

Fémek kifáradási viselkedésének becsülő módszere az anyagfáradás disszipatív jellegének vizsgálatával

Cyclic life prediction method for metals via the analysis of dissipative nature of fatigue phenomenon

KOVÁCS László^{1,2}, TAKÁCS László^{1,2}

¹eCon Engineering Kft, 1116, Budapest, Kondorosi út 3, Tel: +36302937135, Email:

laszlo.kovacs@econengineering.com, Honlap: www.econengineering.com

²BME, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111,

Budapest, Műgyetem rkp. 3., T épület III. emelet, Tel: +36302937135,

Email: kovacs@pt.bme.hu, Honlap: www.pt.bme.hu

Abstract

The article presents a tool created for ANSYS Workbench Finite Element Engineering Software and the corresponding algorithm, which is able to predict the expected Low Cycle Fatigue (LCF) cycles to failure of a metallic material based on energetic considerations by calculating the accumulated entropy density. The theoretical background of this approach is novel and it represents a less known and utilised way of fatigue theories. It assumes that the damage accumulated in the critical feature of the component correlates with the energy dissipated during the deformation process which can be described by the increasing entropy-production. The main area of interest for this method is any engineering applications where the metallic parts are subjected to such cyclic loading which results in cyclic accumulation of plastic strain in the critical feature. According to the conventional fatigue theories this corresponds to the Low Cycle Fatigue (LCF) regime. As per to the research activity done in this field it can be assumed that the fatigue phenomenon occurs at a constant entropy-production level. This parameter is called Fatigue Fracture Entropy (FFE) and according to the theory it is supposed to be an independent material property that can be evaluated experimentally.

Keywords: low cycle fatigue, plastic strain, metals, entropy, ANSYS

Kivonat

A cikk tárgya egy, ANSYS Workbench vége-selelemes mérnöki szoftverbe beépülő modul, valamint az általa megvalósított algoritmus, amely fémes anyagok kisciklusú kifáradási ciklusszámának becsülését végzi energetikai, pontosabban entrópia alapon. A megközelítés elméleti háttere újszerű, a fémek kifáradás analízisének legújabb, még kevésbé vagy egyáltalán nem alkalmazott irányvonalát képviseli, miszerint az anyagban felhalmozódó károsodás korrelál a deformációs folyamat során disszipált energia, azaz növekvő entrópia-produkció értékével. A módszer alkalmazási területe minden olyan mérnöki alkalmazás, ahol fém alkatrészek olyan ciklikus, fárasztó jellegű igénybevételnek vannak kitéve, mely során a kritikus zónában plasztikus alakváltozás felhalmozódása, ezáltal kisciklusú kifáradás jelensége várható. A témában elvégzett kutatás feltételezi, hogy a kifáradás jelensége egy adott entrópia szinten bekövetkezik. Ez az ún. határentrópia az elmélet szerint független anyagjellemző és meghatározható kísérleti úton.

Kulcsszavak: kisciklusú kifáradás, plasztikus nyúlás, fém, entrópia, ANSYS

1. BEVEZETÉS

Fémek kisciklusú kifáradásának előrejelzésére számos megoldás ismert, amelyek már kereskedelmi szoftverekben is elérhetők. A napjainkban elfogadott legmodernebb megközelítés LCF (low cycle fatigue) számítás elvégzésére az ún. nyúlás alapú kifáradás számítás. A módszer lényege, hogy az alkatrész kritikus elemének élettartam számításához nyúlás amplitúdó – élettartam görbét veszünk alapul (Manson-Coffin-Basquin görbe [1], [3], [4]), amelyet aztán számos korrekcióval látunk el annak figyelembevételére, hogy az élettartam görbe illesztéséhez generált teszt próbatestek eltérhetnek az alkatrésztől felületi minőség, felület kialakítás, középfeszültség, feszültség-többtengelyűség, méret, feszültséggyűjtés stb. szempontból. Az élettartam a módosított nyúlás amplitúdó-élettartam görbéből kiolvasható, amennyiben ismerjük az alkatrész egyes pontján a ciklikus terhelés következtében kialakuló nyúlás amplitúdót.

Sok esetben bonyolult alkatrészek esetén a kritikus zóna bemetszésekben alakul ki, ahol lokálisan jelentős plasztikus alakváltozás halmozódik fel az ismétlődő ciklusokkal. Egy teljes alkatrész feszültségeinek plasztikus anyagmodellel való számítása nem mindig effektív, ha csak egy lokális zónát érint a kifáradás. A klasszikus nyúlás alapú kifáradás számító módszerek erre közelítő megoldásokat kínálnak, amelyek lineáris elasztikus feszültség eredményekből közelítik analitikus módszerekkel a várható nemlineáris feszültség és nyúlás értéket a bemetszésben (pl. Neuber [2] vagy Hoffmann-Seeger korrekció). A nyúlás alapú élettartam görbe, illetve az azon alapuló élettartam számítás részletes leírása megtalálható szakirodalomban (ld. [1], [3], [4]). A módszerek az elmúlt évtizedek alatt az egyes korrekciók, illetve elemzési módszerek fejlődésével folyamatosan finomodtak, így arra is lehetőség nyílt, hogy a mai érettségi fokon ezeket az eljárásokat a nagy mérnöki szoftver gyártók algoritmizálják. Ennek megfelelően napjainkban több kisebb felhasználói szoftver elérhető, amely a kis- és nagyciklusú kifáradási ciklusszám becslő eljárások algoritmizált formáját nyújtják. Ezek közül a leginkább holisztikus, valamint a nagy kereskedelmi végeelem módszer alapú, üzemi feszültség és alakváltozás számításra alkalmas mérnöki szoftverek eredményfájlijait feldolgozni képes alkalmazások az nCode, valamint a FEMFAT.

