

Svehlik János mk. alezredes, főiskolai docens:

#### KÁROSODÁSI VIZSGÁLATOK - ÜZEMIDŐHOSSZADÍTÁS

A legújabb kifáradási kutatások eredményei, a fémfizika és a kontinuummechanika módszereinek alkalmazása lehetővé tették a kifáradási károsodás folyamatának alaposabb megismerését. Ezt a lehetőséget - amennyiben még alkalmas mérési eljárással, adatfeldolgozással és értékelési módszerrel is párosítható - kár lenne kihasználatlanul hagyni. Különösen akkor, ha a lehetőséggel élve egy időben járulhatunk hozzá adott gép - történetesen légi jármű - üzemi megbízhatóságának fokozásához és üzemeltetési költségeinek csökkentéséhez. Előbbi növekedése nyilvánvaló, ha folyamatosan ellenőrizhető és prognosztizálható az adott berendezés hátralévő üzemideje, vagy ami ezzel majdnem egyenértékű, annak mindenkorai üzemi szilárdsága. Egy ilyen fajta prognosztizálási lehetőségnek viszont egyenes következménye az üzemeltetési költségek csökkenése.

Tudvalevő, hogy a gépek, berendezések garantált élettartamát vagy műszaki üzemidejét még napjainkban is többnyire tapasztalati, statisztikai adatokra épülő becslések eredményeként adják meg. Ezek a becslések ugyan matematikai, valószínűségelméleti, illetve megbízhatóságelméleti alapokra épülnek, de éppen becslés jellegüknél fogva jelentős és indokolatlan mértékben "hagyják kihasználatlanul" az anyagot. Garantált üzemidejük lejártakor még többnyire bőszégesen elegendő üzemi szilárdsággal (jelentős hátralévő üzemidővel) rendelkeznek. Amennyiben azt az üzemidőt a becslésnél megbízhatóbb és objektívebb prognózissal ki tudjuk használni, az üzemeltetési költségek csökkenése nyilvánvaló lesz a megkövetelt megbízhatósági mutatók megtartása mellett.

Repülőcsapatainknál rendelkezésre állnak olyan "frekvencia", "amplitúdó" illetve "frekvencia-amplitúdó" üzemmódokon dolgozó ultrahangos defektoszkópok, amelyek alkalmasak lehetnek a forgószárnylapátok károsodási folyamatának megbízható figyelemmel kísérésére. Ennek érdekében a készülék lehetőségei, "képeségei" és a károsodási folyamatot leíró jellemzők változásai közötti kapcsolatot kell megtalálni.

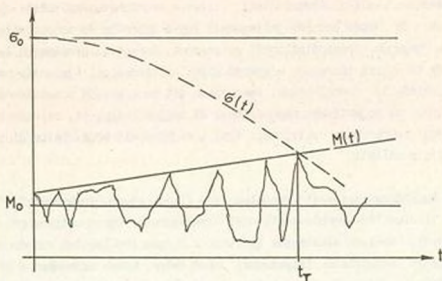
A kapcsolatkeresés legkézenfekvőbb módjának egy olyan fárasztóvizsgálat mutatkozik, melynek során párhuzamosan végezzük az anyagjellemzők értékeinek

effektív változását és a próbatetek ultrahangos ellenőrzését. Ezen mérés-sorozatokat közötti korrelációs tényezők lesznek azok a prognosztikai értékek, amelyeket az ultrahangos ellenőrzés szolgáltat. Azok a prognosztikai értékek, amelyek ismeretében a megkövetelt megbízhatóság mellett kitolható a forgószárnylapátok műszaki üzemideje.

Mindehhez természetesen őt kell tekintenünk azt az utat, azokat a lehetőségeket, amelyeket a kapcsolatkeresésben kihasználhatunk. A kutatások eredményei nyilvánvalóvá tették, hogy a károsodás mértéke igen szoros kapcsolatban áll a fáradt repedéssel. Megmutatták azt is, hogy maga a károsodás folyamata három - egymástól éles határral el nem választható, de jól megkülönböztethető - periódusra bontható:

- a fáradt repedés kialakulása;
- a fáradt repedés terjedése;
- a végső törés folyamata, illetve bekövetkezése.

Mindaddig, amíg a prognosztikai mutatót keressük, a folyamat mindhárom periódusát vizsgálnunk kell, hisz ennek eredményei adnak lehetőséget arra, hogy céljaink érdekében legizgalmasabb második periódusról bármikor megbízható képet adhassunk. Az ilyenfajta vizsgálat lényegét az 1.sz. ábra szemlélteti [1].



