

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

**REPEDÉSTERJEDÉSI ESETEK MODELLEZÉSE LOKÁLIS
TÖNKREMENTELI KRITÉRIUMOK ALAPJÁN**

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE:

Pusztai-Spisák Bernadett
okleveles gépészmérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE TÉMATERÜLET

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ:

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
az MTA doktora

TÉMATERÜLET VEZETŐ:

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
az MTA doktora

TÉMAVEZETŐ:

Dr. Szávai Szabolcs
egyetemi docens

TÁRS-TÉMAVEZETŐ:

Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán
egyetemi tanár

Miskolc, 2023

Pusztai-Spisák Bernadett

REPEDÉSTERJEDÉSI ESETEK MODELLEZÉSE LOKÁLIS
TÖNKREMENTELI KRITÉRIUMOK ALAPJÁN

PhD értekezés tézisei

Miskolc, 2023

1. Kutatási feladat

1.1. Bevezetés

Az évmilliók alatt létrejött fosszilis energiahordozókat, tüzelőanyagokat az emberiség évszázadok alatt felhasználja. Az energiaválság ez alapján a jövőben komoly problémát jelenthet. Ennek elkerülésére az egyik lehetőség az atomenergia alkalmazása, azonban ezen területen egy esetleges baleset számos környezeti kárt képes okozni. Erre jó példák a chernobili vagy a fukusimai balesetek. Ezáltal PhD dolgozatom témája az atomerőművek biztonságos üzemeltetéséhez kötődik.

Az első erőműveket az 1950-es évek elején helyezték üzembe. Ma Európában körülbelül 430 működik és közel további 60 építés alatt áll. Tervezésük az akkor ismert szabványokon és előírásokon alapult, építésük pedig a kor technológiai eszközeivel történt. A működő reaktorok 75%-a már 25 évnél idősebb, és körülbelül a fele már 30 év felett van. Az atomerőműveket adott ideig – általában 40 éven keresztül – tervezték üzemeltetni, azonban napjainkban világszerte ennek a meghosszabbításán dolgoznak, amely során cél, hogy a biztonsági szint a meghosszabbított üzemeltetés végéig fennmaradjon. Tekintettel arra, hogy a primer körben (ahol a szerkezeti elemeket neutronsugárzás éri) lévő elemek anyagai a folyamatos sugárterhelés hatására elridegedhetnek, a folyamat megfigyelésére különböző kialakítású és a tervezett üzemidőre elegendő mennyiségű próbatestet helyeztek el a reaktortérben. Azonban az üzemidő meghosszabbításával ezen próbatestek kifogyóban vannak, amely egy új kutatási irányt jelentett az anyagtudománnyal foglalkozó szakemberek számára. Erre megoldás lehet, ha a már megvizsgált (károsodott) próbatestekből új, kisebb méretűek készülnek. Ezek alkalmazhatósága is a PhD dolgozatom témája. Ilyen próbatesteknél azonban újabb probléma az anyagvizsgálati eredményekben jelentkező geometriai hatás. E problémakör kiküszöbölése lehetséges a roncsolásos mechanikai vizsgálatok során lejátszódó „törési folyamat” lokális (helyi) károsodási folyamatként való kezelése. PhD dolgozatom e gondolkörre koncentrálni két tématerületen, amelyek közül az egyik a szívós törés, a másik pedig a feszültségkorróziós repedésterjedés.

Az előzők rövid összefoglalásaként a PhD dolgozatom a szívós törés lokális anyagi paramétereinek kisméretű próbatesteken történő meghatározásával, annak metodikájával és értékelésével, ill. a mérethatás szerepével, valamint e gondolkör alkalmazhatóságával a feszültségkorróziós repedések terjedésének kezelésével foglalkozik.

A szakirodalomban fellelhető információk alapján a következő megállapításokat tettem.

- Az ANN módszert már használták a szakemberek a p-SPT [1], a Charpy V-be-metszett [2], a nyíró és lapos szakító próbatestek [3] esetén a GTN paramétereinek optimalizálására, de nem találok olyan hivatkozásokkal, amelyeknél ezt a módszert kis méretű lapos szakító próbatesteken alkalmazták volna.

- Mini CT próbatestek esetében a szakirodalom alapján [4, 5, 6] ez idáig a mérési eljárás elemzése és a kapott eredmények repedést tartalmazó szerkezetek biztonságának a megítélése volt a legfontosabb cél. A vizsgálatot szimulációs technikákkal kevésbé tanulmányozták.
- A VCCT módszert rideg anyagokban történő repedésterjedésre, illetve delaminációra alkalmazták [7]. A modell hajtóerejének módosításáról nem találtam egyetlen szakirodalmat sem.
- A feszültségkorróziós repedés vizsgálatára a szakirodalom több módszert is javasol igazolva azt, hogy egységes álláspont még nem alakult ki az ipar egyetlen szegmensében sem. Úgy tűnik azonban, hogy a legszélesebb körben az SSRT technikát alkalmazzák, azonban költséges, továbbá az atomeróműveknél jellemző magas nyomás biztosítása, állandó értéken történő tartása is nehézkes. E tények figyelembevételével egy olyan új típusú hibrid próbatest kialakítását látom célszerűnek, amely segítségével egyszerűbben vizsgálható az anyag repedésterjedéssel szembeni ellenállása feszültségkorróziós körülmények között.

1.2. Célkitűzések

A feldolgozott szakirodalom értékelése alapján a dolgozatom részletes célkitűzései a következőkben fogalmazhatók meg.

- Kis méretű, lapos próbatesteken méréssel felvett erő-szétnyílás görbe legjobb közelítését biztosító GTN paraméterek számítása mesterséges neurális hálózatok (ANN) segítségével.
- Miniaturizált CT próbatestek esetén törési szívósság meghatározása VCCT szimulációs módszer módosításával, úgy, hogy hajtóerőként az energiefelszabadulás helyett a GTN paramétereket alkalmazza. Ezáltal a J-integrál kiszámítása a repedés terjedésével párhuzamosan mehet végbe.
- A feszültségkorróziós repedésterjedéssel szembeni ellenálló képesség meghatározására olyan új típusú próbatest kialakítása, amelynek előrepesztése és előfeszítése is ugyanazon a próbatesten egyszerűen megoldható. Az új típusú próbatest esetén a repedéscsúcsban ébredő feszültségintenzitási tényező számítására alkalmas összefüggés létrehozása.
- Kiválasztott feszültségkorróziós modell implementálása végeselem módszerbe módosított VCCT technika alkalmazásával.