A fent említett szoftverek a korábban kifejtett klasszikus, nyúlás amplitúdó alapú élettartam számítási metódust követik, amennyiben kisciklusú kifáradás problémáról van szó, amelyben központi szerepet játszik a felhalmozódó plasztikus nyúlás. Megjegyzendő, hogy az inputként használt élettartam görbe járulékos korrekcióira éppen azért van szükség, mert a nyúlás alapú élettartam görbe nem általános megközelítése a problémának. Minden esetben ezek az input görbék csak pontosan olyan gyártású, alakú, méretű és feszültség állapotú alkatrészekre lesznek maradéktalanul alkalmazhatók, mint amiket az élettartam görbe megalkotásához használtak és ciklikus mechanikai tesztelésnek vetettek alá. Bár a módszer a gyakorlatban jól használható, a számos korábban említett korrekció vagy további, nehezen meghatározható paraméterek mérésrel történő meghatározását kívánja (pl. feszültséggyűjtés korrekció), vagy az alkalmazható eljárások közül a megfelelő kiválasztása kíván járulékos speciális méréseket (pl. középfeszültség korrekció esetén Morrow [5] vagy Smith-Watson-Topper korrekció [6] használata). További probléma lehet a lineáris elasztikus eredményekből Neuber korrekcióval történő nemlineáris nyúlás és feszültség amplitúdó becslés. Ezeknek az analitikus korrekcióknak a megbízhatósága korlátolt, csak mérsékelt feszültséggyűjtés és igen kis mértékű feszültség többtengelyűség esetén megbízhatóak. Amennyiben egy alkatrész üzemi feszültségállapota összetett (ami komplex geometria esetén szükségszerű), tehát az anyag belsejében több irányban is jelentősebb belső erők / nyúlások ébrednek, a fent leírt és általánosan használt módszerrel komoly dilemma, hogy melyik az a releváns irány, amelyben ébredő terhelés vezérli a kifáradási folyamatot és ezáltal determinálja a kialakuló fáradásos repedés síkját. A fent leírt „klasszikus” megközelítések ezt a problémát érdemben nem kezelik, mindösszesen megvizsgálják a többtengelyűség mértékét, és amennyiben az jelentős, a fáradás számítás bizonyos felbontás mellett a releváns érintősík minden irányában elvégzik (critical plane method). A számítás így várhatóan konzervatív, mert azt az irányt tartja meg a számítás, amelyben a legrövidebb élettartamot kapjuk, de a fáradási folyamat fizikájához ennek az eredménynek már nincs kapcsolódása, ezáltal a számítási módszer is a mechanisztikus megközelítés helyett a heurisztikus irányba tolódik el, ezáltal elvesztve a kifáradási folyamat mechanizmusának megértését, amely a számítás végén akár félrevezető konklúziókat is eredményezhet.

A kifáradás analízis egy másik, napjainkban még kevésbé ismert irányvonala a problémát egy általánosabb, magasabb szintű megközelítésben tárgyalja. Egyes szakirodalomban található, mérésekkel igazolt elméletek szerint [10] a plasztikus alakváltozással (tehát a kritikus helyen nyitott feszültség-nyúlás hiszterézissel) járó ciklikus igénybevétel esetén a disszipált energia korrelál az anyagban felhalmozódott károsodással. Kutatásunk során ennek az elméletnek a hátterét vizsgáltuk, valamint ezen az elven alapuló kifáradás számítási módszert fejlesztettünk ki.

2. A KIFÁRADÁS FOLYAMATÁNAK VIZSGÁLATA TERMODINAMIKAI ALAPON

2.1 Elméleti háttér

Az energetikai alapú elmélet szerint szakítunk a klasszikus élettartam görbe alapú megközelítéssel, éppen azért, mert az túlságosan alkalmazás specifikus. A hipotézis szerint a ciklikus terhelések előrehaladtával az anyagban felhalmozódó károsodás a disszipált deformációs energia, valamint az alkatrész melegedésének függvénye. Termodinamikai szempontból egy zárt rendszer által disszipált hőmennyiség, valamint a rendszer aktuális hőmérsékletének a hányadosa az entrópia. Bizonyítható [7], hogy nem egyensúlyi termodinamikai folyamatok esetén az entrópia nő. Maximumát az egyensúly beálltával éri el. A rendszerben lezajló folyamatok egyensúlyi egyenlete entrópia szempontból a következő:

$$\rho \dot{s} + \operatorname{div} \mathbf{J}_s = \sigma_s, \quad (1)$$

ahol: ρ – a rendszer sűrűsége,
 \dot{s} – a rendszer entrópia sűrűségének (egységnyi térfogatra vetített entrópia) időbeli változása,
 \mathbf{J}_s – entrópia fluxus vektor (a rendszer határain egységnyi idő alatt „átáramló” entrópia),
 σ_s – az entrópia változás forrása, más néven az entrópia produkció.

