elemei, berendezései technikai kiszolgálási stratégiájának kiválasztására vonatkoztak.

A repülőgép sárkányszerkezete és teherviselő elemeire alkalmazható technikai kiszolgálási stratégia azonban sajátos jellegű, ezért három **speciális feltételnek** mindenképpen meg kell megfelelnie.[1, 5]

1. A repülőgép elvárt magas fokú megbízhatósági szintje megköveteli, hogy szilárdsági szempontból a szerkezet teherviselő elemei hirtelen nem törhetnek el, vagy nem mehetnek váratlanul tönkre. Ezért a kiválasztott technikai stratégiának a repülőgép egész élettartama alatt biztosítania kell a teherviselő

elemek megfelelő statikai szilárdságát, és statikai szilárdsági tartalékát. Ez az alábbi három feltétel biztosítása esetén teljesíthető:

$$\begin{aligned} T_{\text{tényleges}} &\geq T_{\text{megköv.}} \\ \sigma_{\text{tényleges}} &\geq \sigma_{\text{számított}} \\ \sigma_{\text{maradék}} &\geq 0,67\sigma_{\text{számított}} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Ahol $T_{\text{tényleges}}$ – a repülőgép ismétlődőterhelés vizsgálatainak [54]¹⁰ során a szerkezet statikus kifaradási szilárdsága [54]¹¹ alapján kapott, tényleges össz-technikai üzemidő;

$T_{\text{megköv.}}$ – a tervezési alapadatokban megkövetelt (elvárt) össz-technikai üzemidő;

$\sigma_{\text{tényleges.}}$ – a repülőgép ismétlődőterhelés vizsgálatainak során az anyag statikus kifaradási szilárdsága alapján kapott tényleges szilárdsági érték;

$\sigma_{\text{számított}}$ – a tervezési alapadatok alapján számított szükséges tartamzilárdsági érték. Ez azt jelenti, hogy az igénybevételek számát nem a kifaradási határ alapján kell meghatározni (σ_k), hanem a repülőgép üzemidejére átlagban kapott $3 \cdot 10^3$ igénybevételi értékre, amelyhez tartozó feszültségnél (σ_N) nem jön létre törés, és nem lesz a szerkezetnek felesleges súlya. [55]¹² *(az egyszerűség kedvéért a továbbra is statikus kifaradási szilárdság kifejezést használom)*;

$\sigma_{\text{tényleges.}}$ – a repülőgép ismétlődőterhelés vizsgálatainak során az anyag statikus kifaradási szilárdsága alapján kapott tényleges szilárdsági érték;

$\sigma_{\text{maradék}}$ – az üzemeltetés, vagy a repülőgép ismétlődőterhelés - vizsgálatainak során keletkezett repedésekkel, törésekkel gyengült szerkezet maradék szilárdsági értéke.

A (3.1. összefüggés) feltételek, ha nem teljesülnek a repülőgép nem üzemeltethető tovább, addig, amíg a megfelelő konstrukciós változtatásokat, javításokat, munkálatokat el nem végezték.

2. A következő speciális feltétel a teherviselő elemek repült időhöz kötött ellenőrzésének megkezdése. Alapvetően itt a törzskeretekre és a főtartó bekötési csomópontokra kell gondolni. Különösen nehéz feladat ezen elemek első ellenőrzési időpontjának megválasztása, mivel a hozzáférés nagyban korlátozott és legtöbbször igen munkaigényes. A további ellenőrzések biztosítására ezért, az esetek többségében, utólagos technológiai szerelőnyílásokat kell kialakítani. A fenti szerkezeti elemek ezen kívül a repülőgép teherviselése szempontjából, a leginkább frekvenciált részei, amelyek ezért döntően meghatározzák a repülőgép össz-technikai üzemidejét.

Az első ellenőrzési időpont, és a további periodicitás megválasztásához meghatározó információk:

- a vizsgált fő teherviselő elemek repedései keletkezési időpontja;

¹⁰ 223. oldal

¹¹ 219; 220. oldal „Az anyag (vagy a szerkezet) kis frekvenciával, ismétlődő terhelésekkel szembeni ellenálló képességét statikus kifaradásnak, és azt a maximális feszültséget, amely esetén az anyag a terhelés ismétlődésének bármely ciklusszáma esetén sem törik el kifaradási határának, nevezzük,

¹² 309. oldal

- kezdeti hossza (l_0);
- a kritikus repedési hossz (l_{kr})¹³ elérésének időpontja;
- a repedés növekedésének sebessége (V).

Az l_0 , l_{kr} és a V értékei meghatározására alapvetően a gyártó által lefolytatott kísérletek és a repülőgép ismétlődőterhelés – vizsgálatait szolgálnak. Azonban elfogadható pontosságú értékeket, különböző számítási modellekkel is kaphatunk.

Az alapkérdés, hogy milyen repedéssel és meddig lehet biztonságosan üzemeltetni az adott erőátviteli elemet. Erre a legtöbb információt a **feszültség intenzitási tényező** adja (**Stress Intensity Faktor**) (továbbiakban **FIT**) (K_c). [1, 5, 7] [55]

A K feszültségintenzitási tényező nem anyagjellemző, hanem egy szilárdságtani feladat megoldásában szereplő valamennyi – feszültségkomponenseket leíró – egyenletben szereplő közös szorzótényező. Ha azonban valamely feszültség hatására a repedés terjed, tehát beáll a „c” indexszel jelölt kritikus állapot, akkor a K szorzótényező helyett K_c szerepel az egyenletben, amely az **Irwin és Orowan** által módosított **Griffith-féle** hipotézis alapján az anyagjellemzőkkel összekapcsolhatók (3.2; 3.3; 3.4) egyenlet). Az „1” index a törésmechanikában tárgyalt három terhelési eset közül az első. Itt a terhelőfeszültség a repedés irányára merőleges, a 2. esetben párhuzamos lehet, a 3. esetben pedig működhet merőlegesen a repedés terjedési irányára. [56]¹⁴

Síkbeli deformáció esetében, tehát amikor terhelőfeszültség a repedés irányára merőleges [60][64]¹⁵:

$$K_{lc}^2 = E G_c \quad (3.2)$$

Síkbeli feszültségi állapot esetében [60]:

$$K_{lc}^2 = (1-\nu)^{-1} \cdot E \cdot G_c \quad (3.3)$$

Ahol E - rugalmassági (Young) modulus;

ν - Poisson tényező¹⁶;

K_{lc} - az anyagban, terhelés hatására keletkező feszültségintenzitási tényező **kritikus** értéke, amelynél az anyag már roncsolódik;

G_c – a vizsgált anyag anyagtörési szívóssága, vagy másképpen a repedés terjedésével szembeni ellenállása, a fajlagos alakváltozási energia felszabadulásának mértéke (**Irwin-Orowan**), amely kifejezi az egységnyi hosszra, vagy felületre eső erőt a síkbeli deformáció körülményei között. A törési szívósság (δ) a feszültség intenzitási tényező kritikus értéke meghatározó módon függ az alkatrész vastagságától. Az anyagvastagság növelésével a törési szívósság nő a maximális értékéig és ezután esik a K_{lc} értékéig, ahonnan az anyagvastagság növelése ellenére állandó marad és fellép a

