

KISCIKLUSÚ FÁRASZTÁS

LOW CYCLE FATIGUE

A KISCIKLUSÚ TERMOMECHANIKAI FÁRADÁS FOLYAMATÁNAK ÉRTÉKELÉSE STUDY OF LOW CYCLE THERMOMECHANICAL FATIGUE PROCESS

FEKETE BALÁZS

Kulcsszavak: kisciklusú fáradás, termomechanika, anyagvizsgálat
Keywords: low cycle fatigue, thermomechanics, material testingbevezetés

ABSTRACT

During the “High performance structural materials” research project we are going to deal with the properties and degradation of the structures of the materials which are applied in technology systems of nuclear power plant and which has an important role in the structural integrity of the devices which determine the safety of the power station. In this paper we have summarized the literature review and the theoretical background of this project.

ABSZTRAKT

A Főiskolánkon folyó „Nagy teljesítőképességű szerkezeti anyagok kutatása” elnevezésű kutatási munka keretein belül erőműi acélok ciklikus hőmérséklet és mechanikai terhelések hatására bekövetkező károsodásával fogunk foglalkozni. Jelen közlemény célja a kutatómunkát megalapozó irodalomkutatási tevékenységet összefoglalni. Bemutatjuk kisciklusú termomechanikai fáradtövizsgálat vizsgálati módszereit, a szükséges berendezéseket, a próbatestek változatait. A munka második fele betekintést ad a fáradási kísérletek kiértékelésének módszereiről, az alakváltozás amplitúdóra és az alakváltozási munkára épülő modellekről.

BEVEZETÉS

A legtöbb gépészeti szerkezetünket úgy méretezzük, hogy annak anyagában a folyáshatár biztonsági tényezővel csökkentett értékénél nagyobb igénybevétel ne jöhessen létre. Ennek ellenére elkerülhetetlen olyan lokális feszültséggyűjtő helyek kialakulása, melyekben az előre nem ismert járulékos terhelések hatására bizonyos mértékű képlékeny alakváltozás lép fel. Ilyen helyek lehetnek például a hirtelen keresztmetszet változások, hegesztési varratok környezete, furatok, vagy a berendezés olyan részei, melyben bizonyos időtartamra olyan inhomogén hőmérsékletmező alakul ki, amely jelentős feszültséget okoz a szerkezet anyagában, és amellyel a méretezésnél nem számoltunk. Ha ezen kritikus helyeken a képlékeny alakváltozás csak egyszer jön létre, akkor annak mértékétől függően a feszültségmező átrendeződésével és ezen hely környezetében lévő magas feszültség gradiens leépülésével az anyag teherbíró képessége növekedhet a képlékeny keményedés által. Azonban ha ezek a méretezés során elhanyagolt folyáshatár feletti igénybevételek többször megismétlődnek az anyag mikroszerkezete a képlékeny alakváltozás hatására megváltozik, benne repedések keletkeznek és terjednek. Ez a folyamat végül a szerkezeti integritás megszűnéséhez, azaz töréshez vezet. A fent leírt jelenséget nevezi a szakirodalom kisciklusú fáradásnak.

Jelölések			
$\Delta \varepsilon_p$	képlékeny alakváltozás tartomány	ΔW^p	képlékeny alakváltozási munka
$\Delta \varepsilon_e$	rugalmas alakváltozás tartomány	$a, \alpha, \beta, B_0, T_k$	anyagállandók
$\Delta \sigma$	feszültségtartomány	ν	vizsgálati frekvencia
E	rugalmassági modulus	N_f	tönkrementeli ciklusszám
$R_{p0.2/20}$	20 °C-on mért folyáshatár	m	Keményedést kifejező szám
n	ciklikus keményedési kitevő		

A Főiskolánkon folyó „Nagy teljesítőképességű

Dunaújvárosi ECOTECH ZRT.-nél kutató-fejlesztő mérnök, valamint Dunaújvárosi Főiskolán fiatal kutatói munkakört tölt be

szerkezeti anyagok kutatása” elnevezésű kutatási munka keretein belül erőműi acélok ciklikus hőmérséklet és mechanikai terhelések hatására bekövetkező károsodásával fogunk foglalkozni.

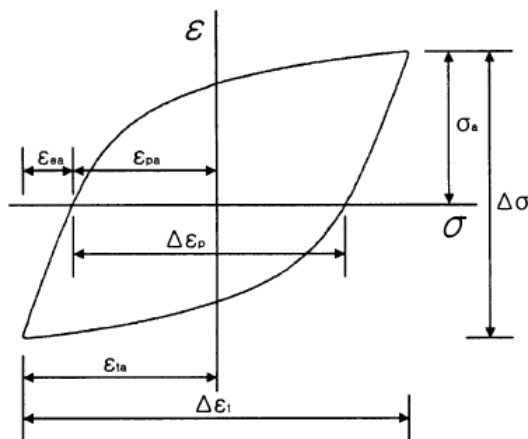
Jelen közlemény célja a kutatómunkát megalapozó irodalomkutatási tevékenység összefoglalása.

A KIS ÉS NAGYCIKLUSÚ FÁRADÁS KÖZÖTTI HATÁRÁTMENETRŐL

Fontos megemlíteni, hogy a kisciklusú és a nagyciklusú fáradás tönkremeneteli ciklusszáma között általánosan nem húzódik éles határvonal és a kétféle károsodási mód valódi fizikai tartalmát nem az elnevezésükben kell keresni. Míg a nagyciklusú fáradás főként arányossági határon belüli feszültség szinten jelentkezik, addig kisciklusú fáradásról csak akkor beszélhetünk, ha az anyagban jelentős mértékű képlékeny alakváltozás is fellép. Coffin [6] cikkében bevezeti az átmeneti kifáradási élettartam (N_{tr}) fogalmát. Ez alatt az adott anyagminőség fázisztóvizsgálata során mért azt a ciklusszámot érti, mely egyenlő mértékű rugalmas és képlékeny alakváltozás mellett okoz tönkremenetelt, tehát:

$$\Delta \varepsilon_p = \Delta \varepsilon_e.$$

A további elemzéshez be kell vezetnünk a hiszterézis hurok fogalmát, mely alatt a fázisztóvizsgálatok során rögzített nyúlás-feszültség görbéket értjük (1. ábra).



