

J-integrál meghatározása numerikus modellezéssel a szabványosan nem kiértékelhető esetekben

Determination of J-integral by numerical modelling for non-standard cases

UNGÁR Péter¹, ERDEI Réka², BÉZI Zoltán³

^{1,2,3} Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., 3519 Miskolc, Iglói út 2.,
info.szi@bayzoltan.hu, <https://www.bayzoltan.hu/>

Abstract

The aim of this paper is to develop a simulation method that can be applied to cases that are not addressed and cannot be evaluated by these standards, and that also deal with real crack front shape. In the simulations, the values of the J-integral for different crack fronts are determined in a CT test case, for which the crack shape is determined from the results of a damage simulation. The same procedure is applied to a weld in a nozzle with the same material properties as the CT specimen.

Keywords: J-integral, CT specimen, FEM, crack propagation, fracture mechanics

Kivonat

A cikk célja olyan szimulációs módszer fejlesztése, mely a szabvány által nem kezelt és nem kiértékelhető esetekben is képes megállapítani a J-integrál értékét, valamint kezeli a valós repedésfront alakot is. A szimulációk során CT próbatesten határozzuk meg a J-integrál értékeit különböző repedésfrontoknál, melyhez károsodást tartalmazó szimuláció eredményeiből határozzuk meg a repedés alakját. Ugyanezt az eljárást alkalmazzuk egy csonkban található varratnál, mely anyagjellemzőit tekintve a CT próbatesttel megegyező.

Kulcsszavak: J-integrál, CT próbatest, VEM, repedésterjedés, törésmechanika

1. BEVEZETÉS

Számos szabványos próbatestre léteznek analitikus megoldások [1, 2] a törésmechanikai paraméterek (J-integrál, feszültségintenzitási tényező) meghatározására, mely számítások homogén anyagtulajdonságokat és egyenes repedésfrontot feltételeznek. Célunk egy olyan szimulációs módszer fejlesztése, mely a szabvány által nem kezelt és nem kiértékelhető esetekre is alkalmazható, valamint kezeli a valós repedésfront alakot is. A szimulációk során egy heterogén varratban terjedő repedésnél vizsgáljuk a J-integrál értékét 0.16CT próbatesten, különböző repedésfrontoknál. A szimulációk során először a károsodást tartalmazó modellek eredményeiből határozzuk meg a repedésfront alakját, melyre modellt építve a terjedés több pontjában meghatározzuk a J-integrál értékét. Ezeket hasonlítjuk össze a vizsgálati eredményekkel, melyeket az ASTM-E1921-20 szabvány alapján határoztunk meg. Ugyanezt az eljárást alkalmazzuk egy csonkban található varratnál, mely anyagjellemzőit tekintve a CT próbatesttel megegyező. A CT próbatest vizsgálati és szimulációs eredményeit összevetjük a csonk modellezésből kapott értékekkel.

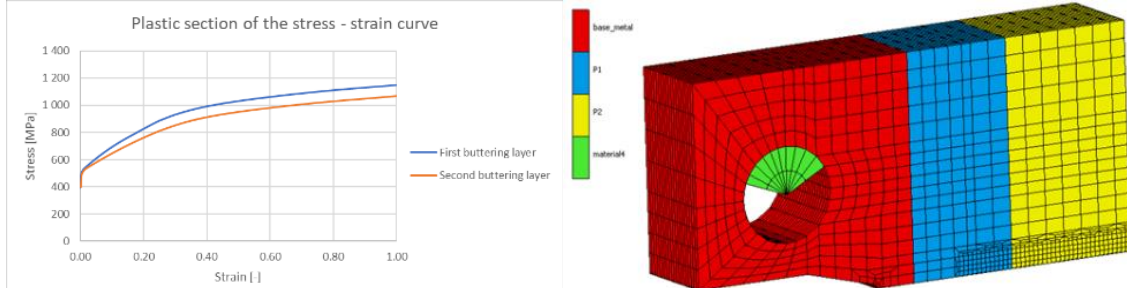
2. J-INTEGRÁL ÉRTELMEZÉSE

A J-integrál az anyagban a törési energia felszabadulási sebességének vagy az egységnyi törési felületre jutó munkának (energiának) a kiszámítására szolgál. A J-integrál elméleti koncepcióját James R. Rice [3] dolgozta ki. A teljes J-integrált a rugalmas és a képlékeny részek külön-külön történő figyelembevételével számítják ki a következő egyenlettel: $J = J_e + J_p$, ahol J_e a J-integrál rugalmas, a J_p pedig a képlékeny része. A J-integrál rugalmas része közvetlenül kapcsolódik a feszültségintenzitási tényezőhöz, K -hoz, a $J_e = K^2/E'$ összefüggésen keresztül, melyben $E' = E$ síkbeli feszültség esetén (E a Young-modulus), és $E' = E/(1-\nu)^2$ (ν a Poisson-tényező) síkbeli alakváltozás esetén. A J integrál és a feszültségintenzitási tényező tudatában leírható az anyagban a repedésterjedés.