2. Tudományos előzmények

2.1. Előrelépések a törésmechanikában

A kutatásom egyik fő részét a miniaturizált próbatestek alkalmazhatósága adja. Szakító próbatestek esetében már számos kutatás született, ahol mini mintákat alkalmaztak. Kumar és társai [8] miniaturizált szakító próbatesteket használtak egy adott anyag mechanikai tulajdonságainak (folyáshatár, szakítószilárdság) meghatározásához. Zhang és társai [9] az elvégzett vizsgálatok alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a miniaturizált (teljes hossza 41 mm) szakítóvizsgálat megbízhatóan használható a szabványos mechanikai tulajdonságok előrejelzésére az acélok széles skáláján. Ezekből látható, hogy mini és kis méretű szakító próbatestek is jó eredményeket nyújtanak a mechanikai tulajdonságok megadásához, ezáltal célom a kisméretű lapos próbatestek alkalmazása a károsodási paraméterek meghatározására, mivel a törésmechanikai szimulációk megfelelő elvégzéséhez ezek megadása szükséges. Erre már számos módszer létezik. A leggyakrabban használt megoldás a kísérleti és a végelemes analízis eredményeinek kombinációja, azonban ez időigényes, mivel a szimulációkat sokszor meg kell ismételni, mindaddig amíg a szimulációs adatok nem illeszkednek a vizsgálatból származó eredményekre. Léteznek más módszerek is a Gurson-Tvergaard-Needleman paraméterek megadására, amelyek célja a paraméterek rövid idő alatt történő meghatározása, mint a mesterséges neurális hálózat, hibrid részecske raj optimalizálás, vagy a metallográfiai módszer.

A fent említett módszerek közül napjainkban egyre elterjedtebb módszer az ANN alkalmazása. Az ANN technika szintén széles körben elterjedt módszerré vált az anyagtulajdonságok meghatározására is. Bhadeshia [10] volt az egyik első kutató, aki áttekintette a mesterséges neurális hálózatok felhasználhatóságát az anyagtudományban. Guo és társai [11] a titánötvözetek béta-transz hőmérséklete (a titán alfa-fázisból béta-fázissá való átalakulásának a hőmérséklete) és az ötvözet kémiai közötti nemlineáris kapcsolat szimulálására dolgoztak ki ANN modellt. Ezt a módszert Aguir és társai [12], Abbasi és társai [13] lemezlyukasztáshoz és lemezalakításhoz alkalmazható károsodási paraméterek meghatározására használták, amely során normál méretű, lapos szakító próbatesteken végezték el a vizsgálatokat, míg Shikalgar és társai [1] esetében a kutatás előrepesztett úgynevezett p-SPT (pre-cracked small punch test) vizsgálatokon alapult, ahol az előzőekhez hasonlóan a GTN paraméterek optimalizálása volt cél. Ezek mellett az utóbbi időben Chahboub és társai [14] is készítettek károsodási paraméterek szettet az ANN módszer alkalmazásával, ahol bemetszett hengeres próbatesteket használtak. Guan és Jin [15] ANN-modellt javasolt a maradó feszültség és az alakváltozáskeményedési kitévő meghatározására. Paermentier és társai [2] Charpy V-bemetszett próbatesteken végezték el ezeket a vizsgálatokat, végezetül Shafiaie és társai [3] nyíró próbatestek és lapos szakító próbatestek eredményeit használták fel a GTN paraméte-

rek meghatározására. Ezek jól mutatják az ANN módszer alkalmazhatóságát és jelenlétét a kutatási szférában, azonban a módszert kis méretű, lapos próbatestek esetében még nem használták. Így a kutatásom egyik fő pontja ezen módszer alkalmazhatósága kisméretű szakító próbatesteken.

Dolgozatom második része a miniatürizált CT próbatestek alkalmasságát vizsgálja a törési szívósság meghatározására. Erre példa a [4] szakirodalom, amely a törési szívósság miniatürizált CT próbatestekkel történő méréséről szól. Ennek során a szerzők átfogóan tanulmányozták a miniatűr CT próbatestek ($B = 4, 15$ mm vastagsággal) alkalmazhatóságát. A kapott eredményeket különböző hőmérsékleteken összehasonlították négy jól jellemzett anyag szabványos méretű 1T CT mintáiból mért adatokkal (három RPV acél és egy C-Mn acél). Általános következtetésként megfigyelték, hogy a mini CT próbatestek következetesen és szisztematikusan alulbecsülik az 1T CT próbatestekkel – 25 mm vastagságú CT próbatest – mért törési szívósságot, mind a képlékeny repedéskezdeményezés („valódi” repedéskezdeményezés és annak mérnöki becslései), mind a repedésellenállási ($J-R$) görbe – $J-\Delta a$ görbe (angolul crack resistance curve) – tekintetében.

Dzukan és társai a törési szívósság meghatározására szolgáló miniatürizált próbatest-alapú technikákat mutattak be a [16] szakirodalomban, amely során alkalmazhatóságukról pozitívan vélekedtek. A szívós-rideg viselkedés átmeneti tartományában (DBT - ductile-brittle transition) végzett vizsgálatok és a mestergörbe megközelítéssel történő értékelés nagyon jó eredményt hozott a vizsgált anyag miniatürizált és normál méretű próbatestek közötti összehasonlíthatóság tekintetében. Az öt próbatest geometriára kiterjedő vizsgálati program nagyon jól egyezik a közzétett eredményekkel. Megerősíti a megbízható eredmény meghatározást ebben a régióban még a miniatürizált próbatestek, köztük a 4 mm vastagságú mini CT és a 2×4 mm² keresztmetszetű hárompontos hajlító próbatestek használata esetén is. Az előbb említett mestergörbe megközelítés besugárzott anyag törési szívósságának értékelésére alkalmazható, és világszerte egyre jobban elismert. A besugárzásnak kitett reaktortartályok épségének értékelésére már gyakran alkalmazott módszer [17], amely jól alkalmazható a T_0 referencia hőmérséklet meghatározására, továbbá már az ASTM E1921 szabvány [18] is tartalmazza. Egyik hátránya, hogy kiértékeléshez körülbelül 6-12 darab próbatestre van szükség, amely egy megnövekedett alapanyag igényt jelent.

Bandura és társai [5] a mini CT próbatestek felhasználási lehetőségeit a 15H2NMFA acél törési szívósságának meghatározásához vizsgálták. Az eredmények azt mutatták, hogy a mini CT és 0,5T CT próbatestekkel végzett vizsgálatokból kapott referencia hőmérsékletek 1°C-kal térnek el egymástól, amely azt jelzi, hogy a törési szívósságra vonatkozó helyes adatokat a mini CT próbatestek alkalmazásával is meg lehet kapni.