1. ábra – Hiszterézis görbe

Ezt a későbbiekben részletesen bemutatjuk. Adott vizsgálat esetén a kifáradási módra a hiszterézis hurok alakjából következtethetünk. Amennyiben a görbe széles és nagy területet foglal körül, ebben az esetben fennáll:

$$\Delta \varepsilon_p \gg \Delta \varepsilon_e,$$

ezért kisciklusú fáradásról van szó a jelentős képlékeny alakváltozás következtében. Ha görbe által határolt terület kicsi és a diagram alakja „karcsú”:

$$\Delta \varepsilon_p \ll \Delta \varepsilon_e,$$

ebben az esetben nagyciklusú fáradás lép fel, mivel az alakváltozás döntő mértékben rugalmas. A fenti két eset közül az első az átmeneti kifáradási élettartam alatti ciklusszám mellett, míg a második az átmeneti kifáradási élettartam feletti ciklusszám esetén okoz tönkremenetelt. Ezek alapján az adott anyag fáradási viselkedésére az anyagra vonatkozó (N_{tr}) paraméterből következtethetünk. Általánosan kijelenthető, hogy kisebb folyáshatárú anyagok átmeneti kifáradási élettartama magasabb, mint a nagyobb szilárdsági tulajdonságokkal rendelkezőké. Ez könnyen belátható, mivel adott teljes alakváltozáshoz ($\Delta \varepsilon$) alacsony folyáshatárú anyagnál magas képlékeny feszültség szint tartozik, mely a hiszterézis hurok területét növeli, ezáltal kis $\Delta \varepsilon$ - és nagy ciklusszám – mellett fog teljesülni a $\Delta \varepsilon_p = \Delta \varepsilon_e$ egyenlőség.

További fontos különbség figyelhető meg a kétféle kifáradási mód között. A kisciklusú fáradás során keletkező jelentős képlékeny alakváltozások miatt, már a kifáradás korai szakaszában – feszültség szinttől függően akár az első pár ciklusban – keletkeznek mikrorepedések, így a kisciklusú fáradás során a repedésterjedés dominál. A kis alakváltozás mellett végbemenő nagyciklusú fáradás esetén, ezzel ellentétben a kifáradási folyamat jelentős részében a repedések keletkezése megy végbe. A nagyciklusú fáradás során megfigyelhető alakváltozás-ciklusszám kapcsolatot a rugalmas alakváltozás esetén érvényes Basquin összefüggés írja le:

$$\Delta \varepsilon_e = \frac{\Delta \sigma}{E} = \frac{B}{E} N_f^{-\beta}.$$

A kisciklusú fáradás leírásának egyik lehetséges módja a Coffin-Manson modell mely a képlékeny alakváltozás tartomány ($\Delta \varepsilon_p$) és a törési ciklusszám (N_f) között teremt kapcsolatot, és amellyel a későbbi fejezetekben részletesen foglalkozunk:

$$\Delta \varepsilon_p = C \cdot N_f^{-\alpha}.$$

Jelen fejezetben azért említjük mivel a teljes alakváltozás-ciklusszám kapcsolatának leírása a fentiek összege:

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_e + \Delta \varepsilon_p = \frac{B}{E} N_f^{-\beta} + C \cdot N_f^{\alpha}.$$

A KISCIKLUSÚ TERMOMECHANIKAI FÁRADÁS ELŐFORDULÁSA A GÉPÉSZETBEN

Az energiaipari, vegyipari nyomástartó edények és csővezetékek rendszerint jelentős nyomás és hőmérsékletváltozásnak vannak kitéve. Még a statikus üzeműnek tekintett készülékek igénybevételénél is.

tele is nagymértékben változik indításkor és leálláskor, fűtéskor és hűtéskor, meleg vagy hideg anyag betáplálásakor. Ezek a járulékos feszültségek sokszor jóval nagyobbak a tervezett üzemi feszültségeknél és gyakran okoznak kisciklusú fáradást [14]:

- Hideg vagy meleg közeg gyors betáplálása
- Indításkor, leálláskor fellépő nyomás és hőmérsékletváltozások okozta feszültség
- Rezgésből származó feszültségek
- Hirtelen szállókésekből származó járulékos feszültségek
- Kapcsolódó alkatrészek különböző hőtágulási együtthatói okozta feszültségek (pl. plattírozott nyomástartó edények, armatúrák)

VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

VIZSGÁLATTECHNIKAI KÉRDÉSEK

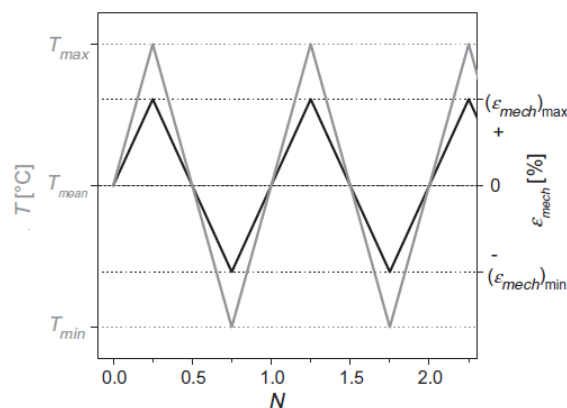
A szerkezeti anyag kisciklusú fáradása során a feszültség és az alakváltozás között a kapcsolat nem lineáris. El kell azt dönteni, hogy a vizsgálatok során melyiket tartjuk állandó értéken, vagyis a feszültség- vagy az alakváltozás amplitúdó legyen-e a konstans paraméter. Ha a folyamatot a feszültség-alakváltozás koordináta-rendszerben ábrázoljuk, az 1. ábrán látható hiszterézis görbét kapjuk. Amennyiben megvizsgáljuk az anyag makroszkopikus válaszát a fellépő terhelésekre megállapíthatjuk, hogy az alakváltozás először a Hooke-törvény szerinti rugalmas viselkedést mutat.