Ciklikusan terhelt kontinuum is elemezhető termodinamikai szempontból, amennyiben a kontinuumot tekintjük a vizsgált rendszernek. Ekkor a rendszer entrópia változása a Gibbs-reláció és további termodinamikai összefüggések felhasználásával ([7], [8]) kifejezhető annak belső energia változásával, amelyet egy mechanikai terhelésnek kitett alkatrész esetén annak deformációs energia változása generál.

$$\rho \dot{u} + \operatorname{div} \mathbf{J}_q = \boldsymbol{\sigma} \cdot \nabla \mathbf{v}, \quad (2)$$

ahol: \dot{u} – a vizsgált anyag (rendszer) belső energiájának időbeli változása,
 \mathbf{J}_q – a vizsgált anyag (rendszer) határain egységnyi idő alatt átáramló hőmennyiség (fluxus) vektora,
 $\boldsymbol{\sigma}$ – a vizsgált anyag Cauchy feszültség tenzora,
 $\nabla \mathbf{v}$ – a vizsgált anyag pontjainak sebességmező gradiense (térbeli változása).

Az (1) és (2) egyenletek összevetéséből, valamint további kontinuum mechanikai összefüggések felhasználásával a termodinamikai értelemben vett entrópia produkció (a nem egyensúlyi rendszer növekvő entrópiájának forrása) kifejezhető a mechanikai deformációs teljesítmény-sűrűség, valamint a rendszerrel közölt hőmennyiség ismeretében:

$$T \sigma_s = \boldsymbol{\sigma}^v \cdot \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{J}_q \frac{1}{T} \operatorname{grad} T, \quad (3)$$

ahol: T – a rendszer pillanatnyi hőmérséklete,
 $\boldsymbol{\sigma}^v$ – az ún. viszkózus feszültség tenzor, amely nem egyensúlyi helyzetben az aktuális (nem egyensúlyi) feszültség tenzor és az egyensúlyhoz tartozó feszültségállapot különbsége,
 $\boldsymbol{\varepsilon}$ – a teljes nyúlási sebesség tenzor.

Képlékeny anyagok (tipikusan fémek) lassú (kvázi-statik) terhelése esetén az entrópia produkciót eredményező disszipált, időegységre jutó energia hő formájában nyilvánul meg (Clausius-féle nem kompenzált hő), amely zárt rendszer esetén az adott ciklus plasztikus teljesítménysűrűségével egyezik meg, tehát azzal az energiával, amely a befektetett mechanikai teljesítményből (amely deformált állapotba hozza az alkatrészt) nem alakul vissza a ciklus végeztével.

$$\sigma_s = \frac{1}{T} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_p + \mathbf{J}_q \operatorname{grad} T^{-1}, \quad (4)$$

ahol: $\boldsymbol{\varepsilon}_p$ – a plasztikus nyúlási sebesség tenzor.

Az egységnyi idő alatt termelt entrópia produkció tehát zárt rendszer esetén, amikor a környezettel hőcserét nem tételezünk fel, képlékeny anyagot feltételezve a plasztikus teljesítménysűrűség és az aktuális hőmérséklet hányadosa. Természetesen, ahogy a terhelési ciklusok ismétlődnek, időben ez a mennyiség felhalmozódik. A felhalmozódott entrópia produkció a (4) egyenlet időbeli integrálása után kapható meg [9]. A releváns szakirodalomban megfogalmazott elmélet szerint [10] megállapítható egy olyan maximális felhalmozódott entrópia érték, amely a feltételezések szerint általános anyagjellemző, és ennek elérése esetén a ciklikusan terhelt anyag adott pontjában a kifáradás jelensége várható. Ezt a maximális felhalmozódott entrópia produkciót határentrópiának nevezzük, az angol terminológiában Fatigue Fracture Entropy (FFE).