Sanchez és társai [6] tanulmánya áttekintést nyújt a mini CT próbatestek használatáról a ferrites acélok törésének jellemzésére, különös tekintettel a nukleáris iparban használt acélokra. Az eddig elért főbb eredményeket, amelyek megmutatják a techni-

kában rejlő lehetőségeket, valamint a főbb tudományos és műszaki kérdéseket alaposan megvitatják. A cikk fő következtetése, hogy a mini CT próbatetek használata a mestergörbe vizsgálatához jó lehetőség a korábban vizsgált minták újrafelhasználására. Lehetőséget biztosít azon üzemek számára, amelyek nem rendelkeznek elegendő mennyiségű anyaggal a hagyományos felügyeleti programok folytatásához, a hosszú távú működés során. Különösen a mini CT próbatetek vizsgálatával meghatározott T_0 referencia-hőmérsékletben nincs torzítás a nagyobb mintákhoz képest. Mindazonáltal a tanulmány arra is felhívja a figyelmet, hogy a mini CT vizsgálatokkal kapcsolatos bizonyos szempontok egyedi kihívásokat jelentenek. Ennek következtében gyakran nagyobb számú vizsgálatra (12 db) van szükség az érvényes T_0 érték meghatározásához.

Li és társai [19] vizsgálati alapján a mini CT próbatettel elvégzett mérések általában magasabb törési szívóssági értékeket generálnak. Az ASTM E1921 szabványban [18] a törési szívósságra jelenleg bevezetett mérethatás-korrekciónak csak a vastagság hatását veszi figyelembe. Ez a tanulmány új mérethatás-korrekciónak javasol a mini CT próbatetekkel mért törési szívósságra a szívó-rideg átmenet tartományban. Ennek a méretkorrekciós rendszernek a központi jellemzője a ridegtörés lokális megközelítési módszerének végeselemes szimulációkkal párosított értelmezésében rejlik. A méretkorrekciós séma a lokális megközelítés kalibrálásával kezdődik, ezáltal megteremtve a kapcsolatot a különböző kényszerekkel rendelkező geometriák között. Az összefüggések alapján új méretkorrekciós sémát javasoltak, amely lehetővé teszi a mért $K_{Jc,mini-CT}$ (a K_{Jc} érvényességi határa) érték közvetlen átváltását annak 1T méretegyenértékére, és következőképpen hozzájárul a T_0 referencia hőmérséklet értékeléséhez és a mestergörbe felállításához.

Ezekből a példákban jól láthatók, hogy a mini CT próbateteknél főleg a mérési eljárásokat vizsgálták, és a szimulációs technikákat csak egy esetben alkalmazták rájuk. Ezért kitértem a célom, hogy a törési szívósságot mini CT próbatetek és szimulációs módszerek segítségével határozzam meg, amely egy potenciális előrelépést jelenthet a nukleáris iparban jelen lévő nehézségek áthidalására.

2.2. Feszültségkorróziós repedés modellezési módszerei

A könnyűvízes reaktorokban a feszültségkorróziós repedés (SCC - Stress Corrosion Cracking) az egyik legfontosabb tényező, amely veszélyezteti az atomerőművek biztonságos működését. A jelenség súlyossága, általánossága, valamint az általa okozott különböző biztonsági és gazdasági problémák miatt szükség van egy olyan modell létrehozására, amely előre jelzi a repedés növekedési sebességét. A hajtóerő alapján megkülönböztethetünk elektrokémiai, mechanikai, illetve (ezek kombinációját) mechanokémiai folyamatokat. Az alapjelenségek közé sorolhatók az anódos oldódás, a szemcsehatár oxidáció, a hidrogénes elridegedés, végezetül a törésmechanikai alapú modellek, amelyek közül a fontosabbak a következők:

- csúszási oldódás (slip dissolution/film rupture mechanism) [20, 21],
- szemecseközi oxidációs modell (internal oxidation model) [22, 23],
- szelektív oldódás [24],
- kapcsolt környezeti törésmo­dell (CEFM) [25],
- hidrogé­nen alapuló mechanizmus,
- erősített felületi mobilitás elmélet [26],
- repedéscsúcs alakváltozási sebesség modell.

A csúszásos-oxidációs modell az egyik legelfogadottabb modellek közé tartozik, amely másnéven Ford-Andersen modellként, illetve rétegtörés-csúszás-oxidációs modellként is ismert [21]. Ez az egyik legrégebbi és legegyszerűbb rétegtörési mechanizmus. Az anódos oldódás esetében az alapvető feltételezés az, hogy ha kivált fázisok vagy különálló anyagok jelennek meg a szemcsehatáron, akkor lokálisan elektrokémiai heterogenitás fog létrejönni, és megfelelő környezeti körülmények, illetve jelenlévő feszültségek esetén létrejön az oldódás, amely a repedés előrehaladását okozza. Ford [20] a repedéscsúcs alakváltozási sebességére egy fél-empirikus formulát ajánlott, amelynek alapját a repedéscsúcs képlékeny alakváltozási elmélet adja.

A szemcseközi oxidációs modellt P. M. Scott és M. Le Calvar fejlesztette ki, amely elsősorban a nyomottvizes reaktorokban található nikkel ötvözetekre alkalmazható. A modell alapja az elridegedési mechanizmus, ahol a létrehozott formulák függnek a kritikus feszültségintenzitási tényezőtől [22, 23].

A Galvele-féle elmélet, amely röviden CEFM módszerként ismert, azt feltételezi, hogy az atomok felületi diffúzió segítségével mozdulnak el a repedés csúcsából. Az atomok a nagy feszültségű repedéscsúcstól a kisebb feszültségű területekre mozognak el. Ennek a modellnek az alapja is az elridegedés mechanizmusa, így ez a modell hidrogénes elridegedésre is alkalmazható. A CEFM módszert a repedés terjedési sebességének a számítására hozták létre. Ez a csúszási oldódási mechanizmus továbbfejlesztett változata, amely figyelembe veszi az energiamegmaradást, így a belső és a külső környezet összekapcsolható [26].

Shoji és társai a repedéscsúcs alakváltozási gradiens elmélete és a kiterjesztett repedésfront alakváltozás újraeloszlás elmélete alapján kidolgoztak a repedéscsúcs alakváltozási sebességére egy modellt [27, 28], ez más néven FRI vagy Shoji modellként ismert. Ennek alapját a Ford és Andersen által létrehozott modell adja.

