

Növekvő repedésméret hatásának tanulmányozása plattírozással rendelkező reaktortartály esetén Effect of Increasing Crack Size on its Propagation in Cladded Reactor Pressure Vessel

Szávai Szabolcs, Beleznai Róbert

Kulcsszavak: növekvő repedés méret, reaktortartály acél, plattírozás, J-integrál

Keywords: increased crack size, reactor pressure vessel steel, cladding, J-integral

Summary

The main goal of this research was to study the increased crack size of sub-clad flaws how effects on J-integral value. 3D FE models were applied for the analysis with elastic-plastic material properties. Straight crack fronts were discretized with average crack lengths. Different crack front motion was analyzed. dJ/da diagrams were generated to show the effect of increased crack size on the J-integral values. A summary about the relative variation of J-integral are given, and the crack propagation sensitivity index were calculated, which can be appropriate for determine the required accuracy of the non-destructive measurement.

Bevezetés

A kutatás célja a növekvő repedésméret J-integrálra vett hatásának tanulmányozása volt plattírozás alatti repedést tartalmazó 4PB próbatesteken reaktortartály acélsanyag esetén. A számításokat a NESC-6 Európai Unió projekt keretében végeztük, melynek pontos megnevezése: "WWER Cladded Reactor Pressure Vessel Integrity Evaluation (with Respect to PTS Events)".

3D-s véges-elemes módszerrel modelleztük a próbatesteket, melyek különböző repedésmérettel rendelkeztek, és egyenes repedésfrontot definiáltunk a modellek egyszerűsítése végett. Az anyagban lévő maradó feszültség értékét figyelembe vettük. Minden egyes repedéscsúcsban meghatároztuk a J-integrál értékét, majd előállítottuk a repedésterjedési érzékenységi indexet, amelyet a roncsolásmentes-vizsgálatok szükséges pontosságának megállapításához lehet felhasználni.

Anyagminőség

A vizsgált anyagminőség egy WWER plattírozott reaktortartály acél volt. Az anyagjellemzőket és a szükséges mérési adatokat a Rez-i Nuclear Research Institute bocsátotta rendelkezésünkre. A véges-elemes modellekben rugalmas-képlékeny anyag törvényt alkalmaztunk.

Az anyagjellemzőket az 1. táblázat tartalmazza, a Poisson-tényező $\nu=0.3$ értékével számoltunk minden esetben. A maradó feszültség hatását a „stress free temperature” módszerrel vettük figyelembe. A módszer lényege, hogy a két különböző hőtágulási együtthatóval rendelkező anyagot egy olyan hőmérsékletre hevítjük, ahol egyforma a hőtágulásuk és gyakorlatilag feszültségmentes állapotban van a szerkezet, majd onnan lehűtve kialakul a maradó feszültség az anyagban. Erre vonatkozólag mérések is történtek a Nuclear Research Institute-ban, ezeket felhasználva validáltuk a kifejlesztett modelleket, és az eredmény jó egyezést mutatott.

1. táblázat: A próbatestek anyagjellemzői

Table 1.: Material properties of the specimens

Anyagjellemzők	Alapfém	Plattírozás
Rugalmassági modulus, [GPa]	211	162
Folyáshatár, [MPa]	887.8	337.9
Szakítószilárdság, [MPa]	984.1	593.9
Hőtágulási együttható, [1/K]	$12.55 \cdot 10^{-6}$	$17.1 \cdot 10^{-6}$

Próbatest geometria

A vizsgálatokat 4 pontos hajlító próbatesteken (4PB) végezték, ennek megfelelően készítettük el a 3D-s véges-elemes modelleket. A geometriai adatok szintén a Rez-i kutatóintézetből származtak.