2.2 Implementáció

A fent összefoglalt elméleti módszert implementáltuk ANSYS Workbench végeeselemes környezetben beépülő modul (ANSYS ACT) formájában. A megvalósított automatizált számítási folyamat főbb lépései a következők:

- A szimulációs környezet definíciója. Ebben a lépésben definiáljuk azt a mechanikai számítást, amely a ciklikus terhelésnek kitett alkatrész képlékeny deformációs válaszát adja vissza.
- A mechanikai és termikus számításához szükséges anyagjellemzők definíciója. Ez magában foglalja a következő jellemzők táblázatos megadását: rugalmassági modulus, Poisson-tényező, folyáshatár, hővezetési tényező, sűrűség, fajhő, Taylor-Quinney együttható [12]. A Taylor-Quinney együttható megszabja, hogy a plasztikus energiasűrűség hányad része alakul disszipált hővé. A képlékeny viselkedés nagy pontosságú szimulációja érdekében az adott fémre leginkább jellemző keményedési törvényt, valamint egy pontos folyásgörbét megadni szükséges. További fontos anyagi input az entrópia alapú kifáradáshoz szükséges határentrópia sűrűség (FFE).
- Következő lépésben elvégezzük az alkatrészeire ható ciklikus terhelés ismeretében annak a képlékeny feszültség és deformáció választ adó szimulációt egy teljes terhelési ciklusra. A mechanikai szimuláció elvégzése után az eredményül kapott feszültség-nyúlás hiszterézis alapján a szoftver automatikusan kiszámítja a ciklus alatt termelődő hőt minden egyes végeeselemre, amely az állandósult állapot béli statikus hővezetés analízis számára, mint hőforrás terhelés jelenik meg. A statikus hővezetés analízis az automatizált élettartamszámítási eljárás következő lépése.
- Végül elvégezzük az entrópia alapú kifáradás kiértékelést. A kiértékelés során a szoftver minden végeeselemre az adott feszültség és nyúlás állapotnak megfelelően plasztikus energiasűrűséget számol, majd azt az állandósult hőmérséklet eloszlás számításból kapott hőmérséklettel elosztva entrópia sűrűség növekményt számol. A szoftver azzal az egyszerűsítéssel él, hogy az egyetlen számított ciklusra kapott feszültség-nyúlás hiszterézis állandóságát tételezi fel, ami az esetek többségében helytálló feltételezés, amennyiben anyagi inputként a szaturált ciklikus folyásgörbét adjuk meg. Ebben az esetben az entrópia sűrűség felhalmozódása lényegében az entrópia sűrűség növekmény és az eltelt ciklusok számának szorzataként kapható meg, tehát az entrópia sűrűség lineárisan akkumulálódik.

3. A KIFEJLESZTETT ELJÁRÁS KÍSÉRLETI VALIDÁCIÓJA

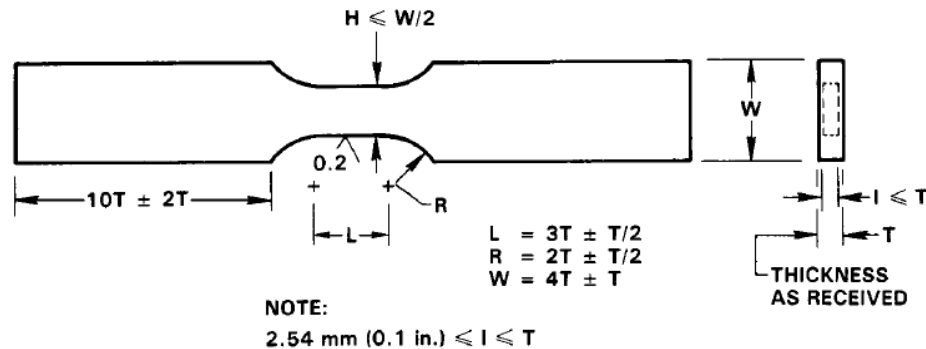
A bemutatott eljárás alapelveit laboratóriumi körülmények között elvégzett fárasztó tesztek segítségével kísérleti úton igazoltuk. Alumínium próbatesteken elvégzett, nyúlás vezérelt fárasztó tesztek végeztünk tönkremenetelig, majd a kapott eredményeket összevetettük a kifejlesztett kifáradás számító módszert alkalmazó végeeselemes alkalmazással.

3.1 Validációs fárasztóvizsgálatok

A validációs kísérletek elvégzéséhez AlMgSi1 típusú alumínium ötvözetből kimunkáltunk lapos próbatesteket az ASTM E 606-04 [11] szabvány szerint. Az próbatest geometriát az 1. ábra mutatja. A próbatest lemezvastagságát 4 mm-re választottuk, a többi méret az 1. ábra javasolt összefüggései szerint számítottott.

A mérést az eCon Engineering Kft. Anyagvizsgáló laborjában Instron 8801 típusú szervohidraulikus fárasztó berendezésen végeztük el. A mérőberendezés maximális kapacitása +/- 10 tonna, ezen terhelések

mellett +/- 1.5 mm ciklikus elmozdulás megvalósítására képes 10 Hz gerjesztő frekvencia mellett. Az entrópia számítás hangolásához a próbatest melegedését Optris PI 640 típusú telepített hőkamerával vizsgáltuk. A rögzített hőterkép-történetből a kritikus zónában utólagos kiértékeléssel nyertük ki az átlagos felületi hőmérsékletváltozást a ciklusok során. A mérési elrendezést a 2. ábra mutatja.