A numerikus modellezés egy elterjedt módszer a mérnöki világban, ezáltal a korábban említett mechanizmusokat napjainkban valamilyen numerikus módszer alkalmazásával fejlesztik tovább. A szakirodalomban található numerikus szimulációk nagy

része az anódos oldódást vagy a hidrogénes elridegédést használja alapjelenségnek. A modellezések során a legtöbb esetben a végeelem-, a peremelem-, a fázis-mező módszert és a probabilisztikus törésmechanikát alkalmazták.

A végeelemes analízis egy jól ismert numerikus módszer, ezért a feszültségkorróziós repedések esetében is található alkalmazási példákat a szakirodalomban [29, 30, 31]. Az első kísérletet ennek alkalmazása SCC esetén Jivkov és társai [32] tették, akik a repedések 2D és 3D modelljeit írták le a 304 típusú korrózióálló acél esetében. A modell mikroszerkezetének felépítését követően a repedés növekedésére is külön módszert alakítottak ki. A bemutatott eredmények bizonyították, hogy a végeelemes módszer akkor használható, ha a folyamat a mechanikai hatás mellett kémiai vagy korróziós alapú tényezőket is tartalmaz.

A lineárisan rugalmas törésmechanika nem írja le jól a repedés csúcánál lejátszódó folyamatot. Emiatt különböző mechanikai tönkremeneteli modelleket fejlesztettek ki. Ilyen például a kohéziós zóna modell, amely a rugalmas-képlékeny törésmechanikán alapul. Alapkonceptiója, hogy a repedéscsúcsonál egy kohéziós zóna van jelen, és az anyag tönkremenetele akkor következik be, amikor a kohéziós erő eléri a nullát. A modell továbbfejlesztett változatával még a repedés megindulása és terjedése is szimulálható. Számos kutatási munkában alkalmazták, Xiang és társai [33] a kohéziós zóna modellt a korróziós skála szakadási folyamatával kombinálták, és a végeelemes analízist ABAQUS végeelemes szoftverrel végezték el. Az eredmények azt mutatták, hogy az általuk vizsgált modellek esetében a repedések a korróziós réteg felületénél alakultak ki, és a repedés csak akkor terjedt a mátrixba, ha a korróziós réteg a folyamatos húzóterhelés hatására megszakadt. Wang W.W. és társai [34] szintén ezt a modellt használták. Ők a korróziós passzív rétegek – oxidréteg – hatását vizsgálták a feszültségkorróziós repedéskeletkezésére és -terjedésre. Eredményeik hasonlóak a korábban említettekhez, mivel ők is arra a következtetésre jutottak, hogy a feszültségkorróziós repedés először a korróziós rétegben kezdődik, valamint azt is kimutatták, hogy a törési alakváltozás kisebb, ha létrejött ez a korróziós réteg, és nagyobb, ha nincs korróziós réteg.

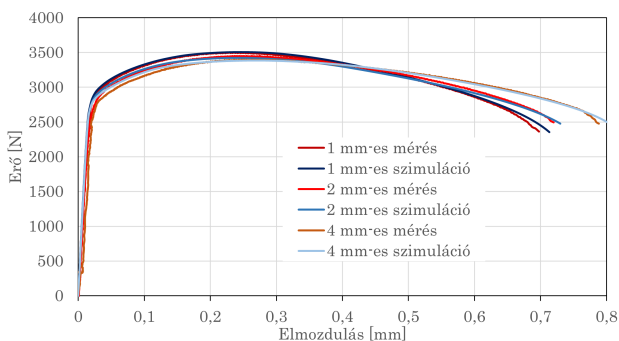
A kohéziós zóna modellt hidrogén jelenlétében keletkező feszültségkorróziós repedések esetén is használják, a szakirodalomban példaként említhető Scheider és társai [35], Falkenberg és társai [36], Rimoli és Ortiz [37], Raykar és társai [38], Brocks és társai [39] munkája. Ezekben az esetekben a kohéziós zóna modellt kibővítették, vagy más megoldási módszerekkel kapcsolták össze, hogy a hidrogén okozta elridegédés hatását is figyelembe lehessen venni. A fent említett tanulmányok főként a hidrogénkoncentráció és a mechanikai terhelések közötti kapcsolatra koncentrálnak, az eredmények a numerikus szimulációk előnyét mutatják, mivel ebben az esetben a különböző hatások elkülöníthetők.

A felsorolt tudományos eredményekből látható, hogy a feszültségkorróziós repedés vizsgálata egy nagy mértékben kutatott téma, amelynek vizsgálatát nehezíti, hogy előfordulását számos paraméter befolyásolja.

3. Mini CT próbatetek modellezése lokális tönkremeneteli kritériumok alapján

A Gurson-Tvergaard-Needleman károsodási paramétereket a mesterséges neurális hálózat alkalmazásával határoztam meg. Ehhez kisméretű, bemetszett próbatetek kerültek kimunkálásra, amelyek eredményeire a végeeselemes szimulációból származó erő-elmozdulás görbét illesztve meghatározhatók a GTN károsodási paraméterek. Összesen 90 db GTN paraméter összeállítási verziót hoztam létre, amelyek latin hiperkocka mintavétel módszerrel kerültek megadásra. A szimulált és a kísérleti erő-elmozdulás görbe összehasonlítása érdekében nyolc erő-elmozdulás adatpárt választottam ki. Ezt követően elkészítettem a GTN paraméterek optimalásához a mesterséges neurális hálózatot (ANN), amely (8-6-5) szerkezetű, részletesebben 8 neuronból áll a bemeneti rétegben, 6 neuronból a rejtett rétegben és 5 neuronból a kimeneti rétegben. Ezt követően a mérésből az adott erő értékekhez meghatározott elmozdulásokra alkalmazva az ANN-t meghatározhatók a GTN paraméterek. Az így kapott értékeket a 1. táblázat foglalja össze.

A meghatározott károsodási paraméterekkel elkészített szimulációk eredményeit a bemetszett próbatetek esetében pedig az 1. ábra szemlélteti.



