Beszámoló a 3. FITNET szemináriumról

Módszerek a szerkezetek üzemelésre alkalmasságának megítélésére

Előzmények

Kiemelt társadalmi igény, hogy a civilizált közösségek számára nélkülözhetetlen termékeket előállító és szolgáltatásokat nyújtó, de potenciálisan veszélyes technológiai (például: olajfinomító, energiatermelő) rendszereket kiszolgáló különböző fémszerkezetek, például nyomástartó edények és csővezetékek, reaktortartályok, üzemben tartása biztonságos és környezetbarát legyen, mégpedig gazdaságosan.

A különböző fémszerkezetekben anyagfolytonossági hibák (mint például repedések és hegesztési hibák) mind gyártáskor mind pedig üzemelés közben is keletkezhetnek. Ezek egy része biztonságunk szempontjából kifejezetten veszélyes is lehet. Akár egyetlen alkatrész meghibásodása is emberi életeket fenyegethet és veszélyeztetheti a környezetet. Ezzel ellentétben bizonyos hibák a szerkezetben megtűrhetők egész élettartamuk során anélkül, hogy veszélyes meghibásodást okoznának. Az ilyen hibák kijavítása gazdaságilag sem kifizetődő és javításuk újabb hibák kialakulásához is vezethet.

Szerkezetek üzemelésre alkalmasságának (fittness-for-service – FFS) értékelésére kialakult, törésmechanikai elveken nyugvó módszerek lehetővé teszik – a korszerű roncsolásmentes vizsgálati és mérési módszerekkel kimutatott – anyagfolytonossági hibák veszélyességének a megítélését és a megfelelő döntés meghozatalát a szerkezetek további üzemeltetéséről, javításáról, cseréjéről, vagy selejtezéséről. Bár napjainkban több ilyen értékelési eljárás is létezik (például: API579, BS7910), szükség van egységes európai eljárási rend és nem utolsósorban egy európai szabvány (CEN) kidolgozására.

Ennek az igénynek a kielégítésére szerveződött egy európai hálózat, a FITNET (**Fit**ness-for-Service **Net**work – Üzemelésre Alkalmasság Hálózat), amely 2002 februárjában kezdte meg tevékenységét. Munkájukat részben az Európai Unió 5. Kutatási keretprogramja finanszírozza, és a németországi GKSS kutatóintézet koordinálja M. Koçak vezetésével. Európa 16 országából valamint Japánból, az Egyesült Államokból és Dél-Koreából egyetemi, kutatóintézeti és ipari szakértők – összesen mintegy hatvanan – vesznek részt a hálózat munkájában és járulnak hozzá korábban kidolgozott eljárásaikkal, ipari tapasztalataikkal és az azokat kiegészítő kutatásaik újabb eredményeivel az egységes eljárási rend kidolgozásához.

A FITNET projekt munkaprogramja:

- a jelenleg létező értékelési eljárások felülvizsgálata a törés, fáradás, kúszás és korrózió gyűjtőfogalmak, mint modul címek szerint rendezve, illetve az üzemelésre alkalmassággal összefüggő kiegészítő kutatások koordinálása;
- esettanulmányok és oktatóanyagok készítése;
- nyilvános szemináriumok és oktató workshop-ok megtartása;
- kapcsolat létesítése a CEN-nel a szabványosítás kérdésében.

A programban szereplő feladatokat négy munkacsoport dolgozza ki, mégpedig:

- WG 1: Fracture – Törés; koordinátor: S. Webster (Corus, UK);
- WG 2: Fatigue – Fáradás; koordinátor: J. J. Janosch (Cartepillar, Franciaország);
- WG 3: Creep – Kúszás; koordinátor: R. A. Ainsworth (British Energy, UK);
- WG 4: Corrosion – Korrózió; koordinátor: R. Koers (Shell, Hollandia).

Az EU új tagállamai közül Csehország, Lengyelország, Szlovénia és Magyarország is részt vesz a FITNET munkájában. Hazánkból a Bay Zoltán Kutatási Alapítvány Logisztikai és Gyártástechnikai Intézet (Bay-Logi) csatlakozott ehhez a szakmai hálózathoz elsősorban a Szerkezetintegritási Osztály munkatársainak közreműködésével.