¹³ A repedés hossza, amely mértékével csökkent teherbíró elem keresztmetszetében keletkező feszültség eléri a minimális számított értékét. (töréshatár) $\sigma_{tényleges} = \sigma_{számított}$ ·

¹⁴ 274; 275. oldalak

¹⁵ 32. oldal

¹⁶ Poisson tényező: Egyirányú feszültségi állapotnál (húzott vagy nyomott) a keresztirányú és a hosszirányú alakváltozások viszonya.

síkbeli deformáció. Létezik egy optimális anyagvastagság (δ_{opt}), amikor a K_{Ic} értéke eléri a maximumot. [1;5;7; 42; 43] [62]

$$\delta_{\text{opt}} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{K_{\text{Ic}}}{\sigma_F} \quad (3.4)$$

Ahol σ_F - folyási határ, ahol megkezdődnek a nagyméretű maradó alakváltozások;

K_{Ic} - feszültségintenzitási tényező, amikor az anyag a síkbeli deformáció következtében roncsolódik;

A feszültségintenzitási tényező (FIT) felírható másképpen is (IRWIN):

$$K_c = \sigma_c \cdot \sqrt{\pi \cdot l} \quad (3.5)$$

Ahol l – a repedés mérete.

Amennyiben a repedt alkatrész méretei a repedés szélességével is korlátozva van (b):

$$K_c = \sigma_c \cdot \sqrt{\pi a} \cdot Y\left(\frac{l}{b}\right) \quad (3.6)$$

Ahol $Y(l/b)$ – mértékegység nélküli szorzószám (repedési méretviszony)

A leggyakrabban használt terhelési formák feszültség-intenzitási tényezői és a hozzájuk rendelt repedési méretviszonyok $Y(l/b)$, az anyagok szakító szilárdsági σ_B , és folyási határértékei σ_F , valamint az optimális lemezvastagsági értékeket δ_{opt} 3.1 táblázatban foglaltam össze. [5,7] [15]¹⁷

Feszültségintenzitási tényezők (FIT), és szilárdsági mutatók

3.1 táblázat

Vizsgált anyagok:	σ_B	σ_F	K_{Ic} (FIT)	δ_{opt}
	MPa	MPa	MPa m ^{1/2} (Nm ^{-3/2})	mm
30HGSZA	1200	950	328...418	3,8...6,2
30HGSZNA	1500	1300	270...300	1,4...1,7
EI643	1900	1500	165...200	1,4
VNSZ-2US (hidrogén 0,02 cm³ /100g)	1300	880	460...550	8,8...12,4
VNSZ-2US (hidrogén 0,03cm³ /100g)	1340	940	460...550	7.6...10,9
D16T	450	300	95...151	3,2...8,1
V-95T	500	450	68...130	0,7...2,7
V-93	460	440	120	2,4
AKCS-1	400	300	63...157	1,4...8,7
AK-6	350	250	94...130	4,5...8,6
AK-8	350	250	72...109	2,6...6,1
VAD-23	550	500	58...115	0,4...1,7

¹⁷ 118. oldal

A 3.4 – 3.6 egyenletek alkalmazásával kiszámíthatók olyan rendkívüli fontos adatok, mint:

- a repedés megengedhető mérete, amikor a szilárdság még csak olyan mértékben csökken le, hogy az még nem eredményezi az anyag roncsolódását;
- az adott repedt konstrukciós elem szilárdsági tartaléka;
- a repedt keresztmetszetben megengedhető üzemeltetési terhelések stb.

3. A harmadik speciális feltétel az ellenőrzések periodicitásának meghatározása, aminek feltételei:

- a repedések kiinduló méreteinek megbízható megállapítása;
- roncsolásmentes ellenőrzések megbízhatósága, alkalmazhatósága;
- a repedések növekedési sebessége meghatározására alkalmazott számítási modell megbízhatósága.

Az ellenőrzések periodicitásának meghatározására szolgáló, kísérleti tapasztalatokon alapuló számítási módszerek a repedések növekedési sebességének meghatározására szolgáló egyenletek integrálásán alapul. [15]¹⁸

A mai gyakorlatban, és magam is, az anyagfáradásból adódó repedések növekedési sebességét a **Paris-Erdogan** egyenlet alapján határoztam meg.

$$V = \frac{dl}{dN} = C \cdot (\Delta K_I)^m \quad (3.7)$$

Ahol - m; C anyagállandók [42]¹⁹[63]²⁰

$$C = 10^{-10} / \text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$$

$$m = 2-4$$

$\Delta K_I = K_{I\max} - K_{I\min}$ - feszültségintenzitási tényezők különbsége;

$$K_{I\max} = \sigma_{\max} \cdot \sqrt{\pi l}$$

$$K_{I\min} = \sigma_{\min} \cdot \sqrt{\pi l}$$

$$\Delta K = \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi l}$$

$\Delta \sigma$ - a keletkezett feszültség kiterjedési tartománya;

l – repedés hossza;

A repedés terjedése akkor válik igazán veszélyessé, ha a repedés a növekedése során (Δl) eléri a kritikus (l_{kr}) hossz méretét, amikor már az anyag törése bekövetkezik. Így az élettartam vizsgálata szempontjából számunkra meghatározó, hogy a fáradási repedés hossza (l_f) kisebb legyen a kritikus értéknél ($l_f < l_{kr}$). [57]²¹

Ahol $l_f = l_0 + \Delta l$

¹⁸ 119. oldal

¹⁹ 35. oldal

²⁰ **c** – egy anyag kísérletileg megállapított repedésállósági jellemzője; **m** – törési szívóssági kitevő.

²¹ 35;36. oldalak

l_0 – a repedés kezdeti mérete

A kritikus repedéshossz, amely megfelel a maximális húzófeszültségnek ($\sigma = \sigma_{\max}$) az alábbi szerint számítható ki:

$$l_{kr} = \frac{K_{Ic}^2}{\pi \cdot \sigma_{\max}^2} \quad (3.8)$$

A repedés hosszának növekedését a Paris-Erdogan összefüggés segítségével, az anyagjellemzők és a terhelési ciklusszám ismeretében határozzuk meg:

$$\Delta l \approx \Delta N_{kr} \cdot (\Delta K_I)^m \quad (3.9)$$

Ahol a ΔN_{kr} – az a terhelési ciklusszám növekmény, amely hatására a (l_0) kezdeti repedés hossza eléri kritikus értékét (l_{kr}).

Ennek ismeretében a szerkezet várható élettartamát megkapjuk, ha a töréshez szükséges teljes ciklusszámot kifejezzük:

$$N_{kr} = \frac{1}{C} \int_{l_0}^{l_{kr}} \frac{dl}{(\Delta K_I)^m} \quad (3.10)$$

A $\Delta N_{kr} = N_{kr} - N$ különbséggel, ahol az N az aktuális terhelési ciklusszám, közvetlenül megbecsülhetjük a maradék (hátralévő) üzemidőt.