(a) FLAT-SHEET FATIGUE SPECIMEN WITH RECTANGULAR CROSS SECTION

1. ábra. A validációs mérések során használt szabványos próbatest geometria



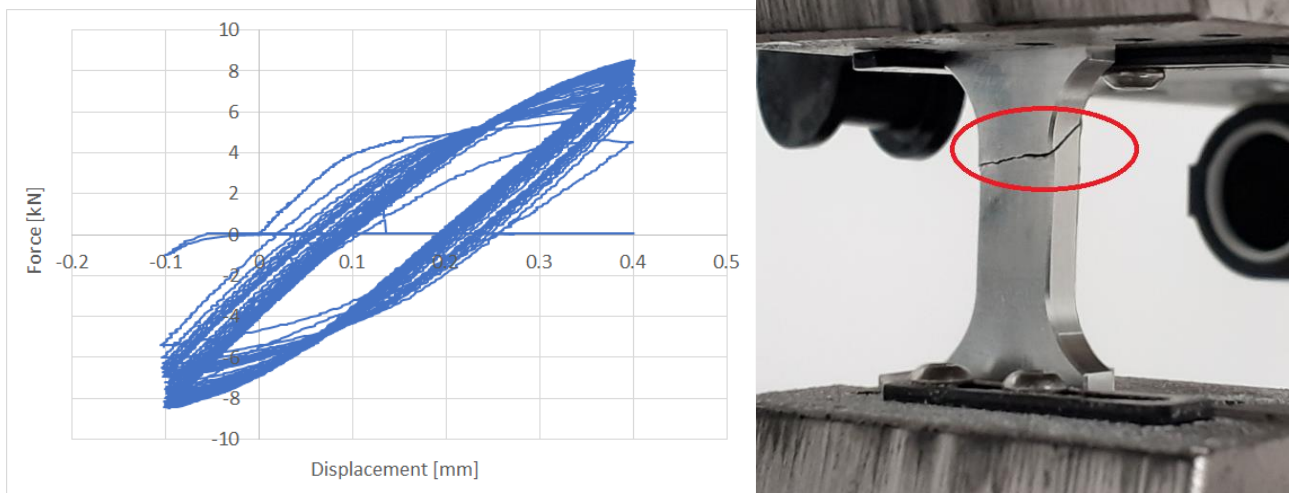
2. ábra. A validációs fárasztóvizsgálatokhoz használt mérési elrendezés

A fárasztóteszteket elmozdulás vezérlés mellett végeztük, háromszög jel alkalmazásával. A mérési ciklus paramétereit a keresztfej és a valós próbatest elmozdulásokkal az 1. táblázat mutatja. A valós próbatest elmozdulást a mérőgép keret ismert lineáris merevségének használatával a keresztfej elmozdulásából számítottuk.

1. táblázat - Validációs fárasztóvizsgálat paramétereit

Maximális keresztfej elmozdulás [mm]	Minimális keresztfej elmozdulás [mm]	Maximális próbatest elmozdulás [mm]	Minimális próbatest elmozdulás [mm]	Frekvencia [Hz]
0.4	-0.1	0.223	0.0741	2

A 11 próbatest fárasztó vizsgálata során nyitott feszültség-nyúlás hiszterézis hurkot mértünk, ami az entrópia alapú LCF élettartam számítási eljárásához szükséges alapfeltétel. A mért átlagos élettartam 553 ciklusra adódott. Az eredmények szórását jellemző faktor, ami a +/- 3 σ valószínűségű élettartamok és a középérték hányadosát fejezi ki, 1.76-ra adódott, amely kis szórásra utal. Ennek megfelelően 99.86% valószínűséggel a megadott terhelési állapotban az alapanyag élettartama a [314;973] ciklus intervallumba esik. Tipikus erő-elmozdulás hiszterézis történetet, valamint próbatest repedés mintát mutat a 3. ábra. A repedés vizuális vizsgálatából megállapítható volt a nyírási síkok jelenléte, amely a plasztikus nyúlás felhalmozódáshoz köthető képlékeny tönkremeneteli forma.