3. VÉGESELEM MODELLEK 0.16CT PRÓBATESTEK ESETÉN

A kutatás során két végeelem modell készült el az MSC. MARC szoftver segítségével, az egyik – károsodási modell – segítségével meghatároztuk a repedésterjedés mértékét és a repedés alakját, majd ezt követően adott repedésterjedéshez tartozó J integrál értékeket határoztunk meg egy külön modellben, melyet a vizsgálatokból származó eredményekkel hasonlítottunk össze.

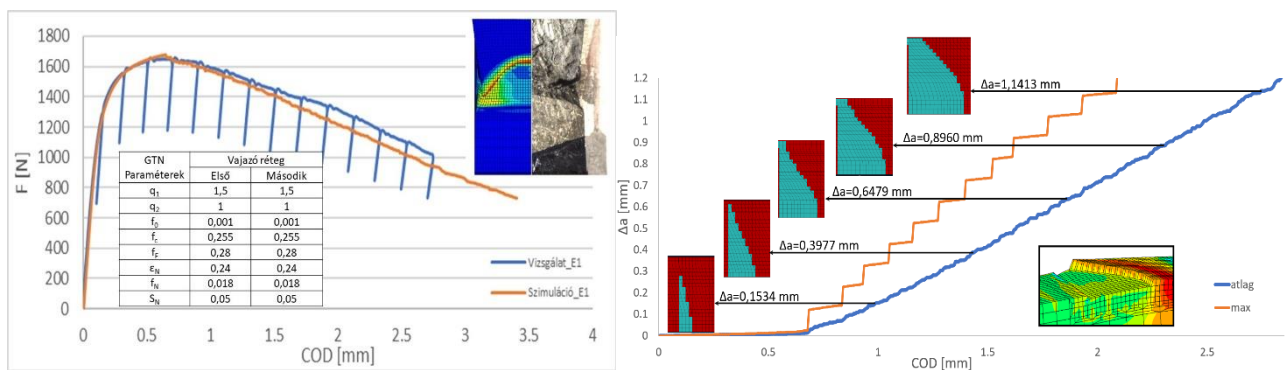
A cikkben vizsgált esetek egy heterogén hegesztési varratból oly módon kivágott 0.16CT próbatestek, melyek az alapanyagon kívül két vajazóréteget tartalmaznak. A vajazó rétegek képlékeny anyagtulajdonságait az 1. ábra szemlélteti, mely ábra jobb oldalán az anyagok elhelyezkedése is látható a próbatestben.



1. ábra. A különböző vajazó rétegek képlékeny tulajdonsága és az anyagok elhelyezkedése a CT próbatestben

2.1. Károsodást tartalmazó modellek

A károsodást tartalmazó modellek esetén a szimulációs eredmények összehasonlításra kerültek a vizsgálati eredményekkel, mely során a károsodási (Gurson-Tvergaard-Needleman-féle) paraméterek [4] lettek meghatározva a vizsgálati eredmények segítségével (2.a ábra).



2. ábra. a) Szimulációk és vizsgálatok összehasonlítása a károsodási modellek esetén

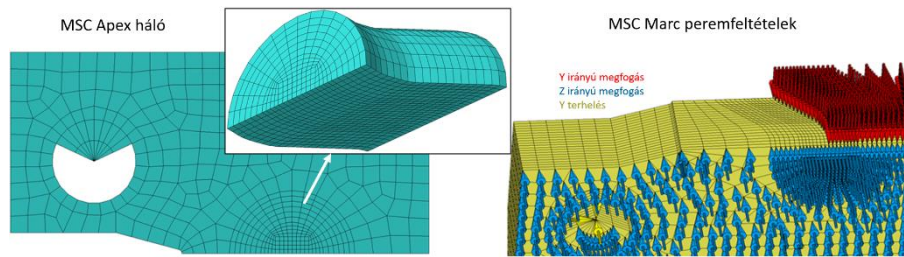
b) Az átlagos és maximális repedésterjedés a repedésszétnyílás (COD) függvényében és egyes repedésalakok ábrázolása

Az MSC Marc program hátránya, hogy J-integrált csak adott repedésalakra tud számolni károsodás nélkül. Mivel a repedés terjedése során elemek deaktiválódnak a modellben, ez ebben a formában nem volt alkalmas arra, hogy a J-integrál számítható legyen. Ennek megoldására külön modelleket kellett létrehozni, melyek már tartalmazzák az eredeti modell kiválasztott időlépéseihez tartozó repedésalakokat. Ehhez a károsodási modellt tartalmazó szimulációból fel lett véve az átlagos és a maximális repedésterjedés értéke a repedésszétnyílás (COD) függvényében, melyet a 2.b ábra szemléltet.