A 3. FITNET szeminárium és poszter konferencia – Miskolc-Tapolca, 2005. október 19–21. – megszervezését a Bay-Logi vállalta annak ellenére, hogy ez nem szerepelt a munka- és költségtervében. Ám a helyszín kiválasztásában döntő szempont volt, hogy megkönnyítse a közép- és kelet-európai térségből származó mérnökök és kutatók részvételét a szemináriumon.

A szeminárium első és második napján a FITNET EU5 projekt által összefoglalt és alkalmazásra javasolt ***törési, kifáradási, kúszási és korróziós károsodások értékelési eljárásait*** mutatták be a projektben részvevő neves szakértők előadásaikban. A harmadik napon a résztvevők laboratóriumi foglakozás keretében ismerhették meg az alkalmazott mérési módszereket, és mintapéldákon elsajátíthatták a gyakorlatban a bemutatott értékelési eljárásokat. A szemináriumon a szakterület fiatal kutatói poszter előadás formájában bemutathatták és megvitathatták eredményeiket a meghívott előadókkal.

Az elhangzottak alapján összefoglaljuk az egyes modulokba foglalt értékelési eljárások lényegét, mégpedig a 2005. szeptemberi állapotnak megfelelően, hiszen a program szakértői még nem véglegesítették minden részletében ezeket.

Az üzemelésre alkalmasság megítélésének módszerei

Szerkezetek üzemelésre alkalmasságának értékelésére kidolgozott módszerek – a program értelmezése szerint – a hegesztéssel vagy a nélkül gyártott fémszerkezetekre vagy egyes elemeire vonatkoznak, amelyekben ismert helyzetű, valós (roncsolásmentes módszerekkel kimutatott) vagy feltételezett alakú és méretű anyagfolytonossági hibák vannak, és amely szerkezeteket meghatározott igénybevételnek kitéve üzemeltetnek.

Az értékelési módszerek tükrözik korunk kísérletekkel és ipari tapasztalatokkal alátámasztott műszaki tudományos elveit, és alkalmasak az egységes szemléletű gyakorlatot elősegítő szabványok kidolgozására. A módszerek felhasználhatók a fémszerkezetek tervezéséhez – anyagválasztás, ellenőrzés a feltételezett hibákkal –, gyártásuk során a nem kívánt hibákat lehetőleg elkerülő technológiák megválasztásához, a minőségbiztosítási követelmények kidolgozásához és teljesülésük ellenőrzéséhez, és nem utolsósorban üzemelésre alkalmasságuk megítéléséhez az első üzembe helyezéskor és – a kockázat alapú karbantartás részeként – az időszakos állapotellenőrzés észleléseinek értékeléséhez a biztonságos és környezetbarát üzemvitel társadalmi igényeit szem előtt tartva.

A fémszerkezetek várható élettartamát az igénybevételüktől függő anyagszerkezeti károsodások időben változó folyamatai határozzák meg alapvetően. Szerkezetek üzemelésre alkalmasságának értékelő módszereit (a továbbiakban: FFS módszerek) ezeknek a károsodási folyamatoknak alapvető sajátosságaik alapján, négy, ún. modulban tárgyalja a program, mégpedig: törés, fáradás, kúszás és korrózió megnevezéssel. Ezek mindegyike bemenő információként kezeli

- a károsodás mechanizmusát, megjelenési formáit;
- az elemzés tárgyát képező szerkezet geometriáját, méreteit;
- az üzemvitel feltételeit, az ún. elsődleges igénybevétel történetét lehetőleg feszültség-elemzéssel (a geometria, pl. bemetszés, hatására is kiterjedően) alátámasztva; de az ún. másodlagos igénybevételt is, külön tekintettel a gyártásból, a szerelésből (pl. hegesztés) eredő és visszamaradó feszültségekre; továbbá az üzemvitel, a technológia korrózióra hajlamosító feltételeit;

- a valós (roncsolásmentes módszerekkel kimutatott) és a feltételezett anyaghiányok jellemzőit: hely, típus [repedés(szerű), térfogati], alak, méret és a főfeszültséghez képesti irányítottság;
- az értékeléshez szükséges anyagtulajdonságokat, beleértve a környezeti hatásokkal szembeni, pl. korrózióállóság, anyagjellemzőket, illetve a szerkezet felületi kikészítésére (pl. érdesség) és védelmére (pl. bevonat) vonatkozó információkat is.

Mindezek meghatározására is részletes, alapvetően ismert, de jól rendszerezett módszertani útmutatást tartalmaz a dokumentum-tervezet.