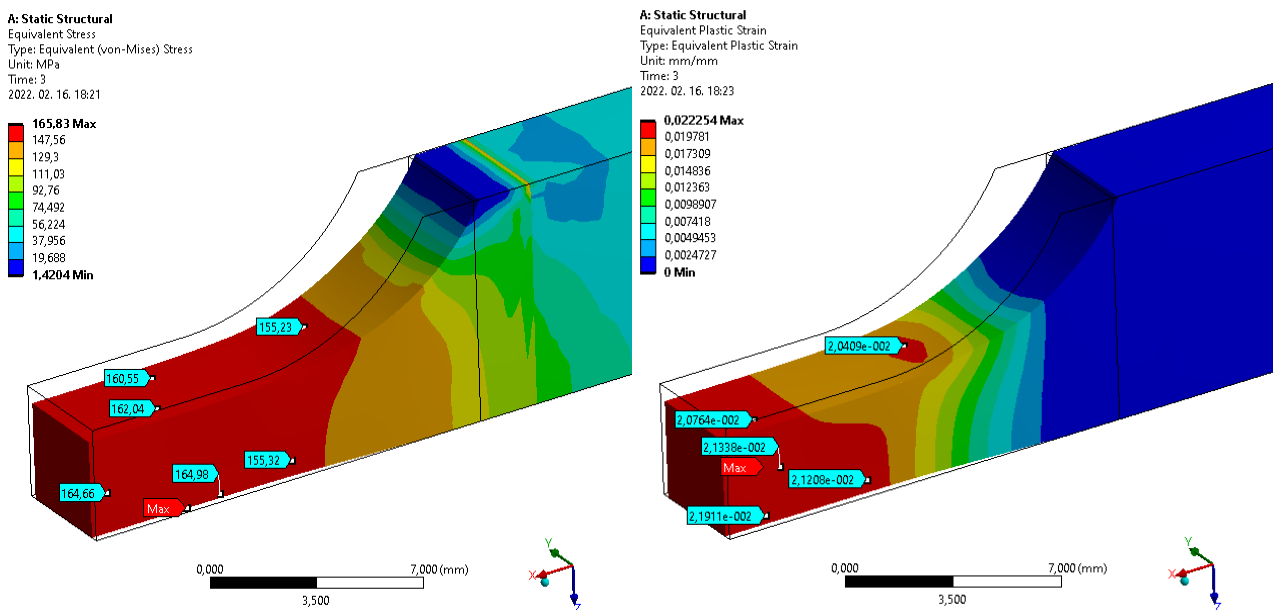


3. ábra. A validációs fárasztóvizsgálatok során rögzített tipikus erő-elmozdulás görbe és törési mód

3.2 Fárasztóvizsgálatok végeleemes analízise

A fent ábrázolt mérési elrendezést virtuálisan végeleemes szimuláció segítségével vizsgáltuk. A korábban bemutatott automatizált, entrópia alapú kifáradás kiértékelő analízist használtuk a próbatest élettartamának becsléséhez. A kiindulási végeleemes modell a próbatest háromdimenziós térfogati elemekből felépített reprezentációja. A mérés során a próbatest befogott peremein tapasztalt valós maximális és minimális elmozdulást előidéző háromszög alakú gerjesztő jel alkalmazásával képlékeny anyagmodellt használva becsültük meg a próbatest feszültség-nyúlás választ. Az alapanyag képlékeny viselkedését monoton szakítóvizsgálatok alapján mért görbékhez illesztett bilineáris folyásgörbével közelítettük. A szimulációhoz használt, bilineáris plasztikus viselkedést leíró, valamint a hőfejlődés számításához használt termikus anyagjellemzőket a 2. táblázat tartalmazza.

A kiindulási képlékeny szimulációból kapott Von-Mises feszültség eloszlást és a maximum terhelés időpillanatában felhalmozódott ekvivalens plasztikus nyúlás eloszlást a 4. ábra mutatja. Látható, hogy a maximum terhelés esetén ciklusonként maximálisan 2.2% maradó alakváltozást halmoz fel a próbatest, amely a disszipált deformációs energia révén hőfejlődéshez vezet. Kihasználva a próbatest szimmetriáját, annak csak egy negyed modelljével számoltunk.

