

Következtetések, megjegyzések

G. Charpy 1901-ben publikálta [7] első előadását az anyagok ütővizsgálatáról. Az eltelt száz évben számos kutatási eredmény és tanulmány látott napvilágot a különböző anyagokra. Mint a bevezetőben hangsúlyoztuk, a műanyagok ütővizsgálatával nyert eredményeket számos tényező jelentősen befolyásolja. E tényezők között a vizsgált test geometriájától függő rugalmassága a legfőbb kényszere az ütővizsgálati eredmények tervezési célú felhasználásának. A valós szerkezeti elem különleges külső igénybevétel hatása közbeni viselkedésének tanulmányozásához a mérnököknek az anyag belső, az elem alakjától független, tulajdonságainak (pl. a rugalmassági modulus) ismeretére van szükségük. Az anyag – vonatkozó szabványok szerint meghatározott – rugalmassága nem belső tulajdonsága magának az anyagnak. Hosszú idő óta használják már és nagyon fontos az anyag jellemzésére az ütőszerű terhelés, mivel ez az egyetlen olyan adat a műanyag „azonosító kártyáján”, amely pótolhatatlan az anyagok kiválasztásához és összehasonlításához. Az ütés elemzésén alapuló törésmechanika, amely a WLEFMHR szoftvernek is az alapja, mérnöki eszközt kíván adni a valós szerkezeti elem viselkedésének a megértéséhez. A K_{IC} vagy a G_{IC} ismerete a jellemző hőmérsékleten kitölti a rést az anyag rugalmassága és a tervezési adatigény között.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk Prof. A. Pavon úrnak (Politecnico di Milano – Milánó – Olaszország) a WLEFMHR szoftver kifejlesztéséhez nyújtott segítségével. Megkülönböztetett tisztelet illeti Dott. M. Grosso urat (ügyvezető igazgató – Ceast SpA, Pianezza (To), Olaszország), hogy bízott az ütés legkorszerűbb fejlesztésében és folyamatosan támogatta

a WLEFMHR szoftver ipari kifejlesztése (ellenőrzés, piacositás) során a Ceast K+F tevékenységét.

Irodalom

- [1] P. E. Reed: Impact testing of plastics for design. Department of Materials, Queen Mary College, London
- [2] J. G. Williams: KIC and GC at slow speeds for polymers; in Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers and Composites, edited by D. R. Moor, A. Pavan, J. G. Williams, published by Elsevier, Oxford (2001), pp. 11–26.
- [3] A. Pavan: Determination of fracture toughness (KIC and GIC) at moderately high loading rates; in Fracture Mechanic Testing Methods for Polymers and Composites, edited by D. R. Moor, A. Pavan, J. G. Williams, published by Elsevier, Oxford (2001), pp. 27–58.
- [4] J. G. Williams: Fracture Mechanics of Polymers, Ellis Horwood, Chichester, UK, 1984
- [5] A. Pavan, S. Draghi: Further experimental analysis of the dynamic effects occurring in three-point bending fracture testing at moderately high loading rates (1 m/s) and their simulation using an ad hoc mass-spring-dashpot model; in Fracture of Polymers, Composites and Adhesives, edited by J. G. Williams, A. Pavon published by Elsevier, Oxford (2000), pp. 347–361
- [6] ISO 179-2:1997, Plastics – Determination of Charpy impact properties – part 2: Instrumented impact test
- [7] G. Charpy: Essay on Metals Impact Bend Test of Notched Bars (reprint from 1901), Pendulum Impact Testing: A Century of Progress, ASTM STP 1830, T. A. Siewert and M. P. Manahan, Sr., Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (2000), pp. 46–69.

Lektorálta és fordította: Lehofer Kornél

Növelt szilárdságú hegesztett acél repedésterjedési tulajdonságainak vizsgálata

Csapó Péter*

Hegesztett szerkezeteink, azaz a varratok és azok közvetlen környezete tartalmaz bizonyos mennyiségű belső anyagfolytonossági hiányt, mely a törés veszélyét fokozza. Az egyszerűbb törésmechanikai elméletekkel az egytengelyű statikus és fáradásos igénybevételek okozta tönkremeneteleket viszonylag jól tudjuk kezelni. A gondot az okozza, hogy a hibák orientációja véletlenszerű, a terhelés pedig összetett. Ezt a gondolatot folytatva végeztem négyponos, aszimmetrikusan terhelt hegesztett próbatesteken repedésterjedési vizsgálatokat.