A ΔN_{kr} értékét, tehát azt a ciklus-számot, amely megfelel a repedés (kezdeti) l_0 –tól l_{kr} (kritikus) értékig történő növekedési idejének, azaz az alkatrész roncsolódásának, megkaphatjuk az alábbiak szerint is [15]²²:

$$\Delta N_{kr} = \frac{2}{(m-2) \cdot \pi^{m/2} \cdot C \cdot \Delta \sigma^m} \cdot \left[\frac{1}{l_0^{m/2} - 1} - \frac{1}{l_{kr}^{m/2} - 1} \right] \quad (3.11)$$

Bármilyen számítás után repülőgép teljes sárkányszerkezetét ismétlődő terhelési vizsgálatoknak kell alávetni. Az eredmények ismeretében a kritikus teherviselő szerkezeti elemek ellenőrzésének első időpontja és periodicitása már meghatározható úgy, hogy a kapott igénybevételi ciklusszámokat repült órákra vetítjük át. Ez csak úgy lehetséges, ha biztosított a repülőeszköz üzemeltetése során fellépő valós üzemi terhelések és az ismétlődő terhelési vizsgálatok, igénybevételek egymásnak való megfeleltetése (ekvivalenciája) ($N_{kr} \cdot K_{EKV}$), valamint az azonos szilárdsági normák figyelembevételével kiválasztott üzemidőt befolyásoló tényezők egyezősége (η). A repülésbiztonságát nem veszélyeztető üzemidő ($T_{bizt.üz.i}$), amely elérésénél még nagy valószínűséggel garantálható, hogy a szerkezeti elemek nem roncsolódnak, nem mennek tönkre, az alábbiak szerint határozható meg [15]²³:

$$T_{bizt.üz.i} = \frac{T_{közepes}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4} \quad (3.12)$$

²² 66. oldal

²³ 123. oldal

Ahol $T_{\text{közepes}} = N_{\text{Cikl}} \cdot K_{\text{Ekv}}$ - konstrukció közepes élettartama;

N_{Cikl} - a berepülések, anyagkifáradási vizsgálatok eredményeképpen megállapított bázis igénybevételi ciklusszám;

$K_{\text{Ekv}} = \frac{Q_{\text{repültidő}}}{Q_{\text{Cikl}}}$ - a vizsgálati programban meghatározott ciklusszáma és az üzemeltetés

tényleges repülési ideje közötti ekvivalencia (viszonyított) szám;

$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4$ a biztonságos üzemidőt befolyásoló tényezők;

$\eta_1 = 1-1,5$ - kifejezi a berepülési és más vizsgálati programok, valamint az üzemeltetés egymásnak való megfelelését;

$\eta_2 = 1-1,2$ - a kritikus ellenőrzési helyekre való hozzáférés lehetőségét (milyenségét) kifejező érték;

$\eta_3 = 1-2$ - az üzemeltetési feltételeket jellemző adatok megbízhatósági foka;

$\eta_4 = 3-5$ - a különböző konstrukciós elemek egymástól eltérő anyagfáradási határait kifejező érték;

A négy fenti elemből álló megbízhatósági tényező értéke változhat:

$\eta_{\min} = 3$ – tol $\eta_{\max} = 18$ -ig.

A biztonságos üzemidőt befolyásoló tényezők három csoportba sorolhatók:

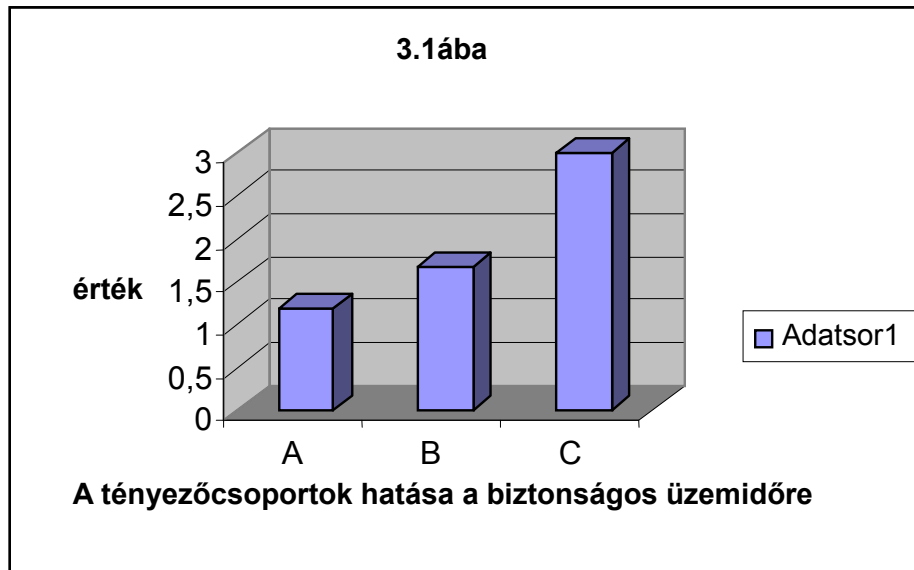
1. $\eta_2 = 1-1,2$ - az ellenőrizhetőség elősegítési mutató;
2. $\eta_4 = 3-5$ - a szilárdsági vizsgálatok mélységének növelési mutatója
3. $\eta_1 \cdot \eta_3 = 1-3$ - az üzembentartási feltételek pontosítását, kifejező mutató.

Hatásuk a repülésbiztonságot nem veszélyeztető biztonságos üzemidőre különböző

($T_{\text{bizt.üz.id.}}$) (3.12):

- az első 20 százalékkal növelheti a biztonságos üzemidőt ($T_{\text{bizt.üz.id.}}$);
- 66,66 százalékkal növelheti a $T_{\text{bizt.üz.id.}}$;
- **200 százalékkal növelheti a $T_{\text{bizt.üz.id.}}$.**

A adatokból megállapítottam, hogy a $T_{\text{bizt.üz.id.}}$ értékét a legnagyobb mértékben az üzembentartási feltételek befolyásolják . (3.1) ábra [1, 5, 15]



A $\eta_2 = 1 - 1,2$

B $\eta_4 = 3 - 5$

C $\eta_1 \cdot \eta_3 = 1 - 3$

3.1. ábra A tényezőcsoportok hatása a biztonságos üzemidőre

A sárkányszerkezet $T_{\text{bizt.üz.id}}$ értékének meghatározása után azt kell vizsgálni, hogy az esetlegesen sérült, repedt teherviselő szerkezetek és elemei hogyan képesek az üzembentartási feltételeknek megfelelni, és a repülésbiztonsági követelményeket is kielégíteni. Ennek érdekében folytatni kell az ismétlődő terhelési próbákat a repedések, sérülések megléte ellenére is. Értékelni kell a repedések növekedésének sebességét, aminek segítségével meg lehet állapítani azt az igénybevételi ciklusszámot, ahol a repedés már eléri kritikus mértékét.