1. ábra

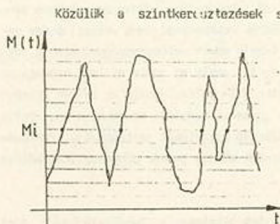
A  $G/t$  üzemi szilárdság az idő függvényében többnyire csökkenő tendenciát mutat, a ritka extrém terhelések bekövetkezésének valószínűsége pedig nő az üzemidő előrehaladtával. Vagyis adott valószínűséggel mindig várható olyan extrém (csúcs) terhelés  $M_c/t$ , amely az eddig észlelt legnagyobb terhelést meghaladja. Tehát bekövetkezésük valószínűsége az időnek növekvő függvénye. A szerkezet törése a két görbe metszésénél következik be, köztük lévő különbség pedig az üzemi szilárdság tartalékát szolgáltatja. Pontosan ez az érték az, amit ki kell jelezniük akkor, amikor prognosztikai mérést végzünk.

Ilyenfajta törési modell elvileg alkalmas a legáltalánosabb eset - rendszertelen terhelésű gépszerkezetek fáradási folyamata - leírására is. Miért fontos ez számunkra?

Vizsgálatunk tárgyának igénybevételai igen változatosak, melyeknek osztályozását több szempont szerint el lehet végezni, de legcélszerűbb a terhelést időfüggvénynek tekinteni. Mint ilyen, lehet időben állandó vagy időben változó. Előbbiről esetünkben szó sem lehet, hisz egyetlen körülfordulás során valamennyi azimuthelyzetben más és más terhelés hat. Utóbbi lehet szakaszosan vagy folyamatosan változó. Folyamatosan változóknak tekinthetjük a forgószárnylapátok terhelésfüggvényét, mégpedig állandó amplitúddal változóknak, ha állandósult üzemmódon eltekintünk a légköri turbulenciától. Csak egyetlen repülési feladat végrehajtása is állandósult üzemmódok sorozatából tevődik össze, ami miatt nem beszélhetünk állandó amplitúdójú, de a jelenlévő légköri turbulencia miatt még csak rendszerezett, változó amplitúdójú terhelésfüggvényről sem.

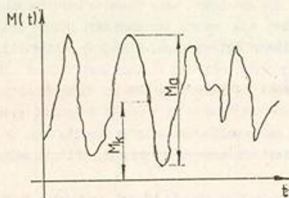
Mindent figyelembe véve tehát a vizsgálat tárgyát képező berendezés terhelése időben folyamatosan és rendszertelenül ugyan, de meghatározott periódusra szuperponálódva változó időfüggvény. Az igazsághoz akkor járunk legközelebb, ha jellegét tekintve stacionér illetve kvázi-stacionér terhelésfüggvényként kezeljük. Mint ilyennek számos terhelésjellemzője lehet.

A rendszertelen terhelés legfontosabb terhelési jellemzői: a terheléskép, a terheléscsúcsok, a statikus vagy kvázi-statisztikus középterhelés, a pillanatnyi terhelésamplitúdó ( $M_a$ ) és pillanatnyi terhelésközéptérték ( $M_k$ ), a terhelésváltozás frekvenciája, a szintkeresztezések száma, színgyakoriság illetve a terhelésváltozás  $M'(t) = \frac{dM}{dt}$  sebessége. Pontosabban ezek időbe-ni lefolyása.



2. ábra

A fárasztóvizsgálatok és kifáradáselmélet igazán használható alapjait  
a 3. ábrán szemléltetett pillanatnyi terhelésamplitudó ( $M_a$ ) és pillanatnyi



3. ábra

A fárasztás programját képező  
terhelésstatistikák összeállít-  
tásához tehát ezt a terhelés-  
jellemző-párt kell felhasznál-  
nunk.

A program tehát egy ilyenfajta terhelésstatistika birtokában adott  
lehet, de mely anyagjellemzők lesznek azok, amelyek értékei és a készülék  
jelzései közötti korrelációt keressük?

Ennek megválaszolásához vizsgáljuk meg a törés mechanizmusát:

Mint már arra utalás: tettem a folyamat három periódusra osztható. Az  
szolgálhatja eredményesen az anyagjellemzők kiválasztását, ha végigkövetjük  
e három periódust.

A fáradt repedés keletkezését illetően a megfigyelések azt mutatják, hogy az mindig felületről indul ki, és onnan terjed az anyag belseje felé. A felület alatt ebben az értelemben nem csupán az anyag külső, látható vagy tapintható felülete értendő, hanem az anyagban lévő folytonossági hiba (lunker, idegen zárvány, stb.) felülete is.