Bevezetés

Szerkezeteink törési okai még mindig 70–80%-ban kifáradásra vezethetők vissza, annak ellenére, hogy régóta kiemelten vizsgáljuk a jelenséget. Az anyag viselkedését eleinte ismétlődő igénybevétel hatására a Wöhler-görbe alapján meghatározható tartamszilárdsággal és kifáradási határral jellemeztük, majd vizsgáltuk a próbatest feszültségi állapotának (feszültséggyűjtő hely) és a feszültség időbeli lefolyásának ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$) hatását. Számos – időben elhúzódó – méréssel meghatározhatjuk azon biztonsági diagramokat, melyekről elmondható az, hogy ha a szerkezet méretezésénél kiszámított statikus feszültség és a rászuperponált váltakozó feszültség által meghatározott pont a biztonsági terület belsejébe esik, akkor a két feszültség eredője törést még nem okozhat. Hegesztett szerkezeteink, azaz a varratok és azok közvetlen környezete tartalmaz bizonyos mennyiségű belső anyagfolytonossági hiányt, mely a törés veszélyét fokozza. A törésmechanika klasszikus esetben abból indul ki, hogy a repedés vagy az azt valamilyen formában kiváltó ok (diszlokációtörődés, rideg fázis stb.) már eleve megtalálható

az anyagban vagy pedig a gyártás (hegesztés, hőkezelés stb.) illetve az üzemelés alatt keletkezik.

A hegesztett kötésben lévő hibák veszélyességét leegyszerűsítve a lekerekítési sugaruk alapján értékeljük, tehát legveszélyesebbnek a két-méretű, síkszerű hibák, azaz a repedések tekinthetők. Egy adott szerkezet esetén fontos a hibák méretváltozásának (pl. fáradásos repedésterjedés révén) figyelemmel kísérése, a repedésterjedési folyamat megismerése, illetve a repedésterjedési sebesség meghatározása mind az anyagban, mind pedig a hegesztett kötésben. Ezt az is indokolja, hogy a repedések elsősorban a varratban, illetve annak környezetében jelentkeznek. A repedések terjedése a ridegtörés kockázatának jelentős növekedését eredményezi, s így a hegesztett szerkezet statikus és kifáradási tulajdonságait is drasztikusan csökkenti.

A klasszikusnak számító egytengelyű statikus – mint például a „tiszt” húzás, nyomás, hajlítás, csavarás – és fáradásos igénybevételeket, az „egyszerűbb” törésmechanikai elméletekkel viszonylag jól tudjuk kezelni, azaz a méretezéseknél, illetve az élettartambecsléseknél az ilyen igénybevételek nem jelenthetnek problémát [1]. A gondot az okozza, hogy ezen egyszerűbb elméletek egy adott egytengelyű igénybevételi típus mellett rendszerint homogén, izotróp anyagot tételeznek fel, illetve speciális helyzetű repedésekkel, eltérésekkel foglalkoznak, holott a hegesztett kötésekben, illetve azok közvetlen környezetében létrejövő hibák orientációja véletlenszerű, a terhelés pedig többtengelyű, összetett.

A terhelés irányával tetszőleges nagyságú Θ szöget bezáró repedés esetére statikus és ciklikus igénybevételekre G. C. Sih bevezette az alakváltozási energiasűrűséget, mely a különböző a_j együtthatókkal, illetve a K_j feszültségintenzitási tényezőkkel az alábbi módon írható le:

$$S = a_{11} \cdot K_1^2 + 2a_{12} \cdot K_1 \cdot K_{11} + a_{22} \cdot K_{11}^2 + a_{33} \cdot K_{111}^2$$

Az alakváltozási energiasűrűség tényező (S) a törési szívóssággal

*hegesztési főmérnök, AGMI Anyagvizsgáló és Minőségellenőrző Rt., H 1211 Budapest, Gyepsor u. 1., H-1751 Budapest Pf.:114, 277-49-01, agmimtech@axelero.hu

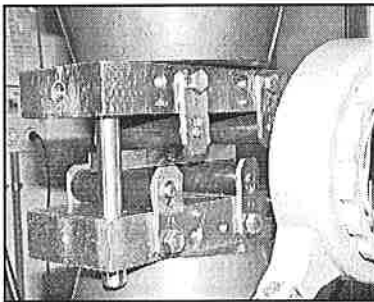
(K) ellentétben a repedésterjedés irányáról (repedés elhajlás), valamint a repedés esetleges elágazásairól is tájékoztat. A Sih által bevezetett ciklikus alakváltozási energiasűrűséggel az alábbi módon határozható meg a repedésterjedés sebessége is [2, 3]:

$$\frac{da}{dN} = B \cdot \Delta S^m$$

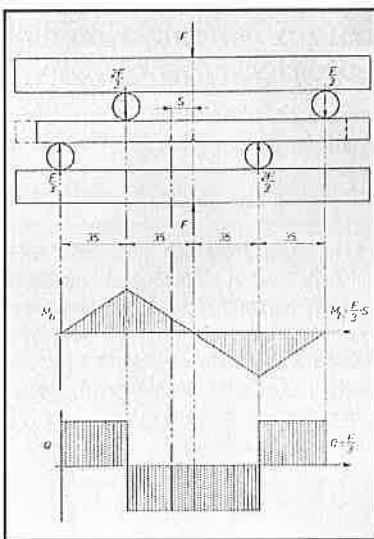
Vizsgálataim során ezen összefüggést felhasználva határoztam meg a repedésterjedés sebességét többtengelyű ciklikus igénybevétel esetére, tekintettel arra, hogy így a valósághoz legközelebb álló eredményt kaphattam.

Repedésterjedési vizsgálatok

A repedésterjedési vizsgálatokhoz az iparban egyre népszerűbb növelt szilárdságú, hegeszthető, finomszemcsés szerkezeti acélból gyártott lemez (QStE 690 TM, lemezvastagság = 15 mm) tompavarratos kötést használtam, mely fogyóelektrodás aktív védőgáz (135) eljárással, 1,2 mm átmérőjű X70 IG huzallal, M21 védőgáz melletti többsoros hegesztéssel készült. Az eljárás az MSZ EN 288-3:1998 számú szabvány által előírt roncsolásmentes, illetve statikus és dinamikus igénybevételű roncsolásos vizsgálatok eredményei alapján megfelelőnek bizonyult.



1. számú fényképfelvétel négypontos aszimmetrikusan terhelt próbatétel vizsgálati elrendezése



1. ábra. A négypontos aszimmetrikusan terhelt próbatétel igénybevételi ábrái

A repedésterjedési vizsgálatok elvégzéséhez az alapanyagból, illetve a varrat vonalára merőlegesen (keresztirányban) a hegesztett kötésből 5 – 5 darab V-bemetszésű próbatestet munkáltunk ki, mely a hegesztés esetén a varrat tengelyébe eső korona oldali bemetszést jelentett. A próbatesteket hárompontos hajlítás alkalmazásával előrepszetttem, majd egy speciális készülék segítségével négypontos aszimmetrikus terhelésű vizsgálat-sort hajtottam végre, öt, különböző aszimmetria-tényezőjű (R = F_{min}/F_{max} = 0,1-től 0,5-ig) igénybevétellel. A vizsgálati elrendezést mutatja az 1. számú fényképfelvétel.

Az összetett igénybevétel során hajlítás és nyírás, azaz az I. és II. repedéskinyílási mód egyszerre lépett fel (1. ábra).

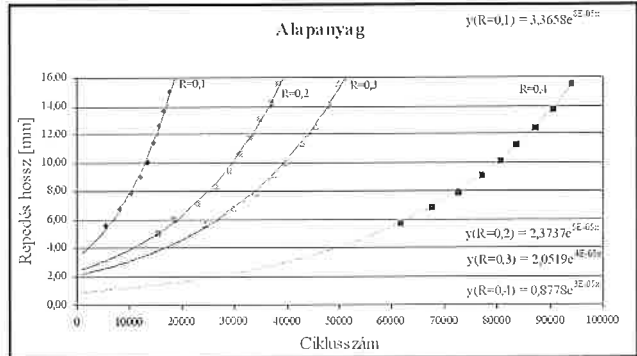
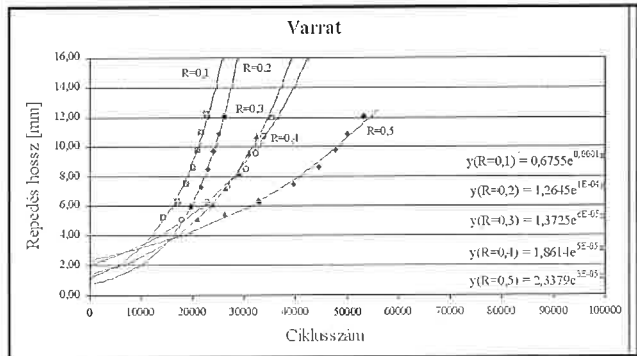
Ezen igénybevételek hatására a repedés terjedése során elhajlik, azaz az aszimmetriát létrehozó kezdeti eltolás (15 mm) értéke és vele együtt a hajlítónyomaték is változik.