A terhelőerőt tovább növelve megjelenik a képlékeny alakváltozás, melyet megszüntetve maradó nyúlást észlelünk. Amennyiben a próbatest eredeti méretét szeretnénk visszakapni nyomófeszültséget kell létrehozni a darabban. Ha ezt a terhelést tovább növeljük, a próbatest rövidül, az eredeti alak eléréséhez újra húzó igénybevétellel kell terhelnünk a darabot. Mint azt már említettük a kisciklusú fáradás során a feszültség és az alakváltozás között a kapcsolat erősen nemlineáris, nagy alakváltozások jönnek létre, ezért a feszültség állandó értéken tartása sok körülményt és bonyolult vizsgálattechnikát igényelne. A fentiek miatt a kisciklusú fáradás vizsgálatát állandó nyúlás amplitúdó mellett végzik. Ilyenkor az egyes ciklusokban, a feszültség értéke változik, - növekszik vagy csökken - annak megfelelően, hogy a vizsgálati anyag felkeményedik vagy lágyul az ismételt igénybevétel hatására. További fontos vizsgálattechnikai kérdés a hőmérséklet és a mechanikai terhelések kapcsolata. A szakirodalomban található legtöbb kutatás atomerőművi berendezések esetén állandó hőmérsékleten végzett fáradásra irányult (*IF – Isothermal Fatigue*). Ezekben a berendezésekben a indítások

és leállások, valamint az üzem közben fellépő hőmérsékletingadozások miatt, nem csak a belső nyomásból származó feszültségek, hanem a hőmérséklet-tranziensek következtében fellépő hőfeszültségek is jelentős szintet érhetnek el. A kisciklusú fárasztóvizsgálat során állandó hőmérsékleten végzett fárasztással ezeket figyelmen kívül hagyjuk. A valós üzemi körülményeket jobban közelítő termomechanikai fárasztóvizsgálatokkal lehetőség nyílik a mechanikai ciklusoktól független hőmérsékleti ciklusokat működtetni a próbatestre egyidejűleg, így a berendezés tényleges terhelése pontosabban modellezhető. Ez történhet a olyan ütemben, hogy a hőterhelés és a mechanikai terhelés „fázisban” van (*IP- In Phase Test*), vagy a hőmérséklet és a nyúlás amplitúdó a ciklus során ellentétes előjelű (*OP – Out of Phase Test*). A fenti három vizsgálati módra a továbbiakban alkalmazzuk az alábbi terminológiákat:

- Izotermikus fárasztóvizsgálat
- Szinkron termomechanikai fárasztóvizsgálat
- Aszinkron termomechanikai fárasztóvizsgálat

A hőmérséklet és a mechanikai nyúlás a cikluszám függvényében a 2. és 3. ábrákon látható.



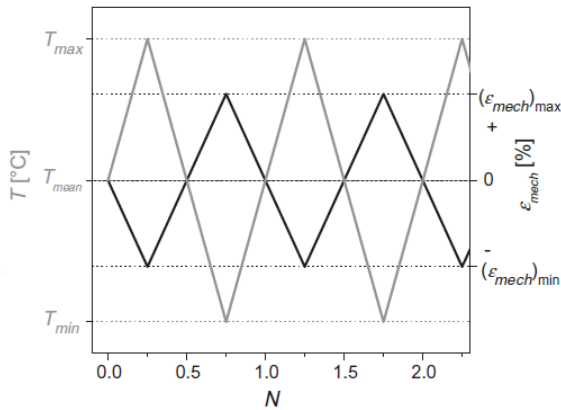
2. ábra – Szinkron termomechanikai fárasztóvizsgálat

A vizsgálati körülmények tárgyalásánál nem hagyhatjuk ki a vizsgálati frekvencia hatását sem. Lehofer [7] cikkében levezette, hogy a kisciklusú fáradás során az anyagi és a vizsgálati paraméterek hogyan befolyásolják a feszültség amplitúdót:

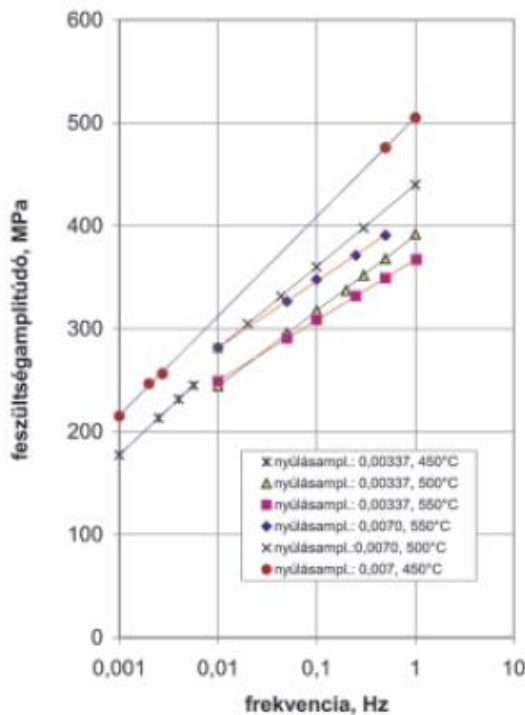
$$\sigma_A = \left\{ \left[\frac{1}{a} \ln \left(2 - \frac{T}{T_k} \right) \right]^{\frac{1}{n}} R_{p0.2/20} + \frac{R(T_k - T)}{B_0} \ln \frac{\dot{\epsilon}_{a/T}}{\dot{\epsilon}_{j/T}} \right\} \left(\frac{\epsilon_{ap/T}}{2,002} \right)^n$$

Mivel látható, hogy a képletben szerepel a nyúlássebesség is, ebből következik, hogy a feszültség amplitúdó az $\epsilon(t)$ vezérlő függvény frekvenciájától függ. Ezzel belátható, hogy az $\epsilon(t)$ frek-

venciájától függően a kisciklusú fárasztás más-más feszültség szinten zajlik, ezért végeredményben kijelenthetjük, hogy az adott $\varepsilon(t)$ alakváltozással végbemenő fárasztás során a fémötvözet élettartama a vezérlő függvény frekvenciájától is függ. A feszültség amplitúdó frekvenciafüggésére az 4. ábrán láthatunk példát. A képlet alkalmazása akkor célszerű, ha a vizsgálatot magas frekvenciával kívánjuk elvégezni, azonban az eredményeket az alacsony alakváltozási sebességgel terhelt valós szerkezetekre kívánjuk átszámítani.