Az egyes modulokon belül az üzemelésre alkalmasság megítélésére különböző, de egymásra épülő értékelési eljárásokat (szinteket) ajánlanak az értékeléshez szükséges bemenő adatok minőségétől és mennyiségétől függően. De, ha a viszonylag kevés információra alapozott eljárási szinten nyert konzervatívabb eredmény alapján a szerkezet üzemelésre alkalmas, akkor a magasabb szintű, kevésbé konzervatív eredményt adó eljárás szerint is az. Fordítva viszont ez nem igaz, azaz ha az alacsonyabb szintű eljárás szerint a szerkezet üzemelésre nem alkalmas, akkor, a részletesebb vizsgálatra alapozott bemenő adatokkal dolgozó, magasabb szintű eljárás szerint ugyan az a szerkezet üzemelésre alkalmas lehet. Ez lehetőséget ad a kockázat alapú karbantartási rendszert alkalmazóknak arra, hogy az értékelés alá vont szerkezet biztonsági kockázatának ismeretében döntést hozzanak a magasabb szintű értékelés alkalmazásáról, amelyhez viszont csak nagyobb idő- és költségigényű vizsgálatokkal nyerhetők az értékeléshez szükséges bemenő adatok.

Természetesen a valóság esetenként átlépi az osztályba sorolásunk szempontjait. Ezért az egyes modulok FFS módszereinek használata előtt alapvető jelentőségű az anyaghiányok keletkezési okainak a meghatározása anyagvizsgálati módszerekkel – az igénybevétel és a környezeti hatások figyelembevételével, pl. a repedés anyagfáradás vagy interkrisztallin korrózió következménye-e. A modulok közötti átjárhatóság ezen alapul, és az egyes értékelési módszerek folyamatábrái ezekre az elágazásokra fel is hívják figyelmünket. Sőt a dokumentumtervezet részletesen tárgyalja az alternatív megközelítés és a specifikus alkalmazások módszereit is, csakúgy, mint az értékelés jegyzőkönyvezését.

A modulokban közölt értékelési eljárások a szerkezetek anyagát tekintve az ötvözetlen és ötvözött szerkezeti acélok teljes körére, valamint a szerkezeti alumíniumötvözetekre érvényesek [mellőzve hőkezelési állapotukra, anyagszerkezetükre való egyértelmű utalást, amely mechanikai jellemzőiket és elsősorban növelt hőmérsékletű üzemben – élettartamukat is alapvetően befolyásolják(!) – *a szerkesztő*], beleértve a hegesztésükhöz használt anyagokat, figyelembe véve a hegesztéssel járó, az alapanyagtól eltérő tulajdonságokat is. Ez utóbbira bevezették a varratanyag (w) és az alapanyag (B) folyáshatárának viszonyát: $M = \sigma_{yw} / \sigma_{yB}$, és ha $M < 0{,}9$ vagy $M > 1{,}1$ akkor módosul az értékelés (ún. Mismatch eljárás). Viszont a modulok nem alkalmasak a szerkezetek képlékeny összeomlása feltételeinek a meghatározására.

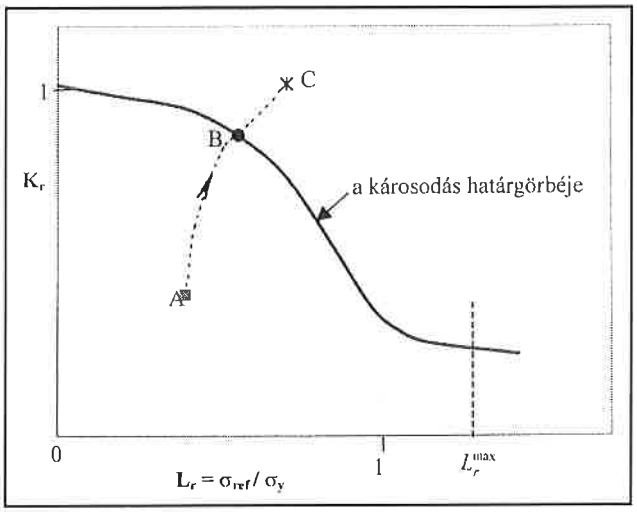
A Fracture – Törés modul jellemzői

A modul kvázi statikusan terhelt, repedésszerű anyagfolytonossági hibá(ka)t (a továbbiakban, ha nem nevezzük meg, akkor repedést) tartalmazó fémszerkezetek üzemelésre alkalmasságának megítélésére szolgál. Ezek a szerkezetek környezeti atmoszférában és hőmérsékleten vagy attól mérsékelten eltérő hőmérsékleten üzemelnek (azaz a szerkezet anyagának kúszása elhanyagolható).