A vizsgálatok eredménye

A Sih-féle repedésterjedési egyenletet logaritmizálva az alábbi összefüggést kapjuk:

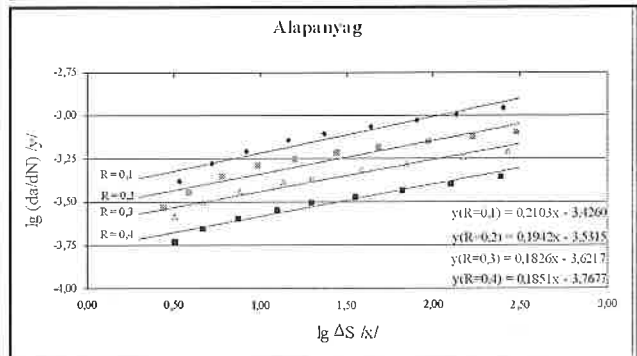
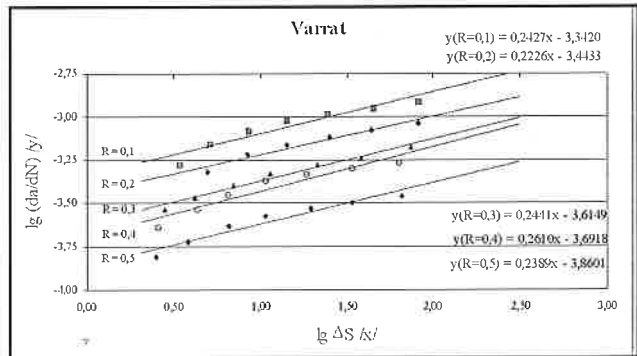
$$\lg(da/dN) = \lg B + m \cdot \lg(\Delta S)$$

A fáradásos vizsgálatok során felvehetőek a repedéshossz-ciklusszám (a – N) görbék, melyekből kitűnik, hogy azonos igénybevétel mellett a varratból kimunkált próbatestekben a repedésterjedés gyorsabb (2. és 3. ábra).



2. és 3. ábra. Repedés terjedése a ciklusszám függvényében különböző aszimmetria tényezők mellett

A görbék egyenletei, illetve a terhelések alapján a ΔS ciklikus alakváltozási energiasűrűség tényező értékei számolhatóak, így felvehető az $\lg(da/dN) - \lg \Delta S$ diagramok (4. és 5. ábra).



4. és 5. ábra. Az alapanyag és a varrat $\lg(da/dN) - \lg \Delta S$ diagramjai különböző aszimmetria tényezők mellett

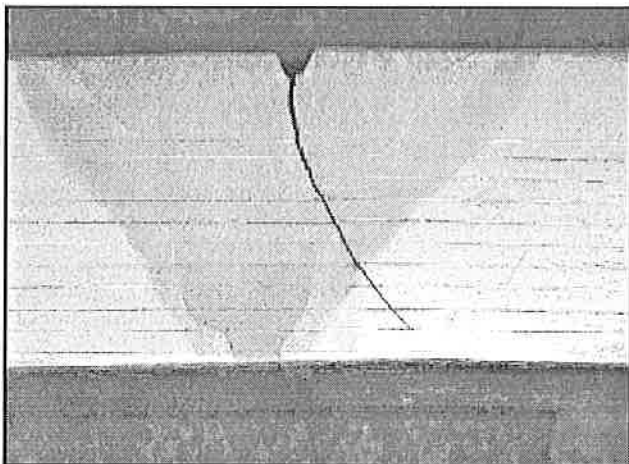
Lineáris regresszióval a Sih-féle egyenlet B és m paraméterei könnyedén meghatározhatók, melyek a következők:

Aszimmetria tényező	Varrat		Alapanyag	
	$B[x10^{-4}]$	m	$B[x10^{-4}]$	m
R = 0,1	4,54	0,243	3,75	0,210
R = 0,2	3,60	0,223	2,94	0,194
R = 0,3	2,49	0,244	2,39	0,183
R = 0,4	2,03	0,261	1,71	0,185
R = 0,5	1,38	0,239	-	-

Értékelés

A repedés terjedése a varratban gyorsabb, mert míg az alapanyag szövetszerkezete viszonylag homogén, addig a többsoros tompavarrat szövetszerkezetének soronkénti sugaras jellege bizonyos irányitottságot ad a repedésnek, illetve összetett igénybevételnél a repedés elhajlásának. Ez jelentősen megkönnyítheti a repedésterjedést, megnövelve annak sebességét. Ebből az következik, hogy a varrat felépítése, a sorok elrendezése fontos lehet egy fáradásos igénybevételnek kitett szerkezeti elem élettartamát illetően [4].

