

Hidrogén okozta károsodás elemzése csővezeték-alapanyagban végeselemes módszerrel

Numerical engineering assessment of hydrogen-induced damage in pipeline-base material

CSÖRGŐ Zsombor László¹, Dr. GÁL Viktor²

¹kutató, ²kutató

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., H-3519 Miskolc, Iglói u. 2., +3646560110,

<http://www.bayzoltan.hu>

email: zsombor.csorgo@bayzoltan.hu, viktor.gal2@bayzoltan.hu

Abstract

In modern scientific fields, hydrogen is gaining increasing attention as an energy storage medium. In our research, we analyzed hydrogen-induced embrittlement using material testing and numerical simulations. We developed a testing method suitable for conducting stress corrosion experiments in an environment loaded with inert gas pressure. Through finite element simulations, we were able to interpret the relationship between the effects of hydrogen and the fracture behavior of steel.

Keywords: hydrogen embrittlement, numerical modeling, tensile testing, finite element simulation, fracture mechanics

Kivonat

A jelenkori tudományos területeken egyre nagyobb teret nyer magának a hidrogén, mint energiatároló közeg vizsgálata. Kutatásunkban anyagvizsgálatok és numerikus számítások segítségével elemeztük a hidrogén okozta ridegedést. Kifejlesztettünk egy vizsgálati módszert, amely alkalmas inert gáznyomással terhelt környezetben végzett feszültségkorróziós vizsgálatokra. Végeselemes szimulációkkal értelmezni tudtuk a hidrogén hatását és az acél törési viselkedése közötti összefüggést.

Kulcsszavak: hidrogén ridegedés, numerikus modellezés, szakítóvizsgálat, végeselemes szimuláció, törésmechanika

1. BEVEZETÉS

A hidrogén napjaink egyik legígéretesebb energiahordozója, mivel széndioxid mentes energiatermelést és dekarbonizációt tesz lehetővé az ipar számára. A hidrogén az anyagvizsgálat és a szerkezeti felhasználás terén nagy kihívást jelent, mivel a hidrogénatom diffundálása a fémekbe rontja azok mechanikai tulajdonságait, különösen a képlékenységet és a szívóságot, mely váratlan tönkremenetelhez vezethet. Ezt a jelenséget hidrogén okozta ridegedésnek (hydrogen embrittlement – HE) nevezik, és a modern tudományán kiemelt kutatási területévé vált a szerkezeti acélok használhatóságának szempontjából. [1] A hidrogénkárosodás egy olyan jelenség, amikor a hidrogénatomok felhalmozódása mikroszerkezeti változásokat, repedésindulásokat okozhatnak. Több mechanizmus ismert a hatás leírására, a legelfogadottabb magyarázat a Hydrogen Enhanced Localized Plasticity (HELP) mechanizmus, amikor hidrogénatomok diffundálnak a fémrácsba, és a diszlokációk környezetében felhalmozódnak. A hidrogén csökkenti a diszlokációs kölcsönhatást, ezzel lokális képlékeny zónákat alakít ki az anyagban, ezen folyamat repedésekhez vezethet, így az anyag ridegebben fog viselkedni. [2][3] A hidrogén okozta ridegedés vizsgálata ezért kulcsfontosságú kérdés az anyagvizsgálati módszerekben és a szerkezetek biztonságának garantálásához.

A Bay Zoltán Nonprofit Kft.-nek a Magyar Földgáztároló Zrt.-vel (továbbiakban: MFGT) való együttműködésének köszönhetően jött létre az Akvamarin Plusz projekt, mely a hidrogén, mint energiahordozó jelenlétét kutatja földgázzal való gázkeverék szállítása során. A projekt elsődleges célja egy olyan vizsgálati módszertan kifejlesztése, mellyel meg lehet határozni hidrogénnel terhelt környezetben az egyes

anyagparamétereket magas költségű és nagy nyomású autokláv berendezések nélkül. Az iparban egyre nagyobb szükség van az anyagok, szerkezetek hosszútávú használhatóságának elemzésére, melyhez egy egyszerű laborkörülmények közötti vizsgálat megalkotása volt a cél. A hidrogénatomok magasnyomású gázkontaktusban, korróziós eljárásban vagy elektrolízis folyamata következtében juthatnak a fémbe, ezek közül az első opciót valósítottuk meg. [4] A kiépített kutatási módszer folyamán üreges szakítópróbatestekkel vizsgálatuk a hidrogén jelenlétét a szerkezeti anyagban.