A repedés felületről történő kiindulása több okkal is magyarázható:

- az üzemelő szerkezetek igénybevétele rendszerint összetett, és szinte sohasem mentes csavarástól és (vagy) hajlítástól;  
Márpedig ez utóbbi igénybevételek éppen a felületen okozzák a legnagyobb feszültséget.
- a szerkezetek felületi szilárdsága az esetek nagyobbik többségében nem éri el az anyag belső részének átlagos szilárdságát (pl. dekarbonizált kőreg, megmunkálási nyomok, korrózió, stb. miatt);
- helyzetelen konstrukció vagy megmunkálhatósági követelmények okozta feszültségugrások, csúcsheszültségek a felületen a legnagyobbak;
- megmunkálások okozta bemetszések, horonyhatások mindig a felületen jelentkeznek.

Míndezeken túl a fáradt repedés kialakulásának általános, a diszlokációelméleten alapuló mechanizmusa is feltételezi a felületet. A fémek plasztikus alakváltozása a diszlokációk mozgásával, szaporodásával írható le [2]. A diszlokációk szaporodása Frank és Read által konstruált modell, a Frank-Read forrás segítségével magyarázható [3].

A forrásról növekvő feszültség hatására diszlokáció gyűrűk válnak le, maradé alakváltozást eredményezve. Ideális esetben a diszlokáció-forrás működéséhez szükséges feszültség

$$M = \frac{\alpha \cdot G \cdot b}{\zeta_0} / \left( 1 + \frac{1}{p} \right) \cdot \zeta_g \cdot n / \quad 1.$$

Ahol  $G$  az anyag csúsztató rugalmassági modulusa,  $\ell_0$  a diszlokáció-forrás jellemző hossza,  $b$  a diszlokációk Burgers-vektorának abszolútértéke, anyagállandó,  $n$  a forrásról levált gyűrűk száma és

$$\rho = \frac{R_1}{\ell_0} > 1, \text{ az } i\text{-edik gyűrű } R_1 \text{ sugarából számítható.}$$

Valóságos fémek kristályrendszerében a diszlokáció-források nem terjedhetnek zavartalanul. A levált és növekvő gyűrűk akadályokba - szemcsehatár, másik diszlokáció, stb. - ütköznek, feltorlódnak és növekvő belső energiájuk "befagyasztja" a forrást. Ilyenkor az előbbi összefüggéssel számíthatónál csak jóval nagyobb feszültség képes továbbra is működtetni a forrást, "komprimálni" a felgyülemlt gyűrűket. Az ilyen gátolt diszlokációforrások következtében az anyag üzemi szilárdságának csökkenése mellett fel is keményedik. A felkeményedés tehát valamiféle kapcsolatban áll a kifáradással.

A fárasztásnak kietett szerkezet legnagyobb helyi igénybevételű részén a diszlokációsűrűség a ciklusok számával rohamosan növekszik. A felületre kifutó, több forrásból érkező diszlokációgyűrűk okozta mikro-csúszások összetorlódása már a repedés kezdetét jelenti. A repedés kialakulásával tulajdonképpen a szabad felület vándorol az anyag belseje felé, miközben a feszültségkoncentráció révén új és új forrásokat hoz működésbe megszüntetve források működését korábban akadályozó gátat. A diszlokációgyűrűk kifutnak a felületre. A repedés terjedése tehát tulajdonképpen együtt jár egy helyi jellegű, képlékeny anyagváltozás végigvonulásával az anyagon.

A repedésterjedés mechanizmusa lényegét tekintve ugyanaz rendszertelen terhelés esetén is, de egymást véletlen sorrendben követő különböző nagyságú terhelésváltozások hatásának nyomkövetése a repedés terjedésében lehetetlen. Olyan rendszertelen terhelésnél, ahol a rendszertelenség időben állandósult (vagy ciklusonként annak tekinthető), a terhelés tehát stacionér, ergodikussá folyamatként kezelhető, a repedésterjedés sebességét időegységre vonatkoztatva definiálhatjuk és diagnosztikai paraméterként használhatjuk. (Az ilyen irányú felhasználás kutatásának jeles hazai képviselője dr. Gedeon József a BME Közl.mk.-i Kar Mechanika Tanszékének tudományos főmunkatőrsé.)

A mindenkori repedéshossz átlagos értéke 1 szerint a következő összefüggéssel adható meg:

$$\bar{\ell} = L_k \left( \frac{t}{T_k} \right)^m \quad 2.$$

ahol  $t$  az idő jellegű változó (lehet út vagy ciklusszám is),  $m$  a repedés-terjedési együttható,  $L_k$  kritikus repedésméret,  $T_k$  a kritikus repedésméretig eltelt idő (ledolgozott ciklusszám).