A varratból kimunkált próbatestek esetén a repedés elhajlása során mindhárom szövetszerkezeti zónán áthaladt (2. és 3. számú fényképfelvétel). Nem mellékes, hogy míg az ömledék sugaras jellegű, tehát a repedésterjedés szempontjából is irányított, addig a hőhatásövezet, illetve az alapanyag homogénebb szerkezetűnek mondható, így a különböző zónákban változik a repedésterjedés sebessége.



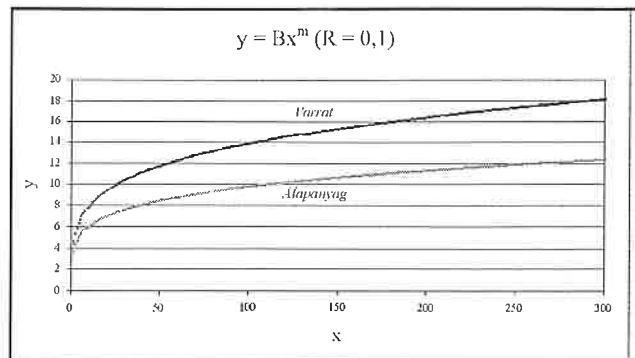
2. és 3. számú fényképfelvétel
Repedéselhajlás a próbatest makroszkópi képén

A meghatározott Sih-paraméterek az anyagra, illetve a különböző zónákra jellemző adatok, így egy adott terhelési szint mellett összehasonlíthatóvá válnak az egyes repedésterjedési tulajdonságok. Az össze-

hasonlítás legkönnyebben úgy hajtható végre, hogy ha a Sih- egyenletet hatványfüggvényként ábrázoljuk, azaz:

$$y = Bx^m$$

A legkedvezőtlenebb terhelési szinthez (R = 0,1) tartozó B és m paramétereket behelyettesítve a 6. ábrán látható görbéket kapjuk.



6. ábra. Az R=0,1 terhelési szinthez tartozó hatványfüggvény

A görbékkel látható, hogy a varrat repedésterjedés szempontjából sokkal veszélyesebb, mint az alapanyag, így tervezésnél, élettartambecslésnél a varrat tulajdonságai kell hogy mérvadóak legyenek. Ezt az is indokoltá teszi, hogy rendszerint a varratban és környékén találhatók a repedések, illetve a síkszerű hibák.

A legkedvezőtlenebb terhelési szintnél (R = 0,1) az alábbiak szerint alakul az alapanyag és a varrat repedésterjedési sebessége összetett igénybevétel esetén:

Ciklikus alakváltozási energiasűrűség ΔS [N/mm]	Repedésterjedés sebessége $(da/dN) \times 10^{-4}$	Százalékos eltérés $\frac{(da/dN)_{Varrat}}{(da/dN)_{Alapanyag}} \cdot 100$
10	6,05	7,94 + 31 %
20	7,00	9,40 + 34 %
30	7,62	10,38 + 36 %
40	8,09	11,13 + 38 %
50	8,48	11,75 + 39 %

Az eredményekből kitűnik, hogy jellemző alakváltozási energiasűrűségek mellett a repedés – azonos terhelési szint esetén – a varratban kb. 35%-kal gyorsabban terjed, mint az alapanyagban.

Összefoglalás

Az elvégzett vizsgálatok eredményei azt igazolják, hogy egy szabványos módon megfelelően minősített varrat többtengelyű fáradásos igénybevétel hatására lehet jelentősen rosszabb repedésterjedés szempontjából, mint az alapanyag. Indokolt esetben – a nagyobb biztonság érdekében – a hegesztett szerkezeteink élettartambecslésénél a valóságos terhelési viszonyokat leginkább megközelítő (többtengelyű) igénybevételek alkalmazásával szükséges az alapanyag és a varrat repedésterjedési tulajdonságainak összehasonlítása.

Irodalom

- [1] Blumenauer-Pusch: Műszaki törésmechanika, Budapest 1987.
- [2] G. C. Sih – B. M. Barthelemy: Mixed mode fatigue crack growth predictions, Engineering Fracture Mechanics 1980.
- [3] T. Yokobori. – I. Maekawa – A. T. Yokobori – K. Sato: A new methodology for the study of fracture criterion for the notched or cracked specimen under mixed modes I. and II., Proceedings of an International Symposium on absorbed specific energy and/or strain energy density criterion, Budapest 1980.
- [4] Csapó Péter: Növelt szilárdságú hegesztett acél repedésterjedési tulajdonságainak vizsgálata, BME hegesztő szakmérnöki diplomamunka, Budapest 2001.