Ezzel párhuzamosan meghatározható a már repedt konstrukció szükséges szilárdsági értékei azért, hogy $\sigma_{\text{maradék}} \geq 0,67\sigma_{\text{számított}}$ (3.1) feltétel teljesüljön. Ebben az esetben, a biztonságosnak tekintett üzemidőt, amikor a repedés eléri kritikus értékét, az alábbiak szerint kaphatjuk meg: $[1;5][15]^{24}$

$$T_{\text{bizt.üz.i. (0,67)}} = \frac{N_{0,67} \cdot K_{EKV.}}{\eta_V} \quad (3.13)$$

Ahol $N_{0,67} = N_{l_0} - \Delta N_{0,67}$ (lásd 66.oldalt!)

$$N_{0,67} = \frac{l_{kr} - l_0}{V} = \frac{l_{0,67} - l_0}{V}$$

l_0 - a repedés kezdeti hossza;

$l_{\text{krit}} = l_{0,67}$ - az a kritikus repedéshossz, amikor a szükséges szilárdsági tartalék két-harmada, azaz 67 százaléka a számított értéknek;

²⁴ 125. oldal

$N_{0,67}$ - ciklusszám, aminél elérjük a $l_{0,67}$ repedéshosszt;

N_{l_0} - ciklusszám, aminél az l_0 repedéshosszt érjük el;

K_{EKV} - a vizsgálati terhelési programban meghatározott ciklusszám és az üzemeltetés során repült, vagy ledolgozott üzemidő közötti ekvivalencia időt kifejező mutató;

η_v - a repedés fejlődési idejének hatását kifejező tényező.

Az ismételt terhelési próbák során a sárkányszerkezet erőátviteli, illetve teherviselő elemei szilárdsági tulajdonságait, a meghibásodások elleni érzékenységük megállapításához, szándékosan le kell rontani.

Lehetőségeink:

- az erőátviteli ill. teherviselő elemek kritikus keresztmetszetében speciális bemetszés alkalmazása;
- a bekötési csomópontoknál a csavarkötések számának lecsökkentése (csavarok kivétele).

Ezek után megismételjük az igénybevételi próbát, ami alapján már jó közelítéssel meghatározhatók a :

- repedésnövekedési sebessége;
- terhelési ciklusszám, amikor a meggyengített elem eltörik;
- üzemidő nagysága, amikor a szilárdsági elemekben keletkező repedés(ek) eléri(k) a meghibásodás elleni érzékenység szerinti kritikus értéküket ($T_{bizts.megh.}$).

$$T_{bizt.megh.} = \frac{N_{megh.} \cdot K_{EKV}}{\eta_{megh.}} \quad (3.14)$$

Ahol: N_{megh} - ciklusszám, ahol a meghibásodás elleni érzéketlenség szerinti repedéshosszt (l_{megh}) elérjük;

η_{megh} - a még meghibásodás elleni érzéketlenség tartományba tartozó repedés kialakulásának hatásait jellemző mutató.

A MiG-29 állapotszerinti üzemeltetésre történő átállást megelőző kutatások során a fent bemutatott szilárdsági feltételekkel vizsgálat folyt.

A repülőgép statikai és maradék – szükséges szilárdsági követelményeit már a repülőgép vázlatos terveinek kidolgozása során meghatározzák.[12] A feszültségintenzitási tényező (FIT) ismeretében és a kísérleti számítási modell valamelyikének alkalmazásával pedig a repedésnövekedési sebesség meghatározható:

- a szárny alsó, a törzs № 3. számú törzskeretéhez kapcsolódó panelban;
- a szárny № 1. számú főtartója alsó, a törzsbordához csatlakozó szelvényében.

A Paris-Erdogan számítási modell alapján általam is megkapott értékeket ezek után laboratóriumi kísérletekkel is igazolnunk kellett. **A számítások, és az igénybevételi próbák eredményei közötti 10 százaléknál kisebb eltérés a számítási modell alkalmasságát támasztja alá.** [15]²⁵

²⁵ 127. oldal

Ezután következhetett az ellenőrzési periódusok meghatározása (ΔT). A repedések megjelenéséhez tartozó igénybevételi ciklusszámokból levezethető ekvivalens üzemidők azt mutatták, hogy elegendő ellenőrizni [15]²⁶:

- a repülőgép borítását (a meglévő szilárdsági tartalék biztosításával $\sigma_{\max.üz.}$)

$$\Delta T \geq 40 \text{ óránként};$$

- a szárny főtartókat a repedések kritikus értékének eléréséig elegendő

$$\Delta T \geq 1100 \text{ óránként.}$$

A két kritikus elem repedéseit az üzemeltetési tapasztalatok szerint nagyon jól tudjuk ellenőrizni az operatív ellenőrzési munkálatok keretében is.

A 3.12 egyenlet alapján, a kezdeti, az állapot szerinti üzemeltetésre való áttérés keretében megállapított biztonságos üzemidő ($T_{\text{bizt.üz.idő}}$) nem más, mint a repülőgép **össztechnikai üzemideje**.

$$T_{\text{bizt.üz.idő}} = T_{\text{össztech.üz.idő}}$$

Ennek elérésekor a repülőgép további üzemeltetése tilos!

A nemzetközi gyakorlat is alátámasztja, hogy a kezdeti számított üzemidők az üzemeltetés folyamatában az üzemeltetési adatok és tapasztalatok nagy tömegének feldolgozása, kiértékelése után, általában növekedhetnek. Ezek az üzemidők a repülőeszköz teljes élettartama alatt többször is módosíthatók [2,4,15,27.]. Az üzemidő megnövelését befolyásoló tényezők:

- a teherviselő elemekről az üzemeltetés során kapott információk megbízhatósága és statisztikailag értékelhető mennyisége;
- az üzemeltetés során fellépő igénybevételek tényleges hatásai;
- a kísérleti terhelési feltételek valós terhelési viszonyokhoz történő sikeres megközelítése (ekvivalenciája).

Az utolsó feltétel teljesítése igen hosszú folyamat eredménye lehet csak, melynek sikeréhez az üzemeltetők tapasztalatai, így a Magyar Honvédségé is, és az általuk biztosított információk, mérési és ellenőrzési eredmények, analízisek meghatározó módon hozzájárultak.

A MiG-29 esetében a kritikus teherviselő és erőátviteli elemek biztonságosnak tekinthető üzemideje a fentiekből láthatóan több mint 1000 repült óra lett. **(A Magyar Honvédségnél napjainkban az első nagyobb ellenőrzés ideje 1000 órától már 1400 órára tolódott ki.)**

A repülőgép biztonságos üzemeltetéséhez a következő munkálatokat mindenképpen el kellett végeznünk:

- a №5. számú törzskeret fedélzeti panel megerősítése;
- a №7. számú törzskeret válaszfal és oldalsó panel megerősítése;
- a №3. számú tartály beerősítő fülcsei megerősítése;
- a №5. számú törzskerethez csatlakozó törzsborda megerősítése;

²⁶127. oldal

- a szárnyfőtartók alsó, borításokhoz csatlakozó övei megerősítése különös tekintettel a szárnyvégeken stb.

A sárkányszerkezet főbb elemeiben is az 1000 repült óra feletti üzemidők megfelelő szilárdsági tartalékait, illetőleg a megfelelő teherviselő képességet, üzemeltethetőséget a kísérleti igénybevételekkel sikerült igazolni [15]²⁷:

- törzs;
- szárny;
- stabilizátorok és bekötései;
- csűrőkormányok és bekötései,
- függőleges vezérsík,
- a törzs orr-része.

A szerkezeti elemekben tapasztalt főbb elváltozások:

A törzsben: - a №3. számú tartálypanel hegesztési varratain keletkeztek repedések, amelyeket hegesztéssel ki lehetett javítani. A komplex kísérleti igénybevételi program végén (amely kb. 5000 alapprogramból állt) a szilárdsági tartalék értéke a következő volt:

$$\sigma_{\text{stat.tart.}} = 0,74 \sigma_{\text{számított}} \geq 0,67 \sigma_{\text{számított}}$$

(Tehát a 3.1 számú egyenletben meghatározott feltétel teljesült.)