Két különböző repedésméretet vizsgáltunk, két próbatest rövid repedéssel, egy pedig hosszú repedéssel rendelkezett. A repedés felső csúcsa körülbelül 3 mm-re helyezkedett el a plattírozás alatt. A rövid repedések mindkét vége éles volt, a hosszú repedés esetében az alsó repedéscsúcs ki volt fúrva, így J-integrál számítás csak a felső repedéscsúcsnál történt. A repedések pontos méreteit a 2. táblázat tartalmazza.

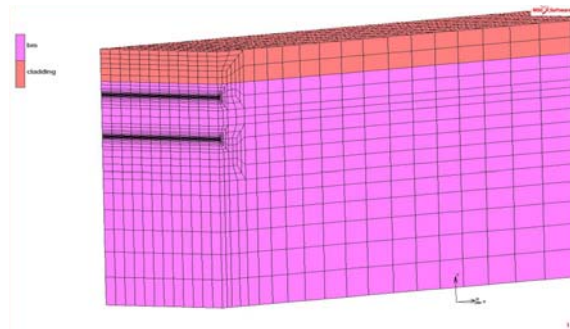
Az MSC.MARC 2007r1 véges-elemes szoftvert alkalmaztuk az analízishez. 20 csomópontú elemeket használtunk a modellek

felépítése során. A próbatest szimmetriájából adódóan elegendő volt csak a próbatest felének modellezése. A próbatest hálózott modellje rövid repedés esetén az 1. ábrán látható.

2. táblázat: Repedés-geometriai adatok

Table 2.: Crack geometry data

	Rövid repedésű próbatest	Hosszú repedésű próbatest
Plattírozás vastagsága	10.8 mm	11.25 mm
Felső repedésfront távolsága a próbatest aljától	69.81 mm	70.63 mm
Alsó repedésfront távolsága a próbatest aljától	55.88 mm	30.78 mm
Repedéshossz	13.93 mm	39.85 mm
Maximális erő a törésnél	259.7 kN	205.5 kN



1. ábra: 3D-s véges-elem modell
Figure 1. 3D FE model

3. táblázat: A diagramok színeinek jelentése

Table 3.: Identification of diagram colours

J-integrál számítás

J-integrál számítást minden éles repedéscsúcsonál végeztünk, rövid repedések esetén mindkét csúcsonál, a hosszú repedés ese-

Repedés csúcsonál	Repedés csúcsonál mozgatása a repedés belseje felé 0.5 mm-rel <ul style="list-style-type: none"> A repedés 0.5 mm-rel rövidebb, mint az eredeti, egy repedésfront mozgatása esetén A repedés 1 mm-rel rövidebb, mint az eredeti, mindkét repedésfront mozgatása esetén
Repedés csúcsonál	Repedés csúcsonál mozgatása a repedés belseje felé 1 mm-rel <ul style="list-style-type: none"> A repedés 1 mm-rel rövidebb, mint az eredeti, egy repedésfront mozgatása esetén A repedés 2 mm-rel rövidebb, mint az eredeti, mindkét repedésfront mozgatása esetén
Eredeti repedés	Eredeti repedés
Repedés csúcsonál	Repedés csúcsonál mozgatása a repedésből kifelé 0.5 mm-rel <ul style="list-style-type: none"> A repedés 0.5 mm-rel hosszabb, mint az eredeti, egy repedésfront mozgatása esetén A repedés 1 mm-rel hosszabb, mint az eredeti, mindkét repedésfront mozgatása esetén

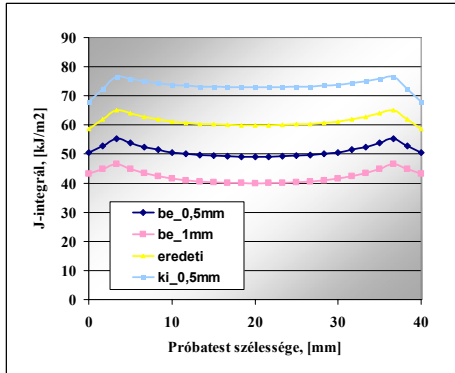
tén a plattírozáshoz közelebb eső csúcsonál, mivel a másik ki volt fúrva. A plattírozáshoz közelebb eső repedés csúcsonál esetében a határfelület közelsége jelentős hatással van a számítási eredményekre. A J-integrál értékének meghatározásához több különböző integrálási útvonalat vettünk fel a repedés csúcsonál körüli, ezek egy állandósult értékhez tartanak, és ezt az értéket fogadtuk el eredménynek.