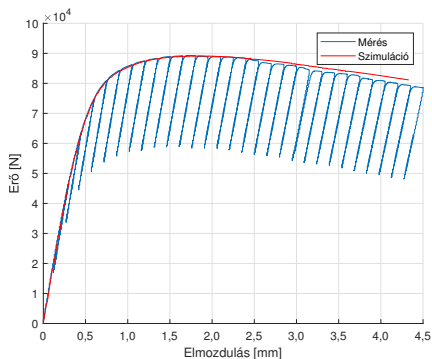
1. ábra. ANN-nel meghatározott GTN paraméterek alkalmazása az NT próbatetekben

A károsodási paraméterek meghatározását követően a következő lépés a kapott eredmények validálása volt más típusú törésmechanikai próbatetekben. Mivel a későbbiekben a céloom a mini CT próbatetekben történő törési szívósság meghatározása, amelyhez szükséges volt normál és mini CT próbatetekben vizsgálatokat elvégezni, ezért az ANN módszerrel meghatározott GTN értékeket is ezen minták segítségével validáltam. A vizsgálatból és a szimulációkból kapott eredményeket a 2. ábrán hasonlítottam össze, mind az erő-elmozdulás görbét tekintve, mind pedig a repedésterjedésre (töretfelület) vonatkozólag. Az eredményekből látható, hogy a meghatározott károsodási paraméte-

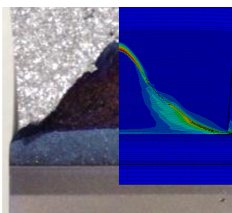
1. táblázat. A GTN paraméterek optimalizált értékei

Paraméter	Érték
q_1	1,5
q_2	1
f_0	0,0008
f_c	0,1591
f_f	0,4035
ε_n	0,1803
S_n	0,05
f_n	0,0099

rek a 15H2MFA anyagra megfelelnek, mivel ezeket alkalmazva egy eltérő geometriájú törésmechanikai próbatesten a szimulációs eredmények jó egyezést mutatnak a mérési adatokkal.



a)



b)

2. ábra. Mérés és szimulációból kapott eredmények N1 próbatest ($a_0 = 23,8 \text{ mm}$) esetében a) Erő-elmozdulás diagram b) Törétfelület

Megjegyezendő, hogy a normál méretű CT próbatest esetén a próbatest méretének kismértékű eltérése nem okoz komoly problémát, ezáltal a szimulációból és a mérésből származó eredmények jól illeszthetők egymásra. Azonban a mini CT próbatetek esetében ez az állítás már nem áll fent. A geometriai méretek kis eltérése is már nagymértékű hibát eredményezhet, amely hatására az ideális méretű modellel elvégzett szimulációkból kapott eredmények nem fognak megegyezni a mérésekkel. A valós geometriát és előreperesztés alakot használva a szimulációs eredmény már nagyon jó összhangban volt a mérésből kapott erő-elmozdulás görbével.

A VCCT módszer a lineárisan rugalmas törésmechanikán alapul. A módszert alapvetően a ridegtörés szimulációjához fejlesztették ki, ahol a törési kritériumot a repedés-

csúcspan felhalmozott alakváltozási energia határértékeként határozták meg. Ugyanakkor a modellezési technika, különösképp annak a végeelemes leképezése lehetőséget ad arra, hogy szívós repedésterjedést is képesek legyünk szimulálni vele. A modellfejlesztés fontos lépése volt, hogy a fentebb már bemutatott GTN és a VCCT technikák előnyei hogyan építhetők be egy modellbe, annak érdekében, hogy adott anyag esetén a J_Q törési szívósság értékét minél pontosabban tudjuk meghatározni szimulációs eszközök segítségével.

A kifejlesztett modell jóságának a meghatározásához, elkészítettem a normál és mini CT próbatést 2D végeelemes modelljét. Az eredményeket a 2. táblázatban foglaltam össze, amely alapján elmondható, hogy a módosított VCCT módszer jól alkalmazható a feladat megoldására, mivel az ebből kapott eredmények összhangban vannak a mérési adatokkal. Ezzel a számítási idő nagymértékben lecsökkenthető.

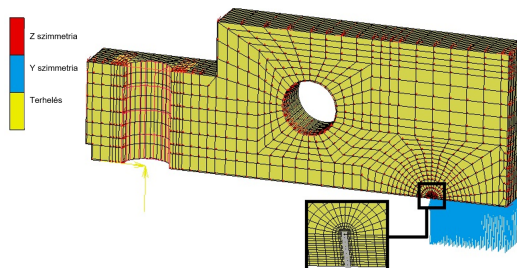
2. táblázat. A mért és számított törési szívósság értékek

Próbatést típusa	Adat forrása	Elemzés módja	Törési szívósság [kJ/m ²]	Eltérés [%]
Normál CT	Mérés	ASTM E1820-20	338,18*	-
	3D-s leterheléses szimuláció		325,77	-3,7%
	2D-s leterheléses szimuláció		345,73	+2,2%
	2D-s leterhelés nélküli szimuláció (VCCT)		346,32	+2,4%
Mini CT	Mérés	ASTM E1820-20	347,40	+2,7%
	2D-s leterhelés nélküli szimuláció (VCCT)	Szimuláció	317,80	-6,02%

*Viszonyítás alapja

4. Feszültségkorróziós repedés vizsgálata

Vizsgálatokat végeztem feszültségkorróziós repedésre vonatkozó $da/dt-K$ diagram meghatározásához. A vizsgálat elvégzéséhez szükség volt egy új hibrid próbatést kialakítására, amelyben kombináltam a CT és a DCB próbatestek előnyeit, amelyet a 3. ábra szemléltet.

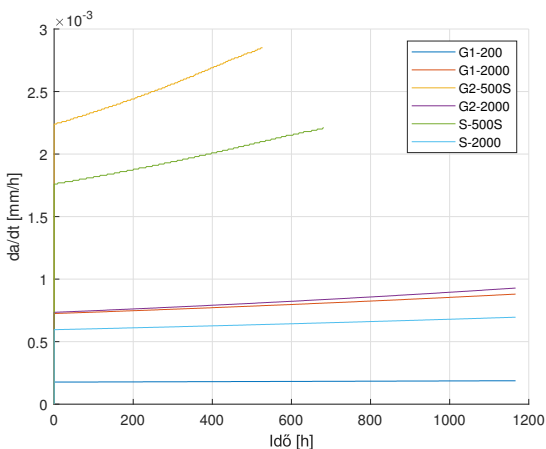


3. ábra. Végeelemes háló felépítése és alkalmazott peremfeltételek

4.1. Feszültségkorróziós repedés szimulációja

A feszültségkorróziós repedés szimulációja során az FRI által kifejlesztett modellt [40] implementáltam végeselemes szoftverbe. A végeselem modell validálásához egy egyszerűsített 2D-s 1T CT próbatesten készítettem el a szimulációkat, amelyhez a teljes geometriát használtam fel. A szimulációkat MSC.Marc Mentat szoftverben végeztem el.