A szárnyon (3 alapeset vizsgálatának eredményei a javítás során megerősítést nyertek):

- a № 3. számú borda alsó panel és a szárnyfőtartó csatlakozása;
- ugyanezen elemek, de már gyengített összeerősítő csavarok beépítésével;
- a szériagyártás során megerősített szárnytartó elemek első és hátsó főtartók beépítésével.

A több mint 1800 alapprogram végrehajtása során sérülés, maradandó alakváltozás nem volt, repedések nem keletkeztek.

A már ismertetett összefüggés (3.14) segítségével elvégzett számításokat igazolták a kísérleti igénybevételek során kapott eredmények. Így megállapítást nyert, hogy

$$T_{\text{bizt.üz.idő}} \geq 1000 \text{ repült óra}$$

Még jobb eredményeket kaptunk a szériagyártás során megerősített szárny- főtartókkal szerelt első és hátsó elemek vizsgálata során. A szilárdsági tartalék ebben az esetben:

$$\sigma_{\text{stat.tart.}} = 1,12 \sigma_{\text{számított}}$$

A kísérleti igénybevételek során kisebb, csak a helyi szilárdsági viszonyokat befolyásoló, de a repülésbiztonságára jelentősen hatást nem gyakorló meghibásodásokat, mintegy harmincat, a közlönymunkák elvégzése során ki lehetett küszöbölni. Ilyenek például:

- a №9. számú törzskeret megerősítése;
- stabilizátorok csapágának cseréje;
- függőleges vezérsík felépítmény tartóelemének módosítása;

²⁷ 127; 129. oldalak

- a fékernyő csökazetta javítása (szükség esetén);
- a №3. számú törzskeret síkjában lévő alsó panel hegesztési varratának hegesztéssel történő kijavítása (szükség esetén);
- a №3. számú törzskeret síkjában lévő szívó csatorna beömlő nyílás felső panel javítása;
- alsó törzsféklap bekötés módosítása;
- a №7. és a №7G számú törzskereteket összekötő oldalsó panelek megerősítése;
- a hajtóművek tere válaszfalának megerősítése;
- № 2. számú döntött törzskeret profilfal megerősítése (gerinclemez);
- az orrfutómű gondola áramvonalazó lemezeinek módosítása;
- az orrfutókerék mozgató mechanizmus és rezgéscsillapító („Simmi”oldallengés csillapító) himbáinak szükség szerinti cseréje.

A tervezőirodánál a biztonságos üzemidők növelésére a kísérleti igénybevételek napjainkban is tovább folytatódnak. Az irányadó elfogadott érték [15]²⁸:

$$T_{\text{bizt.üz.i.}} = n \cdot 1000 \text{ óra}$$

Ahol $n = 3 - 5$ lehet

A korábbiakban már bemutattam, hogy az igénybevételi ciklusszám felhasználásával és a 2.18. és 2.19. összefüggések segítségével az üzemidőket meg tudjuk határozni. Az így kapott adatok és a kísérleti igénybevételek során rögzített értékek összehasonlítása után a két adathalmaz csak 10 százaléknyi eltérést mutatott, mint ahogy erre már korábban utaltam. Ugyanezen vizsgálatok a repülőgép borításán és egyéb erőátviteli elemein hasonló eredményekkel jártak. A kísérleti igénybevételeken túl itt is alkalmazni kellett az erőátviteli elemek és csomópontok esetében a speciális terhelési vizsgálatokat, mégpedig gyengített rögzítőcsavarok beépítésével illetőleg a csavarok számának lecsökkentésével. A szerkezetet a maximális terhelhetőség nagyságának **74 százalékával** következésképpen a 3.1. összefüggésben meghatározott feltételeknél nagyobb terheléssel ($\sigma_{\text{stat.tart.}} \geq 0,67\sigma_{\text{számított}}$) terhelték. A megnövekedett terhelés ellenére sem lehetett az erőátviteli szerkezetekben maradandó alakváltozást illetőleg töréseket tapasztalni. [15]²⁹ A szélesebb körű alkalmazás érdekében a kapott adatokat, így a meghibásodások elleni érzékenységet, a szerkezetek ellenálló képességét, az első ellenőrzésig lerepülhető és az össztechnikai üzemidőt, az ellenőrzések ciklusidejének meghatározását csak huzamos üzemeltetés során lehet majd megbízhatóan, hitelesen visszaigazolni. Az általam kiválasztott és alkalmazott számítási modell alapján magkapott eredményeket összevetettem gyár által rendelkezésre bocsátott kísérleti igénybevételi adatokkal. Ezek alapján és a már hosszú idő óta saját fejlesztésű ellenőrzési módszereink, eszközök terén elért eredményeink birtokában, javaslatomra a Magyar Honvédség először és úttörőként sikeresen végig vitte a repülőgépeink sárkányszerkezetén és fedélzeti rendszerein az állapot szerinti üzemeltetésre

²⁸ 131. oldal

²⁹ 131. oldal

történő átállás programját. A befejezés után hivatalosan is elindulhatott a repülőgéppark állapotszerinti üzemeltetése, így az elméleti elgondolásokat az elmúlt évek tapasztalatai és gyakorlata nagyrészt be is igazolt.

4. A REPÜLŐGÉP ÁLLAPOT SZERINTI ÜZEMELTETÉSÉRE KIVÁLASZTOTT KISZOLGÁLÁSI SÉMA ÉS ANNAK GAZDASÁGOSSÁGI MUTATÓI

A repülőtechnika állapot szerinti üzemeltetésére történő áttérése tervszerűen a gyártóval egyeztetett programunk szerint történt meg. A program főbb elemei³⁰ :

1. A technikai állapot meghatározása során elemeztük az időszakos vizsgák végrehajtását, a repülőgép színtezési eredményeit, a repülőgép dokumentációjának vezetését és annak előírásoknak való megfelelését, az egyes repülőgépek üzemeltetési sajátosságait, a sárkányszerkezet és berendezései vizsgálatának eredményeit stb.
2. Értékeltek a repülőgépek tényleges terhelését, igénybevételi állapotát (1 táblázat és 1 ábra)
3. Kockázatelemzés keretében vizsgáltuk a fedélzeti rendszerek és különböző berendezéseik meghibásodásának repülésbiztonságára való hatásait. Azaz kockázatelemzést hajtottunk végre, majd meghatároztuk az egyes rendszerek és berendezések kiszolgálási stratégiáját.
4. Felhasználva kockázatelemzésünk eredményeit a gyártó jóváhagyásával elkészült a korlátozott üzemidejű berendezések, blokkok, műszerek listája.
5. Mindezeket figyelembe véve meghatároztuk és a dokumentációba rögzítettük a technikai kiszolgálás módozatát és periodicitását.