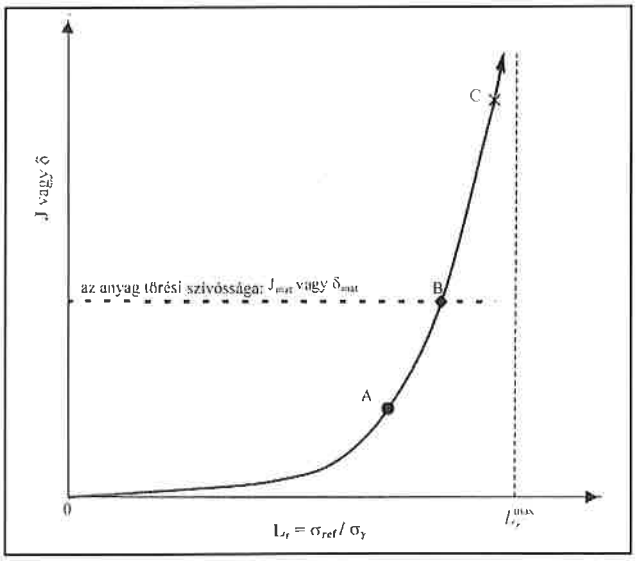
Alapelve, hogy a szerkezet törése azáltal fog bekövetkezni, hogy a kvázi statikus terhelés hatására a repedés növekedésnek indul, mivel a repedés csúcsának környezetére jellemző törésmechanikai paraméterek (K_I feszültségintenzitási tényező, vagy a J-integrál, a δ repedéscsúcs kinyílása) értékei meghaladják a szerkezet anyagára jellemző kritikus értéket. A javasolt módszerekkel a meglévő, ismert alakú, méretű repedés kritikus méretre növekedésének feltételei is meghatározhatók.

A javasolt módszerek a rugalmas-képlékeny törésmechanika két egyenértékű megoldásra vezető eljárásán alapszanak, nevezetesen:

- *a károsodás-értékelő diagram* (failure assessment diagram) – a *FAD eljárás*on, amely egy dimenzió nélküli károsodási határgörbe, és amely a repedéscsúcs terhelésére és az anyag repedéssel szembeni ellenállására jellemző, lineárisan rugalmas feszültségintenzitási tényezők hányadosának, a $K_r = K_I/K_{IC}$ értékének változása a repedt szerkezet képlékenységére jellemző, a referencia feszültség és a folyáshatár viszonyszám, az $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_y$ függvényében (*1. ábra*); illetve
- *a repedés hajtóerejét elemző* (crack driving force) – *CDF eljárás*on, amely ugyancsak az L_r paraméter függvényében vizsgálja a repedéscsúcs igénybevételére jellemző törésmechanikai paraméter (a *J-integrál*, vagy a δ ill. *CTOD repedéscsúcs kinyílása* – crack tip opening displacement) értékét (*2. ábra*).



1. ábra. A FAD eljárás hibaértékelési elve; a szerkezet állapota A) üzemelésre alkalmas, B) határeset, C) üzemelésre nem alkalmas



2. ábra. A CDF eljárás hibaértékelési elve; a szerkezet állapota A) üzemelésre alkalmas, B) határeset, C) üzemelésre nem alkalmas

Mindkét eljárás szerint: amíg a repedt keresztmetszet üzemi pontja a repedéscsúcs növekvő terhelése ellenére a károsodási határgörbe (1. ábra), illetve az anyag repedéssel szembeni ellenállására jellemző J_{mat}, vagy δ_{mat} értékek alatt (2. ábra) marad, addig a szerkezet üzemelésre alkalmas állapotban van.

Az értékelő program megkülönbözteti az alsó és felső folyáshatárral, a Lüders-vonalak megjelenésével jellemzett ötvözetlen szerkezeti acélokat, valamint a hegesztett kötésben lévő repedések értékelésénél a

heganyag és az átmeneti zóna alapanyagtól eltérő mechanikai tulajdonságát.