A szimulációkat a [41] irodalomban található, különböző környezeti körülmények esetén vizsgált próbatesteken végeztem el. A modell validálásához az általam szimulált és a szakirodalomban megtalálható értékek közötti eltérést hasonlítottam össze, amelyek csupán 5%-os eltérést mutattak. A 4. ábra a repedésnövekedés sebességének a változását mutatja be az idő függvényében. Az [40] szakirodalomban szereplő G2-500S és az S-500S vizsgálatai során a repedés mérete kívül esett a megadott vizsgálati tartományon ezáltal ezen vizsgálatok esetén a szimulációk kevesebb idő alatt futottak le.

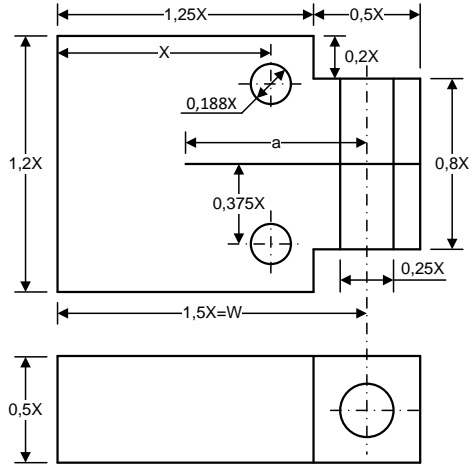


4. ábra. Feszültségkorróziós repedés terjedési sebessége az idő függvényében

5. Hibrid CT próbatest feszültségintenzitási tényezőjének analitikus módon történő meghatározása

A módosított CT kialakítást 1T, 0,5T, 0,25T és 0,16T méretekből készítettem el. A hibrid próbatest dimenzióját a 5. ábra szemlélteti. A feszültségintenzitási tényező leírására szolgáló egyenlet létrehozásához végeselem szimulációkat végeztem el az MSC.Marc Mentat szoftverben. 2D-s síkalakváltozásos modellt hoztam létre, amelynél a lineárisan rugalmas anyagmodellt alkalmaztam. A szimulációk eredményeképpen a feszültség

ségintenzitási tényező értéke adott a/W arány esetén meghatározható. Ezt követően a szimulációból kapott görbékre a CT próbatesteknél alkalmazott K képlet alakjában illesztettem felületet.



5. ábra. Hibrid CT próbatest dimenziói

A szimulációk és az ezt követően elvégzett illesztések alapján a feszültségintenzitási tényező a terhelési erő és az a/W arány függvényeként a következő alakban írható fel:

$$K = \frac{P}{B \cdot W^{1/2}} \cdot \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \cdot \left[-0,1273 + 1,286 \cdot \frac{a}{W} - 3,2085 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 3,316 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 1,233 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right].$$

6. Új tudományos eredmények

T.1 Létrehoztam a Gurson-Tvergaard-Needleman-féle (GTN) károsodási paraméterek meghatározására szolgáló új módszert, amellyel a mesterséges neurális háló alkalmazásával kisméretű lapos próbatestekből is megállapíthatók a GTN tényezők. A kidolgozott módszer gyakorlati használhatóságát a 15H2MFA minőségű, a VVER440 reaktortartályok készítésére használt, nem besugárzott állapotú acélon végzett vizsgálattal bizonyítottam. [P3, P4]

Paraméter	Érték
q_1	1, 5
q_2	1
f_0	0, 0008
f_c	0, 1591
f_f	0, 4035
ε_n	0, 1803
S_n	0, 05
f_n	0, 0099

T.2 A GTN modell paramétereivel módosítva a virtuális repedészárási (VCCT) módszert egy új modellt dolgoztam ki a törési szívósság becslésére. A kidolgozott módszer gyakorlati alkalmazhatóságát az 15H2MFA minőségű acélból készült 1T CT és 0,16T CT próbatestek kísérleti vizsgálatával és numerikus modellezésével bizonyítottam. Az általam kidolgozott módszerrel a numerikus szimuláció időszükséglete átlagosan 90%-kal csökkent. [P3, P4]

T.3 Javasoltam egy - a szakirodalomban eddig nem említett - olyan új típusú törésmechanikai próbatestet feszültségkorróziós repedés terjedésének a vizsgálatára, amely a CT és a DCB típusú kialakítások előnyeit foglalja magába. Ezáltal a próbatest előreperesztése és előfeszítése is egyszerűen kivitelezhető. Továbbá a próbatest előfeszítésének egyszerűsítése érdekében meghatároztam az 1T-0,16T közötti méretarányok esetében a próbatestre vonatkozó feszültségintenzitási tényező képletét a következő alakban:

$$K = \frac{P}{B \cdot W^{1/2}} \cdot \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \cdot \left[-0,1273 + 1,286 \cdot \frac{a}{W} - 3,2085 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 3,316 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 1,233 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$$

A kidolgozott vizsgálati eljárás gyakorlati alkalmazhatóságát a VEIKI Energia+ Energetikai Fejlesztő, Kivitelező Kft.-ben X6CrNiTi18-10 ausztenites acél és S235 ferrites acélon elvégzett vizsgálatokkal bizonyítottam. [P1, P5]

T.4 Új modellt javasoltam a feszültségkorróziós repedésterjedés körülményeinek szimulálására azzal, hogy a virtuális repedészársi technika hajtóerejét a Shoji és társai által létrehozott feszültségkorróziós repedésterjedési sebességére módosítottam. E módszerrel a repedésterjedés sebessége előre jelezhető. Az általam kidolgozott szimuláció gyakorlati alkalmazhatóságát irodalmi adatok felhasználásával bizonyítottam. [P1, P2]

7. Fejlesztési lehetőségek

A kisméretű próbatestekből származó eredmények megbízhatóságának a vizsgálatához szükséges nagyobb számú próbatesteken elvégezni a kísérleteket. Ezzel meghatározható lehet az eljárás reprodukálhatósága és ellenőrizhető az eredmények szórása.

A VCCT szimulációkból származó eredmények további mérethatásának a meghatározásához 6T CT próbatesteken való vizsgálatok elvégzésére van szükség, mivel a nukleáris iparban jelen lévő nyomástartó edények esetében az anyag minősítése ezzel a típusú próbatesttel valósítható meg.

A VCCT-modell egyik fő előnye, hogy a repedés nem akkor terjed, amikor a szimulációból elemeket távolítanak el, hanem a beállított kritikus károsodási érték elérésekor megnyitja a hálót, lehetővé téve a J-integrál folyamatos kiértékelését a repedés csúcának folyamatos változtatásával. A jövőbeni munkában ezen módszer továbbfejlesztését tervezem, hogy a rideg-képlékeny átmeneti zóna szimulációjára is alkalmazható legyen. Ehhez azonban a meghatározott GTN paraméterek mellett a rideg törés jellemzésére szolgáló modellekből egy olyan módszer kiválasztása szükséges, amely paraméterei a szimulációba beépíthetők. Ezt követően a szimulációkat több hőmérséklet fokozaton is el kell végezni. Ez a módszer jó lehetőséget nyújthat egy adott anyag átmeneti hőmérsékletének meghatározására, azonban ehhez további vizsgálatokra és szimulációs fejlesztésekre van szükség.