2.2. J integrál meghatározására létrehozott modellek

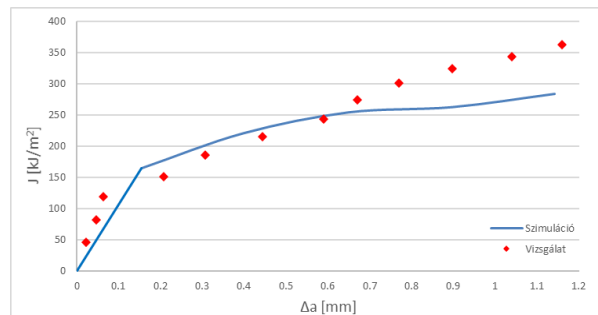
A J-integrál számításához összesen 6 repedésalakot vizsgáltunk meg, ebből egy csak az előrepesztést tartalmazta (2.b ábra). A legnagyobb $\Delta a=1,1413$ mm és a legkisebb $\Delta a=0,1534$ mm közötti tartományt osztottuk fel egyenletesen. Mivel a J-integrál számítása körintegrállal történik, az MSC Marc programban definiálni kell azt a sugarat, ami mentén a számítási pontokat keresi. Ehhez olyan hálóra volt szükség, mely koncentrikus és egységes, melyet az MSC Apex segítségével készítettünk el. A pontosabb eredményekhez hexa hálót használtunk. További kritérium, hogy a repedésfront mentén is egyenletes legyen a végeelemes háló. A félkörön létrehozott felületi hálóval a J-integrál számítási tartományát az alakja ellenére is egyenletessé lehetett tenni. Az elkészült tartományt és a teljes végeelem hálót az egyik repedésalaknál a 3. ábra mutatja. A

J-integrál számításának szempontjából a geometria többi részének végelesemes hálója kevésbé lényeges. A hálózási szempont a jó konvergencia, stabilitás volt, valamint az elemek minősége. Az elkészült modellt az MSC Marc programba importálva a peremfeltételek is definiálva lettek. A negyed geometria miatt értelmezve lettek megfogásokkal az y és z irányú szimmetriák. A piros színnel jelzett szimmetriát úgy vettük fel minden modellnél, hogy ezzel a repedésalakot reprezentálni tudjuk.



3. ábra. A végeelem háló és a peremfeltételek alkalmazása

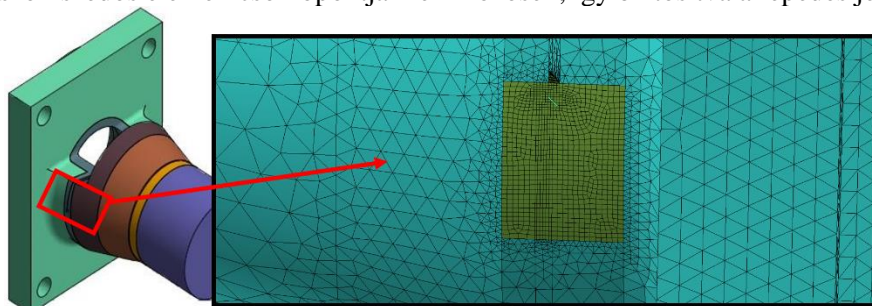
A 4. ábra az átlagos J-integrál értékeket mutatja a Δa függvényében összehasonlítva a szimulációs és a vizsgálati eredményeket. Amint látható a szimuláció a mért értékekhez képest alulbecsüli a J-integrál értékeit. A görbe kezdetén még jó egyezést mutatnak, azonban a repedés terjedésével az értékek távolodnak egymástól. Ez valószínűleg a próbatest típusának köszönhető, mivel a vizsgálatoknál használt ASTM E1921-20 szabvány normál méretű próbatestek esetére, egyenes repedésfrontot feltételeznek. Az ilyen mini próbatestek esetében már egy kis különbség is vezethet a Δa értékek közötti eltéréshez.