A fentiekkel párhuzamosan a földi kiszolgáló eszközök, ellenőrző berendezések felsorolását pontosítottuk és meghatároztuk a minimálisan szükséges fogyó és karbantartó anyagok mennyiségét. Új technikai kiszolgálási dokumentáció vált szükségessé, ami a Magyar Honvédség üzemeltetési tapasztalatait is felhasználta. Ennek megfelelően az állapot szerinti üzemeltetés tervszerű kiszolgálása a következő elemekből tevődik össze:

- operatív technikai kiszolgálás, ami a repülés előtti, ismételt és repülés utáni előkészítéseket foglalja magába;
- periódikus ellenőrzések, melyeket a technikai állapot felmérések között kell végrehajtani;
- Célrányos átvizsgálások és ellenőrzések (amennyiben szükségesek);
- meghatározott üzemidők ledolgozása után végrehajtandó műszaki-technikai állapot felmérés, amit a szükség szerinti javító – helyreállító munkálatok zárnak le.

Az **operatív** kiszolgálási munkálatok mélysége és mennyisége az állapotszerinti üzemeltetés keretei között jelentősen lecsökkent, ezért a humán és egyéb erőforrás igénye a következő ellenőrzések ráfordításaival nem összemérhető.

³⁰ A felsorolás 1. és 3. alpontjában tárgyaltakat részletesen, a témában készült PhD értekezésemben fejtem ki.

A **periódikus ellenőrzések**, munkálatok tartalma:

- sárkányszerkezet átvizsgálása;
- a sárkány rendszerei és berendezéseinek ellenőrzése;
- szűrőberendezések tisztítása;
- fedélzeti rendszerek és berendezéseinek ellenőrzése, szükség szerinti besabályozása, az esetleges meghibásodások kijavítása.

A periódikus ellenőrzéseket minden 200^{+40}_{-20} repült óra vagy 24^{+4}_{-2} hónap után kell elvégezni, melynek humánerőforrás igénye 100 fő/óra, mely a gyakorlatban 2 nap alatt végezhető el. [15] ³¹

A **célirányos átvizsgálások** és ellenőrzések szükségességét a következők indokolják:

- időjárási és klimatikus viszonyok különbözősége, változékonysága;
- az üzemeltetés során felmerülő tervezési vagy gyártási hiányosságok;
- az üzemeltetési szabályok be nem tartása;
- az üzemeltetési állomány kiképzettségének foka, tapasztaltsága stb.

A **műszaki-technikai állapotfelmérések** és az azt követő javító - helyreállító munkálatok a technikai kiszolgálások rendszerében egy teljesen új elemként épülnek be. Ez váltja fel az eddigi gyakorlat szerinti gyári, nagy, közepes és profilaktikus javításokat, melynek a **legfőbb célja az ellenőrzés** és csak szükség esetén kell végezni a javító - helyreállító munkálatokat.

Az első ellenőrzésre javasolt üzemidő ciklus 1000 repült óra vagy 20 év. [15] ³²

A Magyar Honvédség MiG-29 típusú repülőgépei állapot szerinti üzemeltetésre történő áttérése óta a diagnosztikai képességeink magas színvonalának, felkészültségünknek és eredményeinknek köszönhetően ma már ez a ciklusidő 1400 órára nőtt. Ez 40%-os üzemidő nyereséget és jelentős erőforrás megtakarítást jelent. A **javító - helyreállító tevékenység** alapvetően javítás, nagy-javítás és az elemek, illetőleg berendezések cseréjéből áll. Ez csak úgy válhatott Magyar Honvédségnél, ezen belül is a Légijármű javítóüzemnél lehetővé, hogy az üzemeltető állományunk már hosszú ideje nem csak képes alkalmazni a korszerű roncsolásmentes anyagvizsgálati módszereket, diagnosztikai eszközöket, hanem fejleszti is azokat. Így megalapozott, kellő mélységű, nagy pontosságú és megbízhatóságú műszaki-technikai állapotfelméréseket végeznek, amit magas szintű javításokkal, helyreállítással képesek befejezni

Javító - helyreállító munkálatok:

- **ÁLLANDÓ**, ami a konstrukciós elemek cseréjét vagy javítását, a berendezések javítását akkor, ha elérték az aktuális hátralévő üzemidejük 80%-át, valamint a berendezések technikai állapotának felmérését jelenti. A kidolgozott munkapont felsorolást a gyártó határozta meg a „LIEDER” gépeink ellenőrzése, vizsgálata eredményei, az általunk tapasztaltak és javaslataink alapján.

³¹ 153. oldal

³² 154. oldal

- **VÁLTOZÓ**, ami döntően a műszaki-technikai állapot felmérések eredményeitől és az azok során tapasztaltaktól függ.
- **MODERNIZÁCIÓS**, módosító, helyesbítő munkálatok, közlönymunkák, innováció.

A technikai állapotfelmérés 180-200 fő/óra munkaráfordítással, 2-2,5 nap alatt hajtható végre, amit a szükségessé váló helyreállító munkálatok nélkül kell értelmezni. [15] ³³

Az állapot szerinti üzemeltetés két szinten valósul meg:

- **első szint** az operatív kiszolgálási formák, céllenőrzések melyeket az üzemben tartók (századok, egységek) végeznek el;
- **második szint** a periódikus kiszolgálási formák, állapotfelmérések és az ellenőrző – helyreállítási tevékenységek, amit a javító szervezetek, amit a Magyar Honvédség esetében a feladatra jól felkészült és felszerelt, „auditált” laboratóriumokkal rendelkező Légijármű Javítóüzem végez.

A véglegesített és javasolt üzembentartási séma összefoglalva:

- operatív kiszolgálások;
- céllenőrzések;
- a periódikus ellenőrzések 200 óránként vagy 24 hónaponként;
- a technikai állapotfelmérések:
 - 1000 óránál vagy 20 év után;
 - 2000 óránál vagy 25 év után;
 - 3000 óránál vagy 30 év után;
 - 3500 óránál vagy 35 év után.

Egészen **n•1000 óráig** vagy **n•10 év naptári üzemidő lejártáig**

Ahol az **n = 3-5** [15] ³⁴

Emlékeztetőül - az eredeti össztechnikai üzemidő 2500 óra vagy 20 év volt.

Gazdaságossági mutatók:

A MiG-29-es típusú repülőgépek állapot szerinti üzemeltetése gazdaságosságának értékelését az egy repült órára eső költségek összehasonlítása alapján végeztem el. Költségelemek:

- a kiszolgáló állomány személyi és bérköltségei;
- kenő- és üzemanyag költségek;
- az üzemképesség fenntartásának, biztosításának költségei;
- a földi kiszolgáló eszközök fenntartási költségei.