A feszültségkorróziós repedés esetében a bemutatott szimulációs módszer jó alapot képezhet egy következő kutatási feladatban, azonban jelenleg az SCC terjedésének végelelemes szimulációval történő elemzése csak 2D-s modell esetén alkalmazható. A kutatás következő lépése a létrehozott szubrutin továbbfejlesztése, amellyel a szimulációk 3D-ben is megvalósíthatók. Ezzel komplex berendezések esetében is meghatározhatóvá válhat a maradó élettartam.

Végezetül a kialakított új típusú hibrid CT próbatest feszültségkorróziós repedés vizsgálatára bizonyítottan alkalmas. Továbbfejlesztési terveim között szerepel a próbatest alkalmazása más környezetben terjedő repedés típusok vizsgálatánál, mint például a hidrogén okozta repedés. Továbbá az új típusú próbatest szabványosítása is egyik további célom közé tartozik.

8. A disszertációhoz kapcsolódó publikációk

- [P1] Spisák B.; Szávai Sz.; Gál A.: Feszültségkorróziós repedés vizsgálata egyedi próbatesttel, *Anyagvizsgálók Lapja* 4 pp. 18-23., 6 p. (2021)
- [P2] Spisák B.; Szávai Sz.; Bézi Z. Feszültségkorróziós repedésterjedés vizsgálata In: Barabás, István (szerk.) XXX. Nemzetközi Gépészeti Konferencia - OGÉT Kolozsvár, Románia : Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) (2022) pp. 388-391., 4 p.
- [P3] Bézi Z.; Spisák B.; Erdei R.; Szávai Sz.: Simulation of crack propagation using a GTN ductile damage model based on the virtual crack closure technique, *Procedia Structural Integrity* 47 pp. 646-653., 8 p. (2023)
- [P4] Spisák B.; Bézi Z.; Erdei R.; Szávai, Sz.: Modification of VCCT method with implementation of GTN model for the determination of J-integral, *Procedia Structural Integrity* 48 pp. 326-333., 8 p. (2023)
- [P5] Spisák B.; Szávai, Sz.: Feszültségintenzitási tényező összefüggésének meghatározása hibrid CT próbatesthez, *Anyagvizsgálók Lapja (megjelenés alatt)*
- [P6] Spisák, B.; Szávai, Sz.; Siménfalvi, Z.: Ferrites acél Gurson paramétereinek meghatározása végeelem szimuláció segítségével, XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2019 Nagyvárad, Románia: Erdélyi Magyar Tudományos Társaság, pp. 497-500., 4 p. (2019)
- [P7] Spisák B.; Szávai Sz.: Mechanisms of stress corrosion cracking In: Kékesi, Tamás (szerk.) MultiScience - XXXIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference Miskolc-Egyetemváros, Magyarország : Miskolci Egyetem pp. 1-7. Paper: D3-8 , 7 p. (2019)
- [P8] Spisák B.; Szávai Sz.; Siménfalvi Z.: A feszültségkorrózió bemutatása és vizsgálati módszereinek összefoglalása In: Vadászné, Bognár Gabriella; Piller, Imre (szerk.) Doktoranduszok fóruma 2018 : Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa Miskolc, Magyarország : Miskolci Egyetem 120 p. pp. 96-101. , 6 p. (2019)
- [P9] Spisák B.; Siménfalvi Z.; Szávai Sz.; Bézi Z.: Numerical simulation methods of stress corrosion cracking In: Szita Tóthné, Klára; Jármay, Károly; Voith, Katalin (szerk.) Solutions for Sustainable Development : Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Solutions for Sustainable Development, (ICESSD 2019) London, Egyesült Királyság/Anglia : CRC Press 394 p. pp. 86-93., 8 p. (2020)

9. Hivatkozások

- [1] T. D. Shikalgar, B. K. Dutta, and J. Chattopadhyay. Analysis of p-SPT specimens using Gurson parameters ascertained by artificial neural network. *Engineering Fracture Mechanics*, 240:107324, 2020.
- [2] B. Paermentier, D. Debruyne, and R. Talemi. A machine learning based sensitivity analysis of the GTN damage parameters for dynamic fracture propagation in X70 pipeline steel. *International Journal of Fracture*, 227(1):111–132, 2021.
- [3] M. Shafaie, M. Khademi, M. Sarparast, and H. Zhang. Modified GTN parameters calibration in additive manufacturing of Ti-6Al-4 V alloy: a hybrid ANN-PSO approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(11-12):4385–4398, 2022.
- [4] E. Lucon, M. Scibetta, R. Chaouadi, E. van Walle, and S. W. Dean. Use of miniaturized compact tension specimens for fracture toughness measurements in the upper shelf regime. *Journal of ASTM International*, 3(1):13235, 2006.
- [5] A. Bandura, S. Bubyakin, D. Erak, M. Korshunov, E. Vasileva, and D. Zhurko. The potential for use of mini CT specimens in obtaining the fracture toughness characteristics of 15Kh2NMFA steel. In *6th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, 2022.
- [6] M. Sánchez, S. Cicero, M. Kirk, E. Altstadt, W. Server, and M. Yamamoto. Using mini-CT specimens for the fracture characterization of ferritic steels within the ductile to brittle transition range: A review. *Metals*, 13(1):176, 2023.
- [7] A. Corigliano, S. Mariani, and B. Orsatti. Identification of Gurson-Tvergaard material model parameters via Kalman filtering technique. I. Theory. *International Journal of Fracture*, 104(4):349–373, 2000.
- [8] K. Kumar, A. Pooleery, K. Madhusoodanan, R. N. Singh, J. K. Chakravartty, B. K. Dutta, and R. K. Sinha. Use of miniature tensile specimen for measurement of mechanical properties. *Procedia Engineering*, 86:899–909, 2014.
- [9] L. Zhang, W. Harrison, M. A. Yar, S. G. R. Brown, and N. P. Lavery. The development of miniature tensile specimens with non-standard aspect and slimmness ratios for rapid alloy prototyping processes. *Journal of Materials Research and Technology*, 15:1830–1843, 2021.
- [10] H. K. D. H. Bhadeshia. Neural networks in materials science. *ISIJ International*, 39(10):966–979, 1999.
- [11] Z. Guo, S. Malinov, and W. Sha. Modelling beta transus temperature of titanium alloys using artificial neural network. *Computational Materials Science*, 32(1):1–12, 2005.
- [12] H. Aguir and H. Marouani. Gurson-Tvergaard-Needleman parameters identifica-