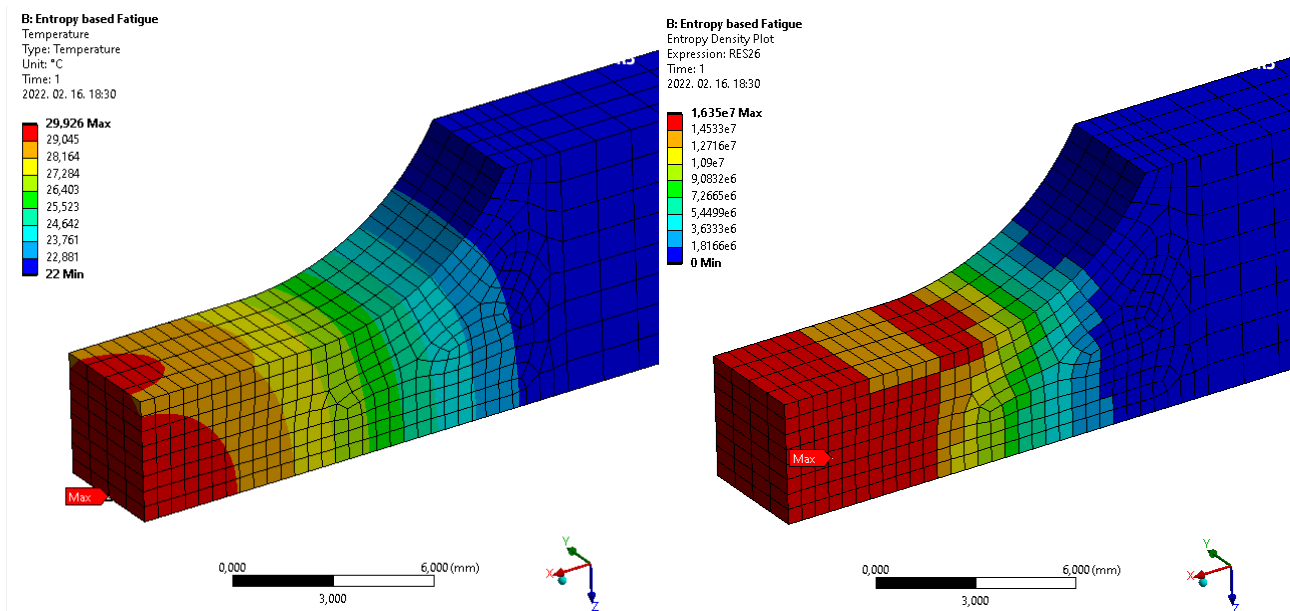


4. ábra. A validációs fárasztóvizsgálatok végeleemes modellezése során kapott ekvivalens feszültség (bal) és képlékeny alakváltozás (jobb) eloszlás

2. táblázat – A végelemes szimulációhoz használt anyagparaméterek

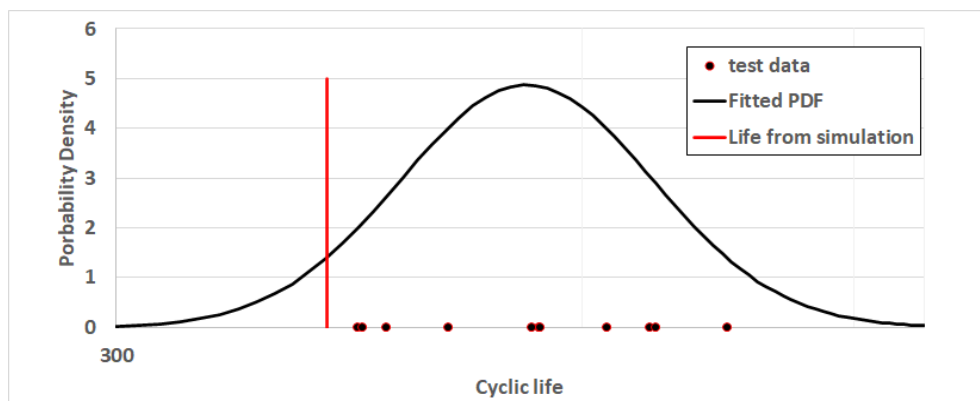
Rugalmasági modulus [MPa]	Poisson tényező	Folyáshatár [MPa]	Képlékeny szakasz érintő modulusa [MPa]	Fajhő [J/(kg°C)]	Hővezetési tényező [W/(m*K)]
70000	0.3	130	1574	434	60.5

A mechanikai analízisből felépülő állandósult állapot béli termikus analízis és az egy ciklusban termelődő entrópia produkciónak számítás eredményét az 5. ábra mutatja. A termikus számítás során a próbatest nem befogott felületére hőátadás peremfeltételt definiáltunk, amelynek hőátadási tényezőjét úgy iteráltuk, hogy a mérések során a hőkamerával tapasztalt felületi hőmérséklet értékeket kapjuk (állandósult állapotban 25-29 °C).



5. ábra. A próbatest energia-disszipációjából eredő melegedés szimulációjának eredménye (bal), valamint az egy ciklusban termelődő entrópia produkciónak eloszlása (jobb)

Az előzetes mérések alapján a vizsgált anyagra a határentropia értékét $2.306 \text{ mJ}/(\text{mm}^3 \cdot \text{K})$ értékben állapítottuk meg. A szimuláció ez alapján 411 ciklusban becsülte meg a próbatest várható élettartamát. A maximális entrópia produkciónak helye a szimuláció szerint a próbatest kis keresztmetszetű szakaszán a szimmetriás és a bemetszés között található, amely összhangban van a mérések során tapasztalt törési lokációval. A számított és a mért élettartamok viszonyát grafikusan a 6. ábra mutatja.



6. ábra. A mért élettartamok eloszlása, valamint a számított élettartam viszonya

4. KONKLÚZIÓ

A kifáradással összefüggő károsodási folyamat disszipált hő alapján történő nyomon követése és leírása, valamint modellezése a kifáradás vizsgálatának újszerű, jövőbemutató módszere. Ez a megközelítés a jelenleg elfogadott és széles körben használt, alapvetően empirikus, korrigált élettartam görbék alapján történő kifáradási ciklusszám becslés valós alternatívája lehet, a károsodási folyamat mechanisztikus modelljeként.

A validációs méréseink és a kapcsolódó szimulációs eredmények megfelelő korrelációt mutattak, amely a kifáradás magasabb szintű, energetikai alapú vizsgálatának létjogosultságát igazolja. A szimulált élettartam mértől való mérsékelt eltérése konzervatív irányban számos faktor eredménye lehet, amelyek tisztázása további vizsgálatokat igényel. Ezek az okok többek között: a folyási viselkedés leegyszerűsített modellezése bilineáris görbével, a hiszterézis területének közelítése Ramberg-Osgood összefüggés használatával, a deformációs energia teljes hővé alakulásának feltételezése vagy a határentropia (FFE), mint mindentől független, általános anyagjellemző volta.