A Fatigue – Fáradás modul jellemzői

A modul ciklikusan változó vagy ingadozó igénybevétellel terhelt, anyagfolytonossági hibá(ka)t tartalmazó vagy nem tartalmazó, hegesztéssel vagy a nélkül gyártott fémszerkezetek üzemelésre alkalmasságának megítélésére szolgál. Ezek a szerkezetek környezeti atmoszférában és hőmérsékleten vagy attól mérsékelten eltérő hőmérsékleten üzemelnek (azaz a szerkezet anyagának kúszása elhanyagolható).

A modul két alapvető feladat megoldására összpontosít:

a) A szerkezet nem tartalmaz roncsolásmentes módszerekkel kimutatható anyagfolytonossági hibákat, de az elemzés célja meghatározni a szerkezet kritikus keresztmetszeteiben a fáradás okozta lineáris károsodás-halmozódás mértékét (D), mégpedig a Palmgren–Miner-elv szerint:

$$D = \sum_{1}^{i=k} \frac{n_i}{N_i} \qquad (1)$$

ahol k a terhelési spektrum-blokkok száma a szerkezet szükséges élettartama alatt, N_i az i-edik terhelési spektrum-blokkhoz tartozó, ciklusszámban kifejezett élettartam, amely terhelési blokk a szerkezet szükséges élettartama alatt n_i ciklusszámmal fordul elő.

Ehhez a vizsgált keresztmetszetekre vonatkozóan meg kell határozni a fárasztó igénybevételnek megfelelő kifáradási élettartam Wöhler-görbéket. A terhelés összetettségétől függően ehhez három elemző programot dolgoztak ki, mégpedig:

- 1. programút: fáradáselemzés a névleges feszültségekkel;
- 2. programút: fáradáselemzés a feszültséggyűjtő bemetszések figyelembevételével;
- 3. programút: fáradáselemzés a helyi, nem-lineáris feszültség–alakváltozás alapján, azaz kisciklusú fáradás a Manson–Coffin-összefüggéssel értékelve.

E programok kidolgozásánál két tervezési filozófiát vettek figyelembe:

- A tervezett élettartam alatt az igen nagyszámú igénybevételi ciklus után sincs figyelemre méltó károsodás-halmozódás, azaz a kifáradási határ megállapításának esete.
- Az üzemi fárasztó igénybevétel feszültség- és igénybevételi ciklusszám-tartományában károsodás-halmozódással kell számolni.

b) Valós vagy feltételezett anyagfolytonossági hibák vannak a szerkezetben, és az elemzés célja meghatározni vagy a repedés(szerű) hiba kritikus méretre növekedésének lehetőségét (4. programút), vagy a térfogatszerű hiba viselkedését meghatározva végül is a szerkezet várható kifáradási élettartamát.

Ha a repedés(szerű) hiba nem a hegesztési kötésben van, akkor a program a repedésterjedés sebességét a (2) alakú Forman–Mettu-féle összefüggéssel számolja [IIW doc. XIII-1539-96] és a NAGRO szoftvert [IIW doc. XIII- 1819-00] használja.

$$\frac{da}{dN} = C\left[\left(\frac{1-f}{1-R}\right)\Delta K\right]^n \frac{\left(1-\frac{\Delta K_{th}}{\Delta K}\right)^p}{\left(1-\frac{K_{max}}{K_c}\right)^q} \qquad (2)$$

ahol C, n, p és q anyagállandók, f a kinyílás és a maximális feszültségintenzitási tényezők hányadosa, R a feszültséghányados (aszimmetria tényező) és ΔK_{th} a feszültségintenzitási tényező küszöbértéke.

Ha az (2) összefüggés nem használható, illetve a repedés a hegesztett kötésben van, akkor a Paris-féle összefüggéssel számolnak:

$$\frac{da}{dN} = A\Delta K^m \qquad (3)$$

ahol A és m állandók az anyagtól, a környezeti és alkalmazási feltételektől függően, beleértve, hogy a repedés a hegesztett kötésben van és visszamaradó feszültségek is terhelik. Az eljárás a BS7910 szabványt követi.

Ha a repedéscsúcsra számított ΔK értéke alatta van a küszöbértéknek, akkor a repedésterjedés elhanyagolható. A (3) differenciálegyenletet integrálva meghatározható a valós vagy feltételezett repedés modul szerint kritikus méretűvé növekedéséhez tartozó, ciklusszámban kifejezett élettartam.

A térfogati hibákat (pórusokat, nagyobb salakzárványokat) az 5. programút vagy a 4. szerint kezeli és konzervatív eredményt ad; vagy azt vizsgálja, hogy az adott méretű és alakú hibával a szerkezet a fárasztó igénybevétel alatt az instabil töréssel szemben még ellenálló marad-e.