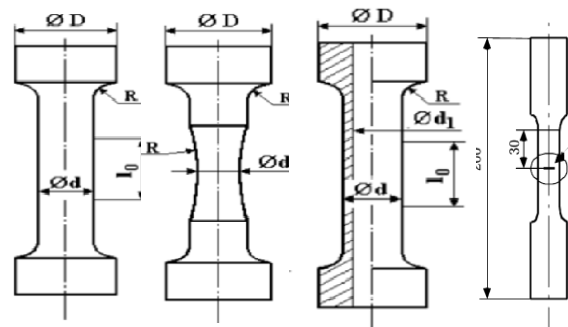
3. ábra – Aszinkron termomechanikai fárasztóvizsgálat



4. ábra – A feszültség amplitúdó a vizsgálati frekvencia függvényében [7]

A KISCIKLUSÚ TERMIKUS FÁRADÁS VIZSGÁLATÁHOZ ALKALMAZOTT PRÓBATESTEK

A próbatestek alakjának kiválasztásánál meghatározó a vizsgáló berendezés pontossága valamint terhelhetősége, amely a próbatest méreteit alulról és felülről is korlátozzák. Mivel a kisciklusú fárasztás magas feszültség szinten zajlik, ezért jelentős erőhatások keletkeznek. Ezeket a próbatest tervezésénél úgy vesszük figyelembe, hogy megfelelő szilárdságú befogásról gondoskodunk, például menetes megfogás esetén a menet méretének és menetszámának helyes megválasztásával. Mivel a kisciklusú fáradás során a próbatesteket nyomásra is igénybe vesszük, gondoskodni kell a megfelelő megtámasztásról és a próbatest kihajlásának elkerüléséről. Ezt zömök próbatest kialakítással érhetjük el. A próbatestek alakja lehet hengeres vagy lapos, annak függvényében, hogy milyen szerkezetből munkáljuk ki. A hengeres próbák lehetnek tömörök, tóruszos kiképzésűek, valamint csőszerűek (5. ábra). A tóruszos próbatest előnye, hogy a képlékeny alakváltozás egy jól meghatározható helyre koncentrálódik. A csőszerű próbatest hőkapacitása kisebb, mint a tömör kialakításúé, ezért alkalmazása akkor célszerű, ha a termomechanikus fárasztás során magas frekvenciával működtetjük a hőterheléseket. Lapos próbatestet főként abban az esetben alkalmazunk, ha a vizsgálatot mesterséges hibával (bemetszéssel) rendelkező próbatesten kívánjuk elvégezni.



5. ábra – Hengeres, tóruszos, csőszerű és lapos próbatest

VIZSGÁLÓ BERENDEZÉSEK

A kisciklusú fárasztóvizsgálatokhoz egy merev, nagy rugóállandójú szakítógéppel szükséges, amelyen a keresztfej elmozdulása reverzálható (megfordítható), és a húzó-nyomó igénybevételhez szükséges alternáló mozgás a próbatest hossz- illetve keresztirányú mérete szerint vezérelhető. Általában elektronikus vagy elektrohidraulikus mozgató berendezést alkalmaznak, mellyel a vezérlés könnyen megvalósítható. A nyúlásmérés illetve vezérlés történhet hossz és keresztirányú nyúlásmérők segítségével. Szobahőmérsékleten legtöbbször nyúlásmérő bélyegeket alkalmaznak.

Termomechanikus fárasztás során és növelt hőmérsékleten történő mérésekhez optikai elven működő érzékelők, vagy megfelelő hőálló anyagú tapintóval rendelkező elmozdulás mérőket használnak. Mivel jelen kutatásban erőműi acélok öregedésével foglalkozunk, ezért megemlítjük, hogy a próbatest előírt hőmérsékletre történő felfűtése a fárasztó berendezésen belül történhet konvektív úton klímakamrában, indukciós tekercsekkel, valamint a ellenállás fűtéssel (Joule-hő). A hőmérsékleti ciklusok maximális elérhető frekvenciája az előbbi felsorolás szerint növekszik. A próbatest keresztmetszete mentén a legegyszerűsebb hőmérséklet elosztást a közvetlen próbatesten átvezetett árammal történő fűtés biztosítja. A hűtés történhet a befogópofákon keresztül vízhűtéssel, valamint közvetlenül a próbatestre fűjt sűrített levegővel. Kutatási munkánkhoz Gleeble 3800 termomechanikus vizsgálóberendezést fogunk alkalmazni (6. ábra). Ennek fő jellemzője, hogy teljesen integrált, digitális, zárt szabályozó rendszerekkel rendelkezik, és különböző gyártási folyamatok valósidejű fizikai szimulációjára, fémek termomechanikus kezelésekre és anyagvizsgálatokra egyaránt alkalmas. A berendezés két fő része a termikus rendszer és a mechanikai rendszer, melyeket a főegység és az ahhoz csatlakoztatott, a szükséges vizsgálathoz célszerűen választott mobil átalakító egység együttese alkotja. A szimulátor vezérlését és szabályozását a vezérlő számítógép végzi. A vezérlés egy Windows-alapú szoftverben készített programok segítségével történik. A programok által lehetőség van számos vezérlési módra, így például az elmozdulás, az erő, az opcionálisan felszerelhető nyúlásmérő, a valódi és a mérnöki feszültség illetve alakváltozás, valamint a hőmérséklet alapján történő vezérlésre.