A terjedés sebessége:

$$\frac{d\ell}{dt} = \frac{m L_k}{T_k} \left( \frac{t}{T_k} \right)^{m-1} \quad 3.$$

A repedés jellegét alapvetően az  $m$  repedés-terjedési paraméter határozza meg. Értéke és az anyagjellemzők változása közötti kapcsolatot kell tulajdonképpen megtalálni a prognosztizálhatósághoz. Amennyiben:

- $m = 0$  - a repedés nem terjed,
- $0 < m < 1$  - a repedés-terjedés degresszív,
- $m = 1$  - a repedés-terjedés lineáris,
- $m > 1$  - a repedés-terjedés progresszív.

Az  $m$  az anyagminőségén túl függvénye a terhelésnek és a konstrukciónak is. Állandó amplitudójú terhelés esetén az  $m$  feszültségfüggvénye

$$m = c / M - M_0 / a \quad \text{formában adható meg,} \quad 4.$$

ahol:  $a$  és  $c$  anyagjellemzők ( $\rho$ ,  $f/R_M$  vagy  $f/R_A$  és pl.  $f/WR_C$ );  
 $a > 1$  és  $M_0$  az a határfeszültség, amely fölött a repedés terjedése megindul.

A repedés-terjedési tényező kísérleti meghatározása különböző konstrukciókra a 2. egyenlet logaritmizált alakjának segítségével történhet:

$$\lg \bar{\ell} = m \lg t + / \lg L_k - m \cdot \lg T_k / \quad 5.$$

Vagyis kétszeresen logaritmikus koordináta rendszerben a kísérletekben mért  $(\ell, t; t \approx N)$  értékpárok egyenest adnak, amelynek iránytangense éppen a repedésterjedési tényező:

$$m = \frac{\lg \ell_2 - \lg \ell_1}{\lg t_2 - \lg t_1} \quad 6.$$

Értékére vonatkozóan a szakirodalomak téjékoztató adatokat közölnek. [4] szerint szegecsel, bordázott repülőgép héjszerkezetre állandó amplitudójú terhelés esetén  $m = 0,35 \div 2,5$ , míg a repülőgép szárnyakon állandó amplitudójú és programozott terhelésnél  $m = 3,5 \div 15,5$ .

A repedt szerkezet sokáig nem képezte a mechanika, a törésmélet és a méretezések problémáját. Úgy vélték, a repedt szerkezet már nem használható, tönkrementnek tekintették. Vagy kijavították, vagy lecserélték. Nem biztos, hogy ez így jó, de biztos, hogy így a legköltségesebb. Ezért aztán fokozott mértékben kutatni kezdtek a repedés gyors terjedésének feltételeit, a repedt szerkezetek maradék szilárdságát. Griffith képlékeny anyagokra a következő összefüggést adta meg a repedés továbbterjedéséhez szükséges feszültségre, azaz a repedt lemez szilárdságára:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E}{c \cdot \pi \cdot \ell} \frac{dw}{dF}} \quad 7.$$

ahol:  $E$  - rugalmassági modulus,

$\ell$  - a repedés hossza,

$c$  -  $f/v, 1/$ , a geometriai viszonyoktól függő állandó,

$v$  - lemezvastagság,

$\frac{dw}{dF}$  - a töréshez szükséges összes energia a törés felületére  $/F = v \cdot \ell/$  vonatkoztatva.

Egyszerű megfontolásokkal is belátható, hogy egy sík lemeznél a repedéshossz  $\Delta \ell$ -lél való növekedése még nem határozza meg egyértelműen a szilárdságsüllykenés mértékét. Nagy repedés esetén  $\Delta \ell$ -lél való növekedés jóval kisebb szilárdságsüllykenést eredményez, mint egészen kicsiny repedéseknél.

Vagyis a lemez fajlagos szilárdságcsökkenése feltehetően fordítva arányos a repedéshosszal:

$$d\sigma = -c \frac{\sigma_0}{l} dl \quad 8.$$

ahol  $\sigma_0$  a sértetlen lemez eredeti szilárdsága.

Célszerűen választott integrálási paraméterrel a differenciálegyenletet megoldva kapjuk, hogy a lemez üzeni szilárdsága:

$$\sigma = \sigma_0 \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad 9.$$

Az összefüggésben  $l_0$  a lemez eredeti szélessége.

$l = L_K$  és  $\sigma = \sigma_0$  esetén:

$$c = \left[ \ln\left(\frac{L_K}{l_0}\right) \right]^{-1} \quad 10.$$

tehát  $c$  paraméter a kritikus repedéshosszt jellemző tényező.