A Fáradás modul speciális programja az ismétlődő gördülő terhelés okozta felületi (kontakt) fáradás értékelését tárgyalja.

A Creep – Kúszás modul jellemzői

A modul kúszó-fárasztó igénybevétellel terhelt, valós vagy vélt anyagfolytonossági hibá(ka)t tartalmazó vagy nem tartalmazó, hegesztéssel vagy a nélkül gyártott és növelt hőmérsékleten üzemelő fémszerkezetek üzemelésre alkalmasságának megítélésére szolgál. Ehhez egy átfogó értékelő programot használ, amely az igénybevételre, a hibákra, az anyagtulajdonságokra és a szerkezet számított viselkedésre vonatkozó bemenő információkkal – a kúszás-fáradás károsodási mechanizmusra alapozva – a valós vagy vélt hibáknak kritikus méretre növekedését elemzi a szerkezet tervezett élettartamát figyelembe véve. Ez az átfogó értékelő program könnyen átvihető más típusú feladatok megoldására is, mint

- adott üzemi élettartamot eredményező egyenértékű terhelések meghatározása;
- az első üzembe helyezéskor már meglévő méretű hiba növekedése az adott üzemi feltételek és élettartam alatt eléri-e vagy már meghaladja a még elfogadható legnagyobb méretet;
- a szerkezet alakjának (geometriájának), terhelésének és anyaga tulajdonságainak kombinációja úgy, hogy a meglévő repedés csúcsának viselkedése csak elhanyagolhatóan befolyásolja a szerkezet élettartamát.

Az átfogó értékelő program egyaránt alkalmazható a növelt hőmérsékletű üzemre tervezett szerkezet első üzembe helyezési és időszakosan felülvizsgált állapotai üzemelésre alkalmasságának megítélésére. Az időszakos állapotellenőrzéskor észlelt hibákhoz keletkezésük okának (kúszáseredetű-e) és becsült üzemidejének közlése értékes információ. A program folyamatos károsodás-halmozódással és repedésnövekedéssel számol, az igénybevétel-történetnek és jövőben várható menetének elemzése alapján figyelembe veszi a fáradás, illetve a kúszás dominanciáját is.

Az átfogó értékelő program abból indul ki, hogy az eredetileg makroszkóposan hibátlan szerkezetben a kúszó-fárasztó igénybevétel hatására a kristályhatárok mentén üregképződéssel és ezek egyesülésével végbemenő anyagszerkezeti károsodás eredményeként meghatározott t_i inkubációs időtartam alatt kialakul, rendszerint a szerkezet felületén, a főfeszültségre merőlegesen – már roncsolásmentes vizsgálatokkal is biztonságosan kimutatható – a_0 mélységű és $2c_0$ hosszúságú, közelítően fél ellipszis alakú repedés; (illetve már eleve, például gyártásból eredően létezik repedés a szerkezetben). Ettől kezdve a szerkezet élettartama a repedésterjedés törésmechanikai modelljeivel becsülhető.

A rugalmas-képlékeny törést okozó repedésterjedés leírásához az NSW-, a Nikbin–Smith–Webster-modellt (1986) alkalmazzák (lásd, pl. az Anyagvizsgálók Lapja 2002/4. számában a Czoboly at al. cikkét, pp. 103-110.; és a hozzászólást, pp. 110-113.). A modell szerint az $a + da$ repedésnövekedés úgy megy végbe, hogy a repedés csúcsát terhelő igénybevétel okozta, kezdetben kvázi rugalmas alakváltozás hatására (már az a_0 mélységű repedés tövében is) ébredő feszültségcsúcs és feszültség mező egy, a repedés terjedési irányába elnyújtott ellipszoid anyagtérfogatra összpontosuló kúszási képlékeny alakváltozással és az egyidejű megújulással folyamatosan lebomlik és átrendeződik az egy-

tengelyűként kezelhető σ_{ref} referencia feszültségre, miközben (a kristályhatárok menti üregképződéssel és egyesüléssel járó) kúszási károsodás helyileg kimeríti az anyag alakváltozó képességét. Az ehhez tartozó ε_f alakváltozás a helyi törés kritériuma. Ebben a repedés csúcsa előtti zónában – a modell szerint – az alakváltozás sebessége a Norton-féle hatványfüggvényt követi:

$$\dot{\varepsilon} = C\sigma^n \tag{4}$$

Ez esetben a $\sigma \equiv \sigma_{ref}$, amely a repedés terjedésével az (5) egyenlet szerint változik:

$$\sigma_{ref} = \frac{\sigma_{ref0}}{\left(1 - \frac{a}{v}\right)} \tag{5}$$

A (4) egyenletben C és n az anyagra jellemző állandók az igénybevétel állandónak feltételezett hőmérsékletén. Az (5) egyenletben a (felületi repedés esetén) a repedés mélysége és v a repedt szelvény eredeti vastagsága; míg a nulla indexű referencia feszültség, a már roncsolásmentes módszerekkel is kimutatható méretű repedéshez (pl., az említett felületi, a_0 mélységű repedéshez) tartozik, és – definíció szerint – az értéke az anyag folyáshatárával (a modul jelölésével: σ_y) arányos, mégpedig a tényleges (F) és a maradék keresztmetszet általános folyását okozó ($F_L(\sigma_y)$) terhelés hányadosával, azaz:

$$\sigma_{ref0} = \frac{F}{F_L(\sigma_Y)} \cdot \sigma_Y \tag{6}$$

A repedésterjedés sebessége pedig a (7) összefüggés szerint értékelhető:

$$\frac{da}{dt} = \frac{3}{\varepsilon_f}(C^*)^q \tag{7}$$

amelyben a C^* törésmechanikai paraméter – a J-integrál kúszási egyenértékűje – jellemzi a rugalmas-képlékeny anyagban terjedő repedés csúcsánál kialakuló zóna feszültség- és alakváltozás-mezőit. A C^* paraméter útvonalfüggetlen integráljának végeselem-módszerrel történő meghatározása helyett kielégítően pontos a (8) összefüggés használata:

$$C^* = \frac{K_I^2}{\sigma_{ref}} \cdot \dot{\varepsilon} \qquad (MPa \cdot m \cdot h^{-1}) \tag{8}$$

amelyben K_I a repedés mélypontján átmenő szelvényben a feszültségintenzitási tényező és $\dot{\varepsilon}$ a referencia feszültséghez tartozó kúszássebesség az adott t időpontban.

Továbbá összefüggés állapítható meg a (7) egyenlet q és a Norton-típusú (4) jelű feszültségfüggvény n kitevői között, mégpedig: $q = n/(n+1)$;

Mivel a repedésterjedés időtartamának jelentős részét képezi a (7) egyenlettel leírt, ún. II. szakasz, ezért valamely, a beépítéskor makroszkóposan ép szerkezeti elem töréséig tartó t_R élettartamának becsléséhez ez az összefüggés felhasználható. Ha azt figyelembe vesszük, hogy a C^* nemlineáris törésmechanikai paramétert leíró (8) egyenletben szereplő tulajdonságok mindegyike függ a repedés méretétől, de a kúszássebesség az időtől is függ, akkor belátható, hogy a (7) differenciálegyenlet nem oldható meg a változók szétválasztásával, de numerikusan mindig megoldható az $a_0 \le a \le v$ és a $t_i \le t \le t_R$ értékhatárok között és a szerkezet teljes várható t_R élettartama kielégítően pontosan becsülhető.

Az átfogó értékelő program, a hegesztett kötés jellemző zónáinak eltérő anyagszerkezetéből eredő mechanikai tulajdonságaira, valamint a visszamaradt feszültségre vonatkozó kiegészítő információk figyelembe vételével kezeli a hegesztett kötésben lévő repedéseket.

A modul már tartalmazza az idén bevezetett, a Fracture modulnál már tárgyalt FAD módszernek a növelt hőmérsékletekre kiterjesztett változatát a TDFAD (time dependent failure assessment diagram) eljárást. A kiterjesztéshez szükséges volt bevezetni az időtől függő kúszási szívósság törésmechanikai fogalmát.

A szerkezet repedt keresztmetszetét jellemző, dimenzió nélküli paraméterek:

$K_r = K_{I\,id} / K^c_{mat}$ és $L_r = \sigma_{ref} / \sigma^c_{0,2}$ ahol K^c_{mat} a szerkezet anyagának kúszási szívósságát jellemző, a $K_{I\,id}$ feszültségintenzitási paraméternek megfelelő anyagtulajdonság; a σ_{ref} a (6) szerint értelmezett referencia feszültség, míg a $\sigma^c_{0,2}$ a 0,2%-os képlékeny nyúláshoz tartozó feszültség az anyag átlagos, az értékelés időpontjához tartozó izokron feszültség–nyúlás diagramja szerint értelmezve az adott üzemi hőmérsékleten. A K^c_{mat} anyagjellemző értéke a szabványos kúszási repedésterjedési vizsgálatokkal határozható meg a Δa repedésnövekmény függvényében.