6. ábra – A Gleeble berendezés

A VIZSGÁLATOK MENETE, DEFINÍCIÓK AZ ÉLETTARTAMRA VONATKOZÓAN

A kisciklusú fárasztóvizsgálat előkészítésénél az első lépés a próbatest befogása, majd a nyúlásmérő felhelyezése. A fárasztási paraméterek beállítása és a regisztráló berendezés élesítését

követően elindítható a fárasztóvizsgálat. A mérés során gondoskodni kell a megfelelő számú hiszterézis hurok rögzítéséről, mely kezdetben (10-20 ciklus) az összes, majd a folyamat előrehaladtával bizonyos ciklusszámokhoz tartozó görbe felvételét jelenti. Amennyiben repedések jelennek meg az állandó alakváltozás amplitúdó mellett ismét jelentősen változik a ciklusonként rögzített feszültségérték, így a hiszterézis görbe alakja is, emiatt ebben a szakaszban ismét indokolt az összes hurok rögzítése.

A tönkremeneteli kritérium meghatározásában nem egységes a szakirodalom. A legelterjedtebb és mérnöki szempontból a legmegalapozottabb a terjedőképes repedés megjelenése. Ennél a definíciónál nehéz megállapítani, hogy adott próbatest geometriához mekkora lehet a repedés mérete. Ezért több kritérium létezik, például tekinthetjük a kísérlet végének azt az időpillanatot, amikor a próbatest teljes keresztmetszetében kettéválik. A két eddig ismertetett kritériumot elemezve megállapíthatjuk, hogy azon gépészeti szerkezeink melyek biztonság szempontjából kritikusak utóbbi tönkremeneteli feltétellel nem vizsgálhatók. Az eddig ismertetett két élettartam kritériumon kívül az alábbiakat szokták még alkalmazni:

- a hiszterézis görbén a nyomó periódusban inflexiós pont megjelenése (két repedt próbatestrész felfekvése)
- a telítődési szakasz maximális erejéhez viszonyított feszültségcsökkenés
- az előző ciklushoz képest meghatározott mértékű feszültségcsökkenés
- a terhelőerőben történő meghatározott csökkenés

AZ EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

Az anyag ciklikus viselkedésének kiértékelésére a kisciklusú fárasztóvizsgálatból az alábbi mérőszámok meghatározása szükséges:

- A teljes nyúlástartomány ($\Delta\varepsilon$), illetve ennek fele: a teljes nyúlásamplitúdó (ε_a).
- A tönkremeneteli kritériumhoz tartozó igénybevételi szám (N_f).
- A képlékeny nyúlástartomány ($\Delta\varepsilon_p$), illetve ennek felét: a képlékeny nyúlás-amplitúdó (ε_{ap}).
- A rugalmas nyúlástartomány ($\Delta\varepsilon_e$), illetve ennek felét: a rugalmas nyúlás-amplitúdó ($\Delta\varepsilon_e$).
- A feszültségváltozás tartománya ($\Delta\sigma$), illetve ennek felét: a feszültségamplitúdó (σ_a). A ciklikus keményedés vagy lágyulás miatt ez az érték folyamatosan változik a

ciklusszám függvényében, vagyis $\Delta\sigma = 2\sigma_a = f(N)$.

- Feszültségtartományt, illetve amplitúdót az élettartam 50 %-nál ($\Delta\sigma_{50}$, illetve σ_{a50}).

KÉPLÉKENY ALAKVÁLTOZÁS AMPLITÚDÓRA ÉPÜLŐ MODELLEK

A képlékeny alakváltozás amplitúdóra épülő modellek tekinthetők a klasszikus módszereknek. Ezek általános egyenlete:

$$\Phi(\varepsilon, \varepsilon^p, \sigma \dots) = f(N_f, \alpha, \beta \dots),$$

ahol α, β anyagi állandók. A Manson-Coffin egyenlet még ma is a legismertebb összefüggés annak ellenére, hogy 1954-ben publikálták. Lineáris kapcsolatot ad a képlékeny alakváltozás amplitúdó és a tönkremeneteli ciklusszám között logaritmikus koordinátarendszerben:

$$\Delta\varepsilon_p N_f^\alpha = C.$$

Az összefüggés jó közelítést bemetszés nélküli, hengeres próbatestek állandó amplitúdójú és frekvenciájú terhelésnél ad.

A növelt hőmérsékleten bekövetkező kúszás, oxidáció és korrózió okozta károsodás hatásának figyelembevételéhez módosították a Manson-Coffin-modellt, amely egy frekvenciát figyelembe vevő tényezőt tartalmaz:

$$\Delta\varepsilon_p (N_f \nu^{k-1})^\alpha = C.$$

A teljes alakváltozás tartomány és a tönkremeneteli ciklusszám kapcsolatára Morrow 1965-ben javasolt összefüggése:

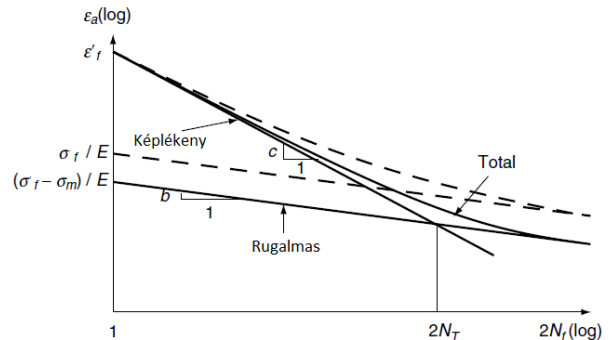
$$\varepsilon_a = \varepsilon_a^e + \varepsilon_a^p = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^\beta + \varepsilon_f' (2N_f)^\alpha,$$

melyet a szakirodalom nyúlás-alakváltozás egyenletnek nevez. Ez összegzetten ír le két különálló görbét, a rugalmas alakváltozás amplitúdó-ciklusszám, valamint a képlékeny alakváltozás amplitúdó-ciklusszám kapcsolatát. Az egyenlet első tagja a Basquin összefüggés, a második a fent ismertetett Manson-Coffin egyenlet.