A különböző üzembentartási filozófiák egy repült órára jutó költségeinek összehasonlítását az 4.1. számú táblázatban és az 4.1. számú ábrán mutatom be. [15] ³⁵

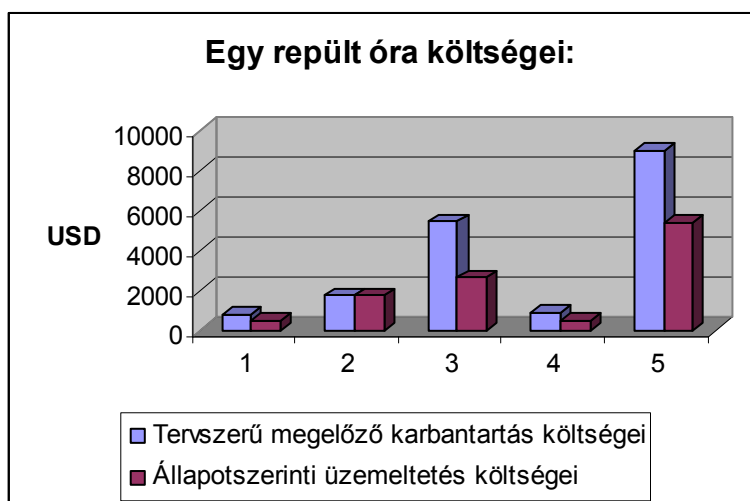
4.1 táblázat

³³ 156. oldal

³⁴ 166. oldal

³⁵ 158. oldal

Költségelemek megnevezése	MiG-29 egy repült órára eső költsége:				A költségek csökkenése %-ban
	Tervszerű megelőző karbantartás költségei		Állapotszerinti üzemeltetés költségei		
	USD	Összköltség %-ban	USD	Összköltség %-ban	
a személyi állomány bérköltségei	813	9, 3	491	9, 0	39, 6
a kenő és üzemanyagköltségek	1767	19, 7	1767	32, 6	0, 0
az üzemképesség fenntartásának költségei	5444	60, 8	2657	49, 0	51, 2
a földi kiszolgáló eszközök fenntartási költségei	920	10,2	497	9, 4	46, 0
ÖSSZESÍTETT KÖLTSÉGEK:	8944	100, 0	5412	100, 0	39, 5



Ahol:

1. a személyi állomány bérköltségei;
2. a kenő és üzemanyagköltségek;
3. az üzemképesség fenntartásának költségei;
4. a földi kiszolgáló eszközök fenntartási költségei;
5. **ÖSSZESÍTETT KÖLTSÉGEK.**

4.1 ábra A különböző üzemeltetési filozófiák egy repült órára jutó költségeinek összehasonlítása

Az 4.1. sz. táblázat és az 4.1. sz. ábrán látható, hogy az állapot szerinti üzemeltetésre való áttéréssel a repülőgépek üzemeltetési költségei közel 40%-kal csökkentek.

Az ipar javítások humán erőforrás igényének csökkenése, a közvetlen kiszolgálás egyszerűsödése következtében a személyi és bérköltségek 39,6%-kal lettek kevesebbek.

Az üzemképesség biztosításának költségei 51,2%-ot, a földi kiszolgáló eszközök fenntartási költségei pedig 46%-ot estek.

KIJELENTHETŐ, HOGY AZ ÁLLAPOT SZERINT ÜZEMBENTARTÁSI FILOZÓFIA BEVEZETÉSÉVEL AZ ÁTLAGOS KÖLTSÉGCSÖKKENÉS 34,2%-OT ÉRHET EL.

A költségek csökkenésének fő okai:

- a jelentős humán és materiális erőforrásokat igénylő ipari javítások megszüntetése, a megbízható ellenőrző és diagnosztikai eszközök és módszerek alkalmazása;
- a közvetlen kiszolgálási tevékenység egyszerűsítése a szükséges munkaráfordítások csökkentése;
- az ellenőrzések megbízhatósági szintjének növekedése lehetővé tette a javítás közti üzemidők megnövelését, ezzel a szükséges berendezés és elemcserék számának csökkenését.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Frolkov A.I.: A technikai kiszolgálási stratégia kiválasztásának kritériumai a programok meghatározásához. A repülőgép sárkányszerkezete állapotszerinti üzemeltetésének sajátosságai. Tudományos Módszertani Válogatások Állami Egyesített Kiadója. Kiadási szám: 75360; Moszkva 1993.
- [2] Vakuljuk V.I.: A repülőgép fedélzeti rendszerei állapotszerinti üzemeltetésének sajátosságai. Tudományos Módszertani Válogatások Állami Egyesített Kiadója. Kiadási szám: 75360; Moszkva 1993.
- [3] Gromov M.M. Légi Vizsgálatok Intézete: A különböző rendeltetésű harci repülőgépek állapotszerinti üzemeltetésre való alkalmasságának meghatározási módszertana. Tanulmány. Tudományos Módszertani Válogatások Állami Egyesített Kiadója. Kiadási szám: 75360; Moszkva 1993.
- [4] Gromov M.M. Légi Vizsgálatok Intézete: A harci repülőeszközök állapotszerinti üzemeltetésének helyzete. Tanulmány. Tudományos Módszertani Válogatások Állami Egyesített Kiadója. Kiadási szám: 75360; Moszkva 1993.
- [5] Frolkov A.I.: Katonai repülőgépek sárkányszerkezete élettartamának és üzemideje ledolgozásának értékelési módszertana az üzemeltetés során. A technikai kiszolgálási stratégia és az ellenőrzések periodicitásának kiválasztási kritériumai. Zsukovszkij Repülőmérnöki Akadémia „Technikai Tudományok Doktora” Tudományos értekezés. Tudományos Módszertani Válogatások Állami Egyesített Kiadója. Kiadási szám: 75360; Moszkva 1993.
- [6] Maslennikov V.G.: A manőverező repülőgépek sárkányszerkezete hegesztett elemei túlterheltség szintje alapján történő üzemidő meghatározás módszertana. Zsukovszkij Repülőmérnöki Akadémia „Kandidátusi” Tudományos értekezés. Tudományos Módszertani Válogatások Állami Egyesített Kiadója. Kiadási szám: 75360; Moszkva 1988.
- [7] David Brook: Az anyagsérülés mechanikájának alapjai. Tankönyv (Felsőfokú tanulmányokhoz) 1980.
- [8] Beda P.I.; Glazkov J.A.; Selihov G.S.; stb. A repülőtechnika üzemeltetése során elvégezhető alkatrész- defektoszkópia. Katonai kiadó („Vojenizdat”) folyóirata Moszkva 1978.
- [9] Kljuev V.V.: Roncsolásmentes anyagvizsgálat és diagnosztika. „Masinostroenie” kiadó Moszkva 1995.
- [10] Makarov V.A.; Hargaev V.M.: A szárnyak hajlító-nyomatékai ismétlődésének meghatározása. (MiG-29) Beszámoló jelentés № 1064-9.12-5/92 Moszkva.
- [11] Makarov V.A.: A Luftvaffe MiG-29 típusú repülőgépei túlterhelési szintjének elemzése. Beszámoló jelentés № 1073-9.12-1/2001 Moszkva.
- [12] Makarov V.A.: Regressziós modell a MiG-29 típusú repülőgépei túlterhelési szintjének kiértékeléséhez. Beszámoló jelentés № 1076-9.12-9/94 Moszkva.
- [13] Vizsgálatok a katonai repülőgépek üzemidő hosszabbítására. Tudományos cikk. „Aerokosmicseskije Novostyi” № 13 (168. oldal) 2000. március 22-23. Moszkva.
- [14] Smirnov A.A.; Ickovics A.A.: A repülőtechnika állapotszerinti üzemeltetése és javítása. „Transport” kiadó Moszkva 1987. (második átdolgozott kiadás).
- [15] Slobodskij A.B.; Eregin V.V. Mikojan tervezőiroda és az RSZK MiG beszámoló jelentés a HUAF (Magyar Légierő) Mig-29 repülőgépei állapotszerinti üzemeltetésre történő áttérés biztosításáról. Moszkva 2002. március 18.
- [16] A katonai repülőgépek technikai kiszolgálásával és javításával szemben támasztott általános követelmények. Az üzemeltetés jellemzői. Válogatás. Kiadási szám: 6405; Moszkva 1991.
- [17] Gromov M.M. Légi Vizsgálatok Intézete: A katonai repülőgépek fedélzeti rendszerei technikai kiszolgálásának, javításának tervezési módszertana. Moszkva 1985.
- [18] Barzilovics E.J.; Voskobojev V.F.: Repülőgép rendszerek állapotszerinti üzemeltetése. „Transport” kiadó Moszkva 1987.
- [19] Masayuki Ibusiki Aircraft Maintenance by means of Operation Monitoring System. Japan Soc. Aeronaut. and Spaces №333 1981.
- [20] Marks P.A. Design for Economy. „Aircraft Eng.” 53, № 3 1981.
- [21] Collin G. La maintenance des moteurs: des budgets très lourds. „Air et Cosmos” 18, № 846, 1981.
- [22] Depuis Jean Pierre stb On Condition Maintenance FMW Sveden; 1990.
- [23] Katonai repülőgépek legésszerűbb technikai kiszolgálási stratégiájának módszertani meghatározása. Második, átdolgozott kiadás (№ 6883); Kiadási szám: 75360; Moszkva 1995.