Mivel a repedés csúcsonál nagyon közel helyezkedtek el a plattírozás határfelületéhez, ezért a repedés növekedés modellezése során először egy kisebb méretű repedésből indultunk ki, majd ezt növeltük az eredeti méretre, és tovább két lépcsőben. Külön vizsgáltuk az egyes repedés csúcsonál mozgásának hatását, három esetet megkülönböztetve:

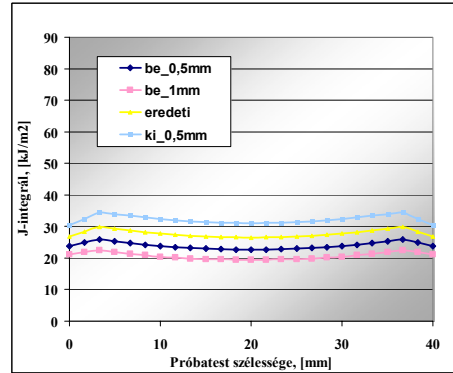
- Csak a felső repedésfrontot,
- Csak az alsó repedésfrontot,
- Mindkét repedésfrontot egyidejűleg mozgatva.

Egy repedésfront mozgatása esetén a kiinduló repedés hossz 0.5 mm-rel volt kisebb, az eredetivel, a növekedés szimulálásához pedig ezt növeltük az eredeti hosszra, majd további 0.5 mm és 1 mm-rel. Abban az esetben, amikor egyszerre mozgtattuk mindkét repedésfrontot a kiinduló repédsméret 1 mm-rel volt rövidebb az eredetivel, ezt növeltük az eredetire, és további két lépcsőben 1 mm, illetve 2 mm-rel. A hosszú repédessel rendelkező próbatest esetén csak a felső repedésfrontot mozgtattuk.

A J-integrált minden repedésfront mentén a töréshez tartozó terhelésnél az összes próbatest esetében poszt-processzáltuk. Jelen tanulmány csak az egyik rövid repedésre vonatkozó eredményeket tartalmazza (2. ábra, Fig 2.).

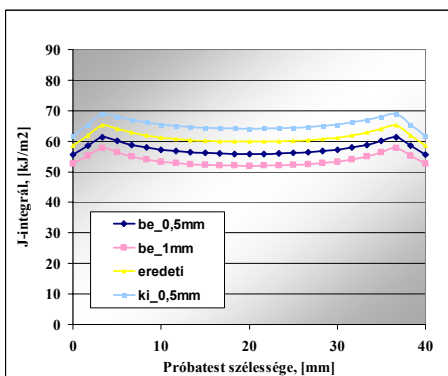


J-integrál a felső repedésfrontnál

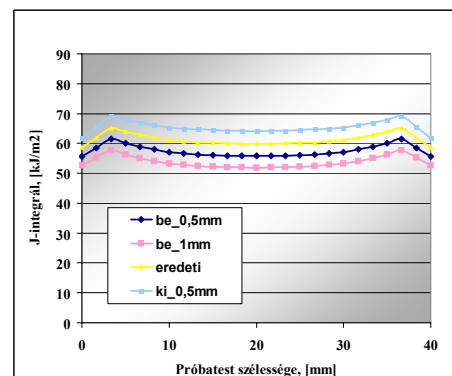


J-integrál az alsó repedésfrontnál

Felső repedésfront mozgása rövid repedés esetén

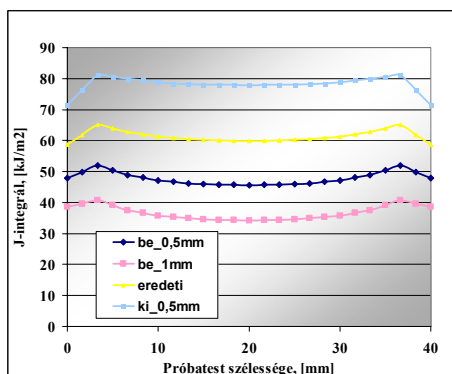


J-integrál a felső repedésfrontnál

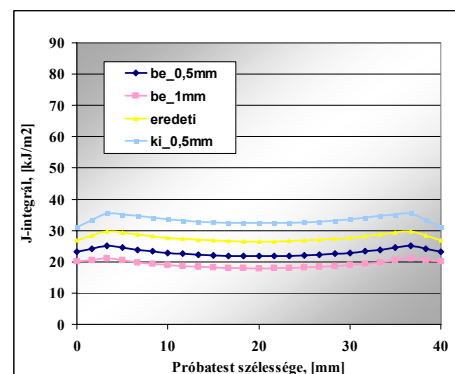


J-integrál az alsó repedésfrontnál

Alsó repedésfront mozgása rövid repedés esetén



J-integrál a felső repedésfrontnál



J-integrál az alsó repedésfrontnál

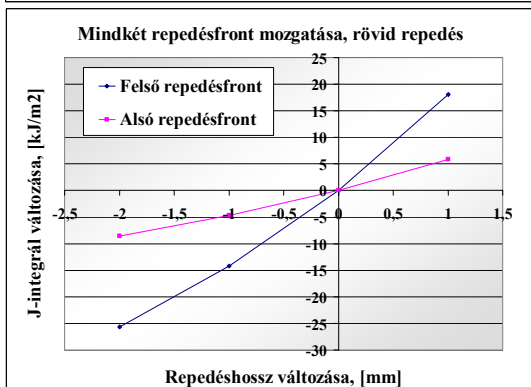
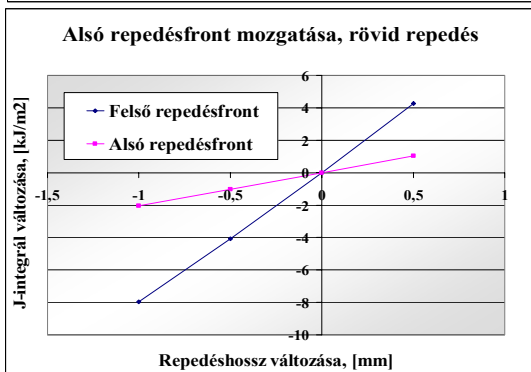
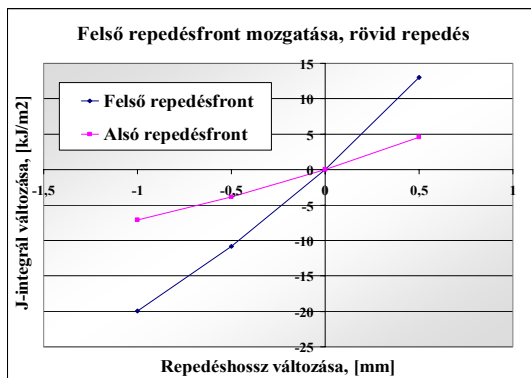
Mindkét repedésfront egyidejű mozgása rövid repedés esetén

2. ábra: J-integrál értékek a repedésfront mentén rövid repedéssel rendelkező próbatest esetén
Figure 2. J-integral path plot along the crack fronts in case of specimen with short crack

A J-integrál értékekben a legnagyobb változást a felső repedésfront mozgása

okozta. Ugyanez a hatás volt tapasztalható akkor is, amikor egyidejűleg mindkét repedés-

frontot mozgattuk. Abban az esetben, amikor csak az alsó repedésfront lett elmozdítva, a hatás sokkal kisebb volt. Ennek két fő oka van: az egyik, hogy a felső repedésfront rendkívül közel helyezkedik el a plattírozáshoz, a másik pedig, hogy a felső repedésfront felett lévő anyagvastagság kisebb, mint az alsó repedésfront alatt található anyagréteg.