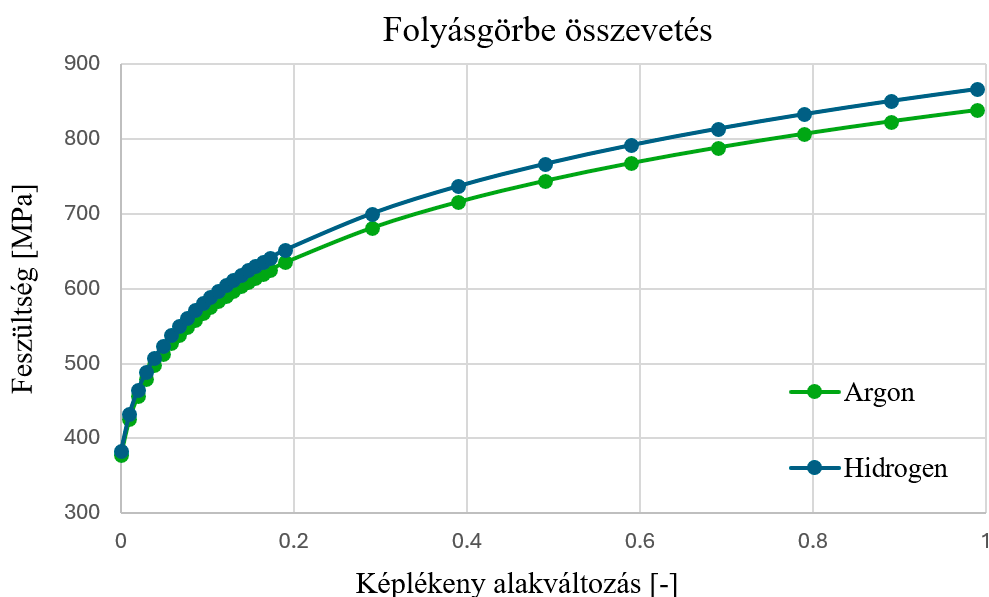
A kutatásaink során egy hidrogénnel terhelt csővezeték-alapanyag törésmechanikai paramétereinek meghatározása volt a célunk. A károsodási paramétereket a Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) modell alapján tervezzük felvenni. A modell egy porozitáson alapuló képlékenységi és károsodási modell, amelyet a képlékeny törés folyamatának leírására fejlesztettek ki. [5] [6] A kutatáshoz kifejlesztettünk egy vizsgálati eljárást, mely során üreges szakítópróbatesteket töltöttünk fel hidrogén gázzal. Szakítóvizsgálatok segítségével meghatározásra került az anyagminőség folyásgörbéje, melyet végeeselemes szimulációval validáltuk. Ebben a cikkben üreges szakítópróbatestek anyagvizsgálatával és numerikus modellezésével foglalkozunk. Az üreges minták belső keresztmetszetének fizikai mérése nehézségekbe ütközik, a kapott szakítóvizsgálati adatokat végeeselemes elemzéssel egészítjük ki: vizsgáljuk a szakadási geometriát és a kialakuló keresztmetszetet, ezek alapján megvizsgáljuk az alapanyagra jellemző törésmechanikai paraméterek kombinációját inert gázzal és hidrogén gázzal egyaránt. A méréseket végeeselemes modellezéssel validáltuk, melynek eredményeként meghatározható a hidrogénnel terhelt acél károsodási paramétere.

2. ALKALMAZOTT ANYAGMODELL

Kifejlesztettünk egy anyagvizsgálati módszertant, melynek segítségével szakítóvizsgálatokat végeztünk el hidrogén gázzal terhelt próbatesteken. Kialakításra került üreges, hengeres szakítópróbatest [7], melyeknek az alapanyaga egy P355NH ferrit-perlites szövetszerkezetű ipari körülmények között használt csőszakasz volt, melyet az MFGT munkatársai szolgáltattak számunkra. A csődarab alapanyagból kimunkált szakítópróbatestek főbb külső geometriai elemei esztergálással készültek el, a belső furat pedig először egy starter fúróval szikraforgácsolással, majd huzalszakra forgácsolással lett méretre munkálva.

Kialakítottunk egy gázellátó rendszert, mellyel a próbatest üregét először argon gázzal, majd hidrogén gázzal töltöttük fel 10 bar nyomáson. Erre azért volt szükség, mert az argon sűrűbb, mint a levegő és nem reakcióképes gáz. Amikor 10 bar nyomáson argont juttatunk a zárt üregbe, az eredeti oxigén részaránya drasztikusan lecsökken, ezt az átmosási folyamatot többször elvégeztük először argon gázzal, majd utána hidrogénnel. Ezután 1 órán keresztül szobahőmérsékleten tartottuk a