- [24] Repülőgépek és helikopterek sárkányszerkezete és hajtóműveik modern, az állapotszerinti üzemeltetési rendszerre történő áttérést elősegítő, technikai kiszolgálás módozatai. Tudományos kutatások eredményeit összefoglaló beszámoló jelentés. Kiadási szám: 75360; Moszkva 1993.
- [25] Dr. Jorge A. Moreno Barragan Engine Vibration Monitoring and Diagnosis Based on On-Board Captured Data. **NATO Symposium on AGING MECHANISMS and CONTROL Part: „Monitoring and Management of Gas Turbine for Extended Life and Reduced Costs”** Manchester 2001. október 08-12
- [26] MC Gowan; Reither Livier; Depuis jean pierre; Takeda Nobuo stb . Structural health monitoring methodology for aircraft condition-based maintenance. 1992.
- [27] Shah Jivan B. Failure Analyses of Aircraft Accidents Part II. Metals Eng. Quart. 1974 №14p.4
- [28] Keba I.V. Repülőeszközök Gázturbinás Hajtóművei Diagnosztikája „Transzport”1988 [29] N.N. Szmirmov A repülőtechnika állapotszerinti kiszolgálása és nagyjavítása „Transzport” Kiadó Moszkva 1987.
- [29] Parányi György Minőséget gazdaságosan Műszaki Könyvkiadó 1999.
- [30] Kemény Sándor Statisztikai Minőség Műszaki Könyvkiadó 1999.
- [31] Dr. Keszthelyi Gyula A hatásalapú műveletek logisztikával szemben támasztott újszerű kihívása Doktori (PhD) értekezés 2008.
- [32] Dr. Turcsányi Károly A fegyverzeti eszközök tervezői, üzemeltetői és fenntartói követelmények és feltételek rendszerének részletes elemzése Doktori (PhD) értekezés
- [33] http://www.mtt.bme.hu/oktatas/segedanyagok/anyagszerkezettan_es_anyagvizsgalat/gyakorlat/toresmechanika.pdf
- [34] http://www.anyagvizsgaloklapja.hu/UserFiles/File/2008/2/e_AVL_2008_2_06_Szucs.pdf
- [35] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Poisson-t%C3%A9nyez%C5%91>
- [36] http://gt3.bme.hu/oktatas/BsC/GEAGG1_Gepelemek_1/labor.pdf
- [37] <http://www.sze.hu/am/oktatas/letoltendok/laborgyakorlat/Mechanika-Szilardsagtan/Nyulasmeres/Nyulasmeres.pdf>
- [38] http://doapc14.iit.uni-miskolc.hu/education/EXPERT/G9/g9_1.pdf
- [39] <http://mek.oszk.hu/01100/01183/01183.pdf>
- [40] <http://www.kfki.hu/~anyag/tartalom/2000/jul/aktualis/LukacsJanos-m.htm>
- [41] http://www.mtt.bme.hu/oktatas/segedanyagok/anyagszerkezettan_es_anyagvizsgalat/gyakorlat/megoldott_feladatok.pdf
- [42] <http://free.x3.hu/turbowin/sze/info/BMEmech2.pdf>
- [43] <http://vmek.oszk.hu/01100/01177/01177.pdf>
- [44] <http://www.eolss.net/outlinecomponents/Thermal-Mechanical-Energy-Conversion-Engines-Requirements.aspx>
- [45] <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bhu/hun/02-applications/01-wear-tribology/indexW3DnavidW263.php>
- [46] <http://www.muszeroldal.hu/measurenotes/rontgen.pdf>
- [47] <http://mek.oszk.hu/01100/01189/01189.pdf>
- [48] http://www.nyime.hu/fileadmin/dokumentumok/fmk/tgyi/letoltesek/jegyzetek/minosegtervezes/hibamod_es_hatatelemzes_2.pdf
- [49] „VÉGVÁR” Kutatás-fejlesztési program AID 250/996 (Olajok aktivációs analitikai, tribológiai vizsgálata)
- [50] Endrőczy Gábor (CEAT Kft) „SINUS”; MiG-21; MiG-23, később a „RÉVHÁZ” A MiG-29, kutatás-fejlesztési program összefoglaló dokumentáció 2003. november “A Rezgésdiagnosztikai MÉRŐ és Elemző Rendszer MIG-29 Típusú Repülőgépek RD-33 típusú Hajtóművei Műszaki Állapotának Meghatározására”
- [51] Kavas L. – Dr. Békési L. – Vonnák I. P.: Roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek alkalmazásának tapasztalatai “Új évezred, új technológia” Tudományos konferencia, Szolnok, ZMNE BJKMK RMI, 2006. április 21. (CD adathordozón kiadva)
- [52] Gyenes G.-Svehlik J. A roncsolásmentes anyagvizsgálatok (Non-Destructive Evaluation) szerepe és jelentősége a légijárművek állapotfelmérésében, üzemidő hosszabbításában és állapotszerinti üzemeltetésében “Új évezred, új technológia” Tudományos konferencia, Szolnok, ZMNE BJKMK RMI, 2006. április 21. (CD adathordozón kiadva)
- [53] Parányi György Minőséget Gazdaságosan Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1999 ISBN 963 16 30331; ISSN 1419-4376
- [54] Dr Rohács József; Simon István Repülőgépek és Helikopterek üzemeltetési zsebkönyve Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1989 (ISBN: 963 10 714 7)
- [55] Dr. Gillemot László Anyagszerkezettan és Anyagvizsgálat Tankönyvkiadó, Budapest. 1976 (ISBN 963 17 1670 8)
- [56] http://www.mtt.bme.hu/oktatas/segedanyagok/anyagismeret/eloadas/tores_ais_09.pdf (2010. márc.)
- [57] <http://free.x3.hu/turbowin/sze/info/BMEmech2.pdf> (2010 február)