A közép-feszültség (σ_m) értéke kifaradási élettartamra jelentős hatással van ezért ennek a tényezőnek a figyelembe vételére számos összefüggés született. Ezek azon a megfigyelésen alapultak, hogy a húzóirányú közép-feszültség csökkenti, míg a nyomó közép-feszültség növeli a törésig elviselt ciklusszámot. A leggyakrabban alkalmazott összefüggések Morrow (1968) és Smith (1970) egyenlete. Morrow a közép-feszültség hatását az alakváltozás-élettartam egyenlet rugalmas tagjának módosításával vette figyelembe:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_a^e + \varepsilon_a^p = \frac{\sigma_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^\beta + \varepsilon_f' (2N_f)^\alpha.$$

Az egyenletet a 7. ábrán szemléltetve megállapítható, hogy a kifaradási élettartam pozitív közép-feszültség esetén csökken és egyben növeli az átmeneti fázis élettartamot.



7. ábra – Morrow közép-feszültség-korrekciós modellje

Smith, Watson és Topper, a $\sigma_{\max} \varepsilon_a$ paramétert javasolták a cikluson belüli fázis mértékének meghatározására, melyben a σ_{\max} a maximális húzó-feszültség a ciklus során. Abból a feltevésből indultak ki, hogy a $\sigma_{a,rev} \varepsilon_{a,rev}$ amplitúdóra vonatkozó értékek zéró közép-feszültséggel végzett kísérlet esetén megegyezik az SWT paraméternek nevezett $\sigma_{\max} \varepsilon_a$ értékével, nullától eltérő közép-feszültséggel végzett kísérletre vonatkozóan. Ez a feltevés a következő matematikai formulában fogalmazható meg:

$$\sigma_{\max} \varepsilon_a = \sigma_{a,rev} \varepsilon_{a,rev} \quad \sigma_{\max} > 0$$

Ideálisan viselkedő, a kompatibilitási feltételeket teljesítő anyag esetén a maximális húzó-feszültség:

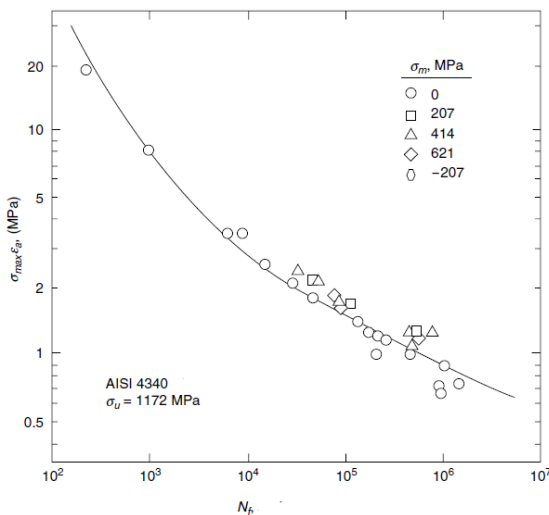
$$\sigma_{\max} = \sigma_a = \sigma_f (2N_f)^\beta.$$

Ezzel a teljes nyúlás-kifaradási ciklusszám összefüggését megszorozva kapjuk az SWT közép-feszültség korrekciós formulát:

$$\sigma_{\max} \varepsilon_a = \frac{(\sigma_f)^2}{E} (2N_f)^{2\beta} + \sigma_f \varepsilon_f' (2N_f)^{\beta+\alpha}.$$

A 8. ábrán példaként 40NiCrMo6 acél eltérő közép-feszültséggel végzett fázisadatok adatai láthatók. A diagramot elemezve megállapítható, hogy különböző közép-feszültségek esetén az SWT paraméterrel jól jellemezhető a kifaradás, az adatok szórása a rájuk illesztett görbéhez viszonyítva kis mértékű. A képlékeny alakváltozásra épülő modellekkel kapcsolatban fontos megemlíteni, hogy egyes kutatók szerint a Manson-Coffin összefüggés tekinthető a mikrorepedés terjedését

leíró empirikus összefüggésnek is, mivel a nagy képlékeny alakváltozások miatt a repedések megjelenése az első néhány ciklusban megfigyelhető. Ebben a felfogásban a kisciklusú fáradás folyamatában a mikrorepedések fejlődése a domináns folyamat és így a Tomkins-féle repedést terjedést leíró egyenletből a Manson-Coffin egyenlet levezethető (Murakami, Miller, 2004). További jellemzője ezeknek az elméleteknek, hogy a bennük szereplő mérőszámok vektor jellegűek és a valódi szerkezetre nehezen átvihetők. A képlékeny alakváltozási amplitúdó a valós berendezés fáradása során folyamatosan változik és az élettartam kimerülés vizsgálatához nem összegezhető. Ezek alapján célszerű fizikailag megalapozottabb és matematikailag egyszerűbben kezelhető kritérium keresése.



8. ábra – Az SWT közép feszültség-korrekciós modell

KÉPLÉKENY ALAKVÁLTOZÁSI MUNKÁRA ÉPÜLŐ MODELLEK

Az előző pontban ismertetett modellekhez képest több előnnyel is rendelkeznek a képlékeny alakváltozási munkára épülő összefüggések. Az egyik ilyen előny, hogy a vezérelt változótól (alakváltozásra vagy feszültségre vezérelt vizsgálat) független a mérés eredménye, a másik, hogy a meghatározott mérőszám fizikailag megalapozottabb, mint a korábban bemutatottak.

Alkalmazásuknak hosszú ideig határt szabott, hogy a gépészeti berendezések kritikus helyein nehéz volt meghatározni a bevitt képlékeny alakváltozási munka mennyiségét. A numerikus módszerek és a számítástechnika fejlődésével az energia alapú méretezés e korlátja megszűnt. Az energia kritériumok alapelve: a próbatest károsodására fordított energia arányos az anyagban lejátszódó károsodási folyamattal. A vizsgálatok során a ciklusonként letárolt nyúlás és feszültség értékekből (hiszterézis görbe) (1. ábra), meghatá-

rozható az egy ciklusban befektetett munka mennyisége. Ez a görbe által közrezárt terület, ezeket összegezve kiszámolható a törésig befektetett munka nagysága.