Annak feltárása érdekében, hogy a bemutatott módszer ipari körülmények között a konvencionális megoldásokhoz képest mennyi hozzáadott értéket, illetve egyszerűsítést jelent, számos további kutatást és vizsgálatot szükséges elvégezni a jövőben. A legfőbb további tisztázandó kérdések a következők. A kifáradási ciklusszámot meghatározó mennyiség, a határentropia valóban független anyagjellemző? További kutandó területek a termelődő entrópia és a közép feszültség, valamint feszültség-többtengelyűség kapcsolata. A nem-proporcionális terhelési viszonyok kezelése a konvencionális élettartam becslő módszerekkel nem megoldott. Szükséges megvizsgálni a jövőben, hogy a kifáradás ezen speciális problémaköre kezelhető-e entrópia alapon. További vizsgálatok szükségesek ahhoz is, hogy lássuk, a károsodási folyamat melyik fázisa az, amelyre az entrópia-kontinuum mechanika alapú megközelítés érvényes. Sejtésünk szerint a makrorepedés terjedés fázisa már nem tartozik ide, mivel a károsodás ezen periódusában a vizsgált terület már nem kontinuum. További elméleti kutatási munkát szeretnénk abba is fektetni, hogy a képlékeny deformáció során felszabaduló hő és a képlékeny alakváltozás folyamata közötti kapcsolatot feltárjuk. Így nem lenne szükség empirikus faktorokra a kritikus hely melegekedésének becsléséhez (ld. Taylor-Quinney együttható). Ennek a problémának az elméleti megoldásához az ún. képlékeny potenciál definíciója vezethet, amelynek matematikai kifejezése jelenleg még nem ismert.

Az ANSYS környezetben elkészített keretrendszert úgy alakítottuk ki, hogy a további kutatások eredményeként a szoftver magját adó kifáradás analízis algoritmusát könnyen módosítható legyen anélkül, hogy az a teljes eszköz módosítását vonná maga után. Ennek megfelelően az eljárás továbbfejlesztése esetén is várható, hogy az automatizált formában virtuális alkatrész szilárdsági analízisek kiértékelő kódjaként rendelkezésre áll majd.

Zárásként azonban azt is szükséges megjegyezni, hogy a hőfejlődés és a képlékeny alakváltozás, valamint az ehhez tartozó károsodás kapcsolata csak a relatíve rövid élettartamok esetén tisztázott (LCF). Minden egyéb ismert fizikai károsodási folyamat, mint pl. a nagyciklusú kifáradás, illetve a gyártásból visszamaradó zárványokhoz köthető fáradásos repedések problémakörét az entrópia alapú kifáradás analízis nem fedi le.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával valósult meg. A projekt címe: Ismétlődő mechanikai, ill. termikus igénybevételek hatására bekövetkező anyagkifáradás lényegi, disszipatív jellegéhez kötődő, pontos és általános eljárás kifejlesztése, azonosítószáma: KFI_16-1-2017-0553.

6. IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Basquin, O. H., *The exponential law of endurance test*, Proceedings of the American Society for Testing and Materials, 10: 625–630, 1910
- [2] Neuber, H., *Theory of Stress Concentration for Shear-Strained Prismatical Bodies With Arbitrary Non-Linear Stress-Strain Laws*, Transactions of the American Society of Mechanical Engineering, Series E, Vol.28, No.4, pp.544-550, December 1961.
- [3] Manson, S.S., *Behaviour of Materials Under Conditions of Thermal Stress*, National Advisory Committee For Aeronautics, Report 1170, Washington D.C., USA, p.2933, 1954.
- [4] Coffin, Jr., L.F., *A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal*, Trans. ASME, Vol. 16, pp931-950, New York, 1954.
- [5] Morrow, J., *Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals*, ASTM STP 378, pp.45-87, 1965

- [6] Smith, K. N., Watson, P. and Topper, T. H., *A stress-strain function for the fatigue of materials*, Journal of Materials Science, 5, pp. 767–778
- [7] S. R. d. Groot and P. Mazur, *Non-equilibrium Thermodynamics*, New York: Dover Publications, Inc., 1962.
- [8] E. A. Guggenheim, *Thermodynamics*, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: North Holland, 1967.
- [9] W. D. X. H. Tong Xiaoyan, *Cyclic hysteresis energy of carbon and alloy steels*, ACTA Metallurgica Sinica, 1990.
- [10] M. Naderi, M.M. Khonsari, *A thermodynamic approach to fatigue damage accumulation under variable loading*, Material Science and Engineering A, 527, pp. 6133-6139, 2010
- [11] ASTM E606-04, *Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing*, ASTM International, 2017
- [12] C.K.C. Lieou and C. A. Bronkhorst, *Thermomechanical Conversion in Metals: dislocation plasticity model evaluation of the Taylor-Quinney coefficient*, Acta Materialia, 202 ,pp. 170–180, 2021.