4. ábra. A szimulációs és vizsgálati eredmények összehasonlítása

4. J-INTEGRÁL MODELLEZÉSE EGY CSONK HEGESZTÉSI VARRATÁNÁL

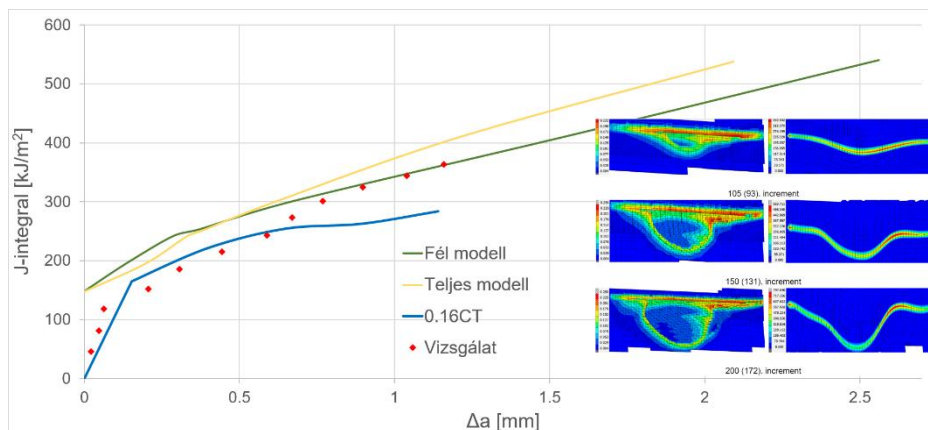
A 0.16CT próbatesteken kifejlesztett módszerrel vizsgáltuk egy csonknál lévő hegesztési varratot is, mely a CT próbatesttel megegyező anyagokat tartalmazott. A hegesztési varratban elhelyezkedő repedés esetén határoztuk meg a J-integrál értékét. A repedést tartalmazó tartomány hexa elemekkel, a modell többi része tetra elemekkel készült el, ahogy azt az 5. ábra is mutatja. A repedés síkjában az előrevezetés irányából a repedésfrontig a szomszédos elemek csomópontjai nem közösek, így biztosítva a repedés jelenlétét.



5. ábra. Repedést tartalmazó csonk végeelem hálója a repedés környezetében

A körintegrálhoz a számítási sugár „automatikus topológiai kereséssel” lett beállítva, 6 db tartománnyal. Ekkor a program automatikusan megkeres 6 integrálási sugarat. A J-integrál értékének az az eredmény lett kiválasztva, mely az egyenletesen hálózott tartományba esik és a sugár növelésével már nem változik az értéke. A modellek esetén a repedésalakokat szintén a károsodást tartalmazó modellekből vettük ki és ezeket

alkalmaztuk a J-integrál számításnál. A 6. ábrán lévő vizsgálati eredmények mutatják a J-integrál értékeit teljes és fél modell esetén az előbbi fejezetben szereplő CT próbatest szimulációs és vizsgálati eredményeivel. Az ábrán továbbá látható az üreghányad és a J-integrál értékek adott időlépésekben.



6. ábra. A szimulációs eredmények és a vizsgálat összehasonlítása

5. ÖSSZEFOGLALÁS, KONKLÚZIÓ

A cikk bemutatott egy folyamatot egy szimulációs módszer fejlesztéséről, mellyel J-integrál számítható a szabvány által nem definiált esetekben is, a valós repedésfront alakját figyelembevéve. Egy heterogén varratban terjedő repedésnél vizsgáltuk a J-integrál értékét és meghatároztuk a törésmechanikai modellezéshez szükséges Gurson paramétereket, valamint a repedésfront alakját. A szimulációk eredményeül kapott J-integrál értékeket összehasonlítottuk a vizsgálati eredményekkel, melyeket az ASTM-E1921-20 szabvány alapján határoztunk meg. Egy csonkban található varratnál ugyanezen eljárást alkalmazva meghatároztuk a J-integrál értékeket. A CT próbatest vizsgálati és szimulációs eredményeit összevetettük a csonk modellezésből kapott értékekkel. A CT próbatest vizsgálati és szimulációs eredményei közötti eltérés egyik oka az, hogy a vizsgálati módszer szabványos próbatestet feltételez. A modellünk nem tartalmazta a repedésalakoknál a korábbi károsodás során fellépő maradó feszültséget. A próbatestes szimuláció a csonkhoz képest a J-integrál értékét alulbecsülte, melynek egyik lehetséges oka lehet az, hogy a repedésfront a vizsgálat során nem egyenletesen terjedt.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A TKP2020-NKA-18 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2020-4.1.1-TKP2020 program finanszírozásában valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] ASTM E1921-20. *Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range*
- [2] ASTM E1820-20. *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*
- [3] J. R. Rice, *A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks*, Journal of Applied Mechanics, 1968, vol. 35, 379-386
- [4] Gurson, A. L., *Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I - Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Materials*, Journal of Engineering Materials and Technology, 1977, vol. 99, 2-15