A kisciklusú fárasztás során bevitt képlékeny alakváltozási munka meghatározására is több összefüggés ismert. Ostergren a következő összefüggést javasolta az egy ciklusban felhalmozott energia számítására:

$$\Delta W^p = \frac{1-n}{1+n} \Delta \sigma \Delta \epsilon$$

Ez a munkát a tönkremeneteli ciklusszámmal megszorozva, az anyag tönkremenetelét okozó fajlagos képlékeny alakváltozási munka meghatározható. Feltner (1980) az egy ciklusban felhalmozott képlékeny alakváltozási munkát a hiszterézis görbe alatti terület leírásával határozta meg:

$$\Delta W^p = \frac{4\sigma_a \epsilon_p}{(1+m)}$$

ahol a számlálóban a képlékeny feszültség –és alakváltozás amplitúdó szerepel a nevezőben az m a keményedést kifejező szám.

Az eddig ismertetett energia alapú kritériumok nem veszik figyelembe, hogy a fárasztás milyen közép feszültséggel, és mekkora hőmérsékleten történik. Gocmez és társai (2009) komplex kritériumot dolgoztak ki szinkron és aszinkron termomechanikus fárasztóvizsgálatok kiértékelésére. A modell az egy ciklusban felhalmozott képlékeny alakváltozási munkán alapul, a feszültség-szintet és a hőmérsékletet figyelembe vevő paraméterekkel:

$$N_f = A \left(\frac{\Delta W^p}{W_u^p} \cdot SCF + ADI_T \right)^c$$

Az összefüggésben a ΔW^p az egy ciklusban felhalmozott képlékeny alakváltozási munka:

$$\Delta W^p = \int_{ciklus} \sigma \cdot d\epsilon$$

a W_u^p a monoton szakító kísérlettel meghatározott alakváltozási munka, törésnél.

Az SCF paraméter a feszültség korrekciós tényező:

$$SCF = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ult} - m \cdot \sigma_{mean}}$$

ahol a σ_{max} a maximális feszültség a hiszterézis görbében, σ_{ult} a szakítószilárdság, σ_{mean} a közép feszültség. Az ADI_T a hőmérséklettől függő károsodást kifejező szám, míg A és c anyagi

állandó, valamint kitevő a modellben, melyeket regresszió analízisből kaphatunk meg. A szerzők az általuk javasolt modellt belsőégésű motorok hengerfejében alkalmazott gömbrákosított vasak széles skáláján alkalmazták, mely eredményeket összehasonlították a klasszikus károsodási modellekkel és melyből megállapítható, hogy az összefüggés jó közelítéssel írja le a magas hőmérsékleten végzett termomechanikai fáradás élettartam függését. A kifáradási szívósság (ΔW^p) által számolt értéke nem hordozza magában azt a tulajdonságot, hogy a ciklusonként elnyelt alakváltozási munka értéke a kisciklusú fáradás során változik. A változás oka, hogy a próbatetest különböző élettartamához, különböző metallográfiai folyamatok köthetők, melyek különböző képlékeny alakváltozás amplitúdó mellett eltérő alakváltozási munka igényel bírnak [4]. Példaként említenénk, hogy az alacsonyabb alakváltozás amplitúdó esetén a diszlokációs folyamatok és a mikrorepedések keletkezésének energiaigénye magasabb. És mivel ezen folyamatok az élettartam bizonyos szakaszaiban jól elkülöníthetően mennek végbe, így a fárasztás alakváltozás amplitúdója és ezen keresztül a törésig elviselt ciklusszám is befolyásolja a teljes alakváltozási munka értékét. Ennek jelenségnek a figyelembevételére bevezették a fáradási szívósság együtthatót (B) és a fáradási szívósság kitevőt (b), melyek a következő

kapcsolatban állnak a teljes fárasztóvizsgálat során bevitt képlékeny alakváltozási amplitúdóval:

$$W_f = B(N_f)^b.$$

Mivel a korszerű anyagvizsgáló berendezéseken lehetőség van a hiszterézis görbék tárolására, ezért felmerül az a kérdés, hogy a reprezentatív hiszterézis görbék segítségével meghatározott képlékeny alakváltozási munka értéke hogyan viszonyul az összes görbe által számolt munka nagyságához. Ennek felderítésére Nagy és társai (2004) végeztek kutatásokat acél próbatestek eltérő teljes alakváltozás amplitúdójú fárasztóvizsgálatával. Munkájuk során arra az eredményre jutottak, hogy a reprezentáns hiszterézis görbék és az összes görbe felhasználásával meghatározott képlékeny alakváltozási munka mindegyik alakváltozás amplitúdó esetén 5%-os szignifikancia szinten azonos.

Az energia alapú kritériumok esetén fontos megemlíteni, hogy kisciklusú fárasztás során bevitt képlékeny alakváltozási munka csak egy része okozza az anyag mikroszerkezetének, diszlokációs szerkezetének megváltozását (károsodását), a munka másik része a fárasztás során hővé alakul az anyagon belül. Amennyiben a hővé alakult munkát levonjuk a képlékeny alakváltozási munkából, a károsodást okozó munkát kapjuk, mely megalapozott méretezési adat lehet [13].

1. táblázat – Klasszikus kifáradási élettartam modellek

Modell	Φ	f
Manson-Coffin	$\Delta \varepsilon_p$	$N_f^{-\alpha} C$
Teljes nyúlás-kifáradási ciklusszám	$\Delta \varepsilon_{mech}$	$\frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^\beta + \varepsilon_f' (2N_f)^\alpha$
SWT	$\sigma_{max}, \Delta \varepsilon_{mech}$	$\frac{(\sigma_f)^2}{E} (2N_f)^{2\beta} + \sigma_f \varepsilon_f' (2N_f)^{\beta+\alpha}$
Morrow	$\sigma_{kozep}, \Delta \varepsilon_{mech}$	$\frac{\sigma_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^\beta + \varepsilon_f' (2N_f)^\alpha$
Módosított Manson-Coffin	$\Delta \varepsilon_p$	$(N_f v^{k-1})^{-\alpha} C$

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen közlemény megkísérelte összefoglalni a kisciklusú termomechanikai fárasztóvizsgálat vizsgálati módszereit, a szükséges berendezéseket, a próbatestek változatait. A munka második fele betekintést ad a fáradási kísérletek kiértékelésének módszereiről, az alakváltozás amplitúdóra és az alakváltozási munkára épülő modellekről.