A TDFAD diagram K_r (L_r) károsodási határgörbéjét a következő összefüggés írja le az $L_r \le L_r^{max}$ tartományban ($L_r^{max} = \sigma_R / \sigma^c_{0,2}$; σ_R az adott időponthoz és hőmérsékléthez tartozó törési feszültség):

$$K_r = \left[\frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r\sigma^c_{0,2}} + \frac{L_r^3\sigma^c_{0,2}}{2E\varepsilon_{ref}}\right]^{-1/2} \tag{9}$$

amelyben E a Young-modulus és ε_{ref} a teljes nyúlás az adott időponthoz és hőmérsékléthez tartozó izokron feszültség–nyúlás diagram szerint a $\sigma_{ref} = L_r \cdot \sigma^c_{0,2}$ feszültségnél.

A Corrosion damage – Korróziós károsodás modul jellemzői

A modul feszültségkorróziót, korózziós fáradást és helyi falvékonyodást okozó üzemi körülmények között üzemben tartott, hegesztéssel vagy a nélkül gyártott fémszerkezetek üzemelésre alkalmasságának megítélésére szolgál az időszakos állapotellenőrzésekkor kimutatott korróziós károsodások értékelésére alapozva. Az ajánlott eljárások illeszkednek a szerkezet épségének (integritásának) vizsgálati rendjébe.

A feszültségkorróziós és a korróziós fáradási repedés értékelése előtt célszerű meggyőződni arról, hogy vajon az észlelt repedésnél, repedés(szerű) hibánál meghatározó-e a szubkritikus növekedés. Ha igen, akkor azt szükséges vizsgálni, hogy a szerkezet tervezett élettartama vagy két állapotellenőrzés közötti időtartam alatt a repedésnövekedés nem vezet-e a megengedetnél nagyobb méretre. Ehhez a lineárisan rugalmas törésmechanika jellemzőit használhatják, a feszültségkorróziós repedés értékeléséhez a K feszültségintenzitási tényezőt, míg ennek megváltozást, a ΔK értéket a korróziós fáradási repedés értékeléséhez és a Paris-féle (formailag a (3) képlet szerinti) összefüggést. Ám ezzel az egyszerű összefüggéssel a feszültségkorróziós repedésterjedés nem minden esetben írható le, különösen a küszöbérték környezetében lehet a számítottnál gyorsabb a növekedés. Az előrepesztett próbatestekkel a korróziós körülményeket szimuláló, szabványos vizsgálatokkal meghatározott K_{ISCC} sem bizonyult valódi anyagjellemzőnek. Küszöbértékként való használata ezért korlátozott. Egy szóval a Törés, illetve a Kifáradás modulok módszereinek alkalmazása korróziós viszonyok között nagy jártasságot, körültekintő elemzést igényel, beleértve az igénybevétel történet elemzését, mivel előfordulhat, hogy a korróziós károsodás a hosszabb üzemidő tört része (órák, napok) alatt is bekövetkezhet az üzemvitel átmeneti, nem tervezett zavarai miatt!

A helyi falvékonyodással járó károsodások értékelése. Lényeges az értékeléshez annak megállapítása, hogy a helyi falvékonyodást vajon korrózió, erózió, kavitáció vagy egyéb mechanikus hatás okozta-e. Ez a szükséges intézkedések megtételét alapvetően meghatározza. Ám a helyi falvékonyodások esetleges törésre vezető hatása már a hiba környezetében végeselem-módszerrel elvégzett feszültség- és alakváltozás-elemzéssel és a törésmechanika módszereivel jól megítélhető a szerkezet igénybevételeinek és a hibák geometriáinak az ismeretében. A modul a csővezetékre és a nyomástartó edényekre ad iránymutatást.

A témával kapcsolatban visszautalunk a Bay-Logi vezető munkatársainak lapunk 2003/1. számában „Végeselem-módszer alkalmazása csővezetékekben lévő korróziós hibák veszélyességének értékelésére" címen publikált tanulmányukra.

Lehofer Kornél