A 9. összefüggés értelmében a fajlagos szilárdságcsökkenés akkor a legnagyobb, amikor a fáradt repedés kialakul, eléri az  $L_K$  kritikus repedéshosszt.

A kritikus repedéshossz már kimutatható szilárdságcsökkenést okoz a szerkezetben. A  $c$  paraméter, mint szilárdságcsökkenési tényező rendkívül fontos az élettartam, a törés megállapításában. Ezért rendezzük át a 9. kifejezést:

$\frac{\sigma}{\sigma_0} = -c' \lg\left(\frac{l}{l_0}\right)$  alakra, amiből látszik, hogy az összetartozó  $\sigma/\sigma_0$ ,  $l/l_0$  értékpárokat lin-log koordináta rendszerben ábrázolva egy olyan egyenest kapunk, aminek meredeksége

$$c' = \frac{c}{\lg e}, \text{ vagyis:}$$

$$c = - \frac{(\sigma/\sigma_0) \lg e}{\lg(l/l_0)} \quad 11.$$

Értéke szegecselt repülőgépszerkezetre, ha az 24 St ötvözetből készült és

$$\frac{L_K}{B} = 0,53, c = 0,346, \text{ illetve } 75 \text{ St ötvözet esetén } \frac{L_K}{B} = 0,043$$

mellett  $c = 0,32$ .

Míndezeket - márnint a repedésterjedésről és a törés kialakulásáról leírtakat - összevetve, 2. kifejezést a 9-be helyettesítve kapjuk az üzemi szilárdság időtől való függését:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \xi_n \left[ \frac{L_K \left( \frac{t}{T_K} \right)^m}{B} \right] \quad 12.$$

, illetve:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \left[ \xi_n \frac{L_K}{B} - m \cdot c \cdot \xi_n \left( \frac{t}{T_K} \right) \right] \quad 13.$$

Figyelembe véve, hogy  $\xi = L_K$  esetén  $L_K$  értelmezése alapján a 9. egyenletből:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 = \xi_n \left( \frac{L_K}{B} \right)^{-c} \quad \text{adódik, így a 12.}$$

kifejezésből a következőt kapjuk:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \left[ 1 - \frac{m \cdot c}{0,434} \xi_n \left( \frac{t}{T_K} \right) \right] \quad 14.$$

Éljünk a  $\sigma(t) = \sigma_0 [1 - K(t)]$  helyettesítéssel, s ekkor kapjuk, hogy

$$K(t) = \frac{m \cdot c}{0,434} (\xi_n t - \xi_n T_K), \quad 15.$$

illetve, a  $K(t) = \frac{\sigma_0 - \sigma(t)}{\sigma_0}$  -ként definiálható károsodási paramétert.

A 15. összefüggés megmutatja a károsodás függését  $m$ ,  $c$  és  $T_K$  paramétereiktől, ezáltal - és a károsodás mechanizmusának figyelembevételével - megállapítható, mely anyagjellemzőket kell a fárasztási program meghatározott szakaszaiban mérnünk, értékelnünk, illetve változásukat elemeznünk.

Ezek a paraméterek tehát tulajdonképpen a szilárdság, az ütőmunka, a keménység és a repedéshossz, illetve a repedésterjedés sebessége.

A vizsgálandó szerkezet rendkívül változatos és összetett igénybevétele miatt a szilárdsági jellemzők szinte mindegyikét mérni kell. Így szakító, hajlító, hajtogatós, csavaró és nyíró szilárdságot. A  $d\omega/dF$  miatt mérendő az ütőmunka, illetve a kifáradás mechanizmusából eredően az anyag keménységének változása. Mindezen jellemzőket mérve, az ultrahangos készülék jelzéseivel összevetett elemzés útján tehát eljuthatunk egy olyan prognosztikai jellemzőhöz, amely az üzemidőhosszabbítás megbízható és objektív alapját képezi.

#### FELHASZNÁLT IRODALOM

1. dr. Matolcsy Mótyás: Szerkezetek fáradt törése, élettartama, megbízhatósága.  
Kézirat, Bp. 1974.
2. Dr. Keszler - Dr. Győri: Anyagismeret és technológia I.  
Kézirat, Tk.K. 1979. Bp.
3. Kovács - Zsoldos: Diszlokációk és képlékeny alakváltozás  
MG.Kk., Bp. 1965.
4. Dr. Gedeon József: IAF-83-412 XXXIV. kongresszusi előadás  
IAF 1983. Bp.