és az alakváltozási munkára épülő modellekről.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk elkészítését a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0027 számú projekt támogatta. A

projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

TRODALOM

- [1.] B.B. Kerezi, A.G. Kotousov, J.W.H. Price: Experimental apparatus for thermal shock fatigue investigations. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 77 (2000) 425-434
- [2.] C. Petersen, D. Rodrian: Thermo-mechanical fatigue behavior of reduced activation ferrite/martensite stainless steels. *International Journal of Fatigue* 30 (2008) 339-344
- [3.] J. Kwon, S. Woo, Y. Lee, J. Park, Youn-won Park: Effects of thermal aging on the low cycle fatigue behavior of austenitic-ferritic duplex cast stainless steel. *Nuclear Engineering and Design* 206 (2001) 35-44
- [4.] J.A. Abdalla, R.A. Hawileh, F. Oudah, K. Abdelrahman: Energy-based prediction of low-cycle fatigue life of BS 460B and BS B500B steel bars. *Materials and Design* 30 (2009) 4405-4413
- [5.] Jae-do Kwon, Seung-wan Woo, Yong-son Lee, Joong-cheul Park, Youn-won Park: Effects of thermal aging on the low cycle fatigue behavior of austenitic-ferritic duplex cast stainless steel. *Nuclear Engineering and Design* 206 (2001) 35-44
- [6.] L. F. Coffin: Fatigue at high temperature – Prediction and interpretation. *Proc. Instn. Mech. Engrs.* 1974 Vol. 188 9/74
- [7.] Lehofer Kornél: Az alakváltozással vezérelt kisciklusú fáradás törvényszerűségei, *Anyagvizsgálók Lapja*, 2004/3. www.anyagvizsgálóklapja.hu, p.: 79 -86
- [8.] M. Grosse, M. Niffenegger, D. Kalkhof: Monitoring of low-cycle fatigue degradation in X6CrNiTi18-10 austenitic steel. *Journal of Nuclear Materials* 296 (2001) 305-311
- [9.] M.D. Callaghan, S.R. Humphries, M. Law, M. Ho, P. Bendeich, H. Li, W.Y. Yeung: Energy-based approach for the evaluation of low cycle fatigue behaviour of 2.25Cr-1Mo steel at elevated temperature. *Materials Science and Engineering A* 527 (2010) 5619-5623
- [10.] M.V. Borodii, M.P. Adamchuk: Life assessment for metallic materials with the use of the strain criterion for low cycle fatigue. *International Journal of Fatigue* 31 (2009) 1579-1587
- [11.] Mageshwaran Ramesh Hans J. Leber , Markus Diener Ralph Spolenak: Conducting thermo-mechanical fatigue test in air at light water reactor relevant temperature intervals. *Journal of Nuclear Materials* 415 (2011) 23-30
- [12.] N. Haddar, A. Köster, Y. Kchaou, L. Remy: Thermal-mechanical and isothermal fatigue of 304L stainless steel under middle range temperature. *C. R. Mecanique* 340 (2012) 444-452
- [13.] Nagy Gyula: A kisciklusú fárasztás kutatásának újabb eredményei a Miskolci Egyetemen, *Anyagvizsgálók Lapja*, 2004/3. www.anyagvizsgálóklapja.hu, p.: 75 -78
- [14.] Nagy Gyula: Anyagok károsodása és vizsgálata különböző üzemi körülmények között, Kisciklusú fárasztás, Miskolci Egyetem, TEM-PUS S_JEP_11271 projekt támogatásával, Miskolc, 1999
- [15.] NWM Bishop, Dr F Sherratt: Finite Element Based Fatigue Calculations. NAFEMS, 2000
- [16.] S.L. Mannan, M. Valsan: High-temperature low cycle fatigue, creep-fatigue and thermo-mechanical fatigue of steels and their welds. *International Journal of Mechanical Sciences* 48 (2006) 160-175
- [17.] Szekeres A, Pramila A, Heat and Moisture in Solids: Dynamical Sorption with Microcracks, EUROMECH 436 Nonlinear Waves in Microstructured Solids, May 29 – June 1, 2002, Tallinn, Estonia
- [18.] T. Bíró, J. Csizmadia: Recent technique for thermal-fatigue simulation of heat-resistant steels. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 56/2 (2012) 105-110
- [19.] Taner Gocmez, Ali Awarke, Stefan Pischinger: A new low cycle fatigue criterion for isothermal and out-of-phase thermomechanical loading. *International Journal of Fatigue* 32 (2010) 769-779
- [20.] Tóth L, Rózsahegyi P: Kisciklusú fárasztóvizsgálatok eredményei és energetikai értékelése. Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közalapítvány Logisztikai és Gyártástechnikai Intézet
- [21.] Trampus Péter: A reaktortartály biztonságának elemzése. *Fizikai Szemle* 2008/9 287-292
- [22.] V. Maurel, L. Rémy, F. Dahmen, N. Haddar: An engineering model for low cycle fatigue life based on a partition of energy and microcrack growth. *International Journal of Fatigue* 31 (2009) 952-961
- [23.] Y. Murakami, K.J. Miller: What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process. *International Journal of Fatigue* 27 (2005) 991-1005
- [24.] Yung-Li Lee Jwo PanRichard B. Hathaway Mark E: Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice), Barkey 2005, Elsevier Inc.
- [25.] Yusuke Kudo, Kouichi Kikuchi, Masakatsu Saito: Thermal fatigue crack propagation behaviour of F82H ferritic steel. *Journal of Nuclear Materials* 307-311 (2002) 471-474