3. ábra: dJ/da diagram rövid repedés esetén
Figure 3. dJ/da diagram for short crack

dJ/da diagramok

A J-integrál számítás után dJ/da diagramokat állítottunk elő, melyeken látható a repedésnövekedés hatása a J-integrál értékekre. Mint az a 3. ábrán is látszik lineárisnak mondható kapcsolat van a repedés hosszának megváltozása és a J-integrál között. Az egyenes meredeksége mutatja a J-integrál érzékenységét a repedésméretre. Ezenkívül a kapcsolatot alkalmazható a J-integrál értékének meghatározására egy adott repedés hossz esetén. Azonban érdemes megjegyezni, hogy az érvényességi tartomány határai nem felderítettek. Ez egy későbbi kutatás eredménye lehet.

A növekvő repedésméret J-integrálra vett relatív hatása

A repedésnövekedés hatása a J-integrál értékekre százalékosan is kifejezhető. Bevezethetjük a repedésterjedés érzékenységi indexet (crack propagation sensitivity index) dimenziótlantított formában ($\frac{\Delta J}{\Delta a} \cdot \frac{a}{J}$), amely azt mutatja meg, hogyan változik a J-integrál, ha 1 %-kal változtatjuk meg a repedés hosszát. Az egyik rövid repedésű modell esetén a százalékos értékeket a 4. táblázat tartalmazza.

Összefoglalás

Plattírozása alatt található növekvő repedések hatását vizsgáltuk a J-integrálra vonatkozólag. 3D-s véges-elemes modelleket készítettünk az analízishez, ahol figyelembe vettük a maradó feszültség befolyását. A repedésterjedést három különböző esetben vizsgáltuk, attól függően, hogy melyik frontnál terjedt jobban. Egyenes repedésfront mentén meghatároztuk a J-integrál értékek eloszlását, valamint a repedésnövekedés hatását dJ/da diagramokon, illetve százalékos értékek formájában is bemutattuk. Ezúton meg tudtuk állapítani a plattírozás alatti repedésterjedési érzékenységi indexet, melyet a vizsgálat szükséges pontosságának megállapításához lehet felhasználni.

4. táblázat: Repedésnövekedés hatása százalékosan kifejezve rövid repedés esetén

Table 4.: Relative effect in case of short specimen

Rövid repedés	J-integrál a felső repedésfrontnál	J-integrál az alsó repedésfrontnál	A repedés-hossz változása	$\frac{\Delta J}{\Delta a} \cdot \frac{a}{J}$ a felső repedésfrontnál	$\frac{\Delta J}{\Delta a} \cdot \frac{a}{J}$ az alsó repedésfrontnál
Felső repedésfront elmozdítása	82.37 %	60.25 %	11.60 %	7,10	5,19
Alsó repedésfront elmozdítása	23.57 %	12.58 %	11.60 %	2,03	1,08
Mindkét repedésfront elmozdítása	127.33 %	80.24 %	25.15 %	5,06	3,19

Hivatkozások

1. Report for Assessment of sub-clad flaws, *J-integral calculation for NESC-6 project*, Bay Zoltan Foundation for Applied Research, Institute for Logistics and Production Systems, Department of Structural Integrity, Miskolc-Tapolca, September 2007.
2. Large scale clad beam specimen tests, *Description of the project for NESC*, Nuclear Research Institute Rez plc, Division of Integrity and Technical Engineering, Rez, September 2006.
3. Material properties, *Information for NESC*, Nuclear Research Institute Rez plc, Division of Integrity and Technical Engineering, Rez, September 2006.
4. Residual stresses measurement, *Information for NESC*, Nuclear Research Institute Rez plc, Division of Integrity and Technical Engineering, Rez, September 2006.