- tion using artificial neural networks in sheet metal blanking. *International Journal of Material Forming*, 3(S1):113–116, 2010.
- [13] F. Abbassi, T. Belhadj, S. Mistou, and A. Zghal. Parameter identification of a mechanical ductile damage using artificial neural networks in sheet metal forming. *Materials Design*, 45:605–615, 2013.
- [14] Y. Chahboub, S. Szabolcs, and H. Aguir. Determination of GTN parameters using artificial neural network for ductile failure. In *Solutions for Sustainable Development*, pages 1–8. CRC Press, sep 2019.
- [15] C. P. Guan and H. P. Jin. Determination of residual stress and strain-hardening exponent using artificial neural networks. *Advanced Materials Research*, 472-475:332–335, 2012.
- [16] J. Dzugan, P. Konopik, and M. Rund. Fracture toughness determination with the use of miniaturized specimens. In *Contact and Fracture Mechanics*. InTech, may 2018.
- [17] K. Wallin. The scatter in KIC-results. *Engineering Fracture Mechanics*, 19(6):1085–1093, 1984.
- [18] ASTM E1921-22a. Standard test method for determination of reference temperature, t_0 , for ferritic steels in the transition range, 2023.
- [19] M. Li, R. Chaouadi, I. Uytendhouwen, and T. Pardoën. Size correction scheme to determine fracture toughness with mini-CT geometry in the transition regime. *Engineering Fracture Mechanics*, 290:109486, 2023.
- [20] F. P. Ford, D. F. Taylor, P. L. Andresen, and R. G. Ballinger. Corrosion-assisted cracking of stainless and low alloy steels in LWR environments. Technical Report EPRI final report RP2006-6, Electric Power Research Institute, 1987.
- [21] P. L. Andresen and F. P. Ford. Life prediction by mechanistic modeling and system monitoring of environmental cracking of iron and nickel alloys in aqueous systems. *Materials Science and Engineering: A*, 103(1):167–184, 1988.
- [22] P. M. Scott and M. L. Calvar. Some possible mechanisms of intergranular stress corrosion cracking of alloy 600 in PWR primary water. In *Proceedings of the sixth international symposium on environmental degradation of materials in nuclear power systems - water reactors*, 1993.
- [23] P. M. Scott. An overview of internal oxidation as a possible explanation of intergranular stress corrosion cracking of alloy 600 in PWRs. In *Ninth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, pages 1–14. John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [24] P. A. Aaltonen, T. Saario, P. Karjalainen-Roikonen, J. Pilppo, S. Tahtinen, and H. E. Hanninen. Vacancy-creep model for EAC of metallic materials in high temperature water. All Days, 1996.

- [25] D. D. MacDonald and M. Urquidi-MacDonald. A coupled environment model for stress corrosion cracking in sensitized type 304 stainless steel in LWR environments. *Corrosion Science*, 32(1):51–81, 1991.
- [26] J. R. Galvele. Application of the surface-mobility stress corrosion cracking mechanism to nuclear materials. *Journal of Nuclear Materials*, 229:139–148, 1996.
- [27] T. Shoji, S. Suzuki, and R. G. Ballinger. Theoretical prediction of SCC growth behavior - threshold and plateau growth rate. In *Proceedings of the seventh international symposium on environmental degradation of materials in nuclear power systems*, page 881–889, 1995.
- [28] Q. J. Peng, J. Kwon, and T. Shoji. Development of a fundamental crack tip strain rate equation and its application to quantitative prediction of stress corrosion cracking of stainless steels in high temperature oxygenated water. *Journal of Nuclear Materials*, 324(1):52–61, 2004.
- [29] X. He, C. Yinghao, L. Gangbo, and W. Shuai. Crack growth driving force at tip of stress corrosion cracking in nuclear structural materials at initial stage. *Rare Metal Materials and Engineering*, 47(8):2365–2370, 2018.
- [30] S. J. Lee and Y. S. Chang. Evaluation of primary water stress corrosion cracking growth rates by using the extended finite element method. *Nuclear Engineering and Technology*, 47(7):895–906, 2015.
- [31] L. Zhao, H. Xue, F. Yang, and Y. Suo. Numerical investigation on stress corrosion cracking behavior of dissimilar weld joints in pressurized water reactor plants. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 8(29):410–418, 2014.
- [32] A.P. Jivkov, N. P. C. Stevens, and T. J. Marrow. A three-dimensional computational model for intergranular cracking. *Computational Materials Science*, 38(2):442–453, 2006.
- [33] L. Xiang, X. Wei, and S. Chen. Numerical investigation on the stress corrosion cracking of FV520B based on the cohesive zone model. *Results in Physics*, 12:118–123, 2019.
- [34] W. W. Wang, J. Luo, L. C. Guo, Z. M. Guo, and Y. J. Su. Finite element analysis of stress corrosion cracking for copper in an ammoniacal solution. *Rare Metals*, 34(6):426–430, 2015.
- [35] I. Scheider, M. Pfuff, and W. Dietzel. Simulation of hydrogen assisted stress corrosion cracking using the cohesive model. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(15):4283–4291, 2008.
- [36] R. Falkenberg, W. Brocks, W. Dietzel, and I. Schneider. Simulation of stress-corrosion cracking by the cohesive model. *Key Engineering Materials*, 417-418:329–332, 2009.
- [37] J.J. Rimoli and M. Ortiz. A three-dimensional multiscale model of intergranular

- hydrogen-assisted cracking. *Philosophical Magazine*, 90(21):2939–2963, 2010.
- [38] N.R. Raykar, S.K. Maiti, and R.K. Singh Raman. Modelling of mode-I stable crack growth under hydrogen assisted stress corrosion cracking. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(18):3153–3165, 2011.
- [39] W. Brocks, R. Falkenberg, and I. Scheider. Coupling aspects in the simulation of hydrogen-induced stress-corrosion cracking. *Procedia IUTAM*, 3:11–24, 2012.
- [40] E. D. Eason. Evaluation of the Fracture Research Institute theoretical stress corrosion cracking model. Technical report, EPRI Report 1008274, 2004.
- [41] E. D. Eason, R. Pathania, and T. Shoji. Evaluation of the Fracture Research Institute theoretical stress corrosion cracking model. In *Proceedings of the Twelfth International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, pages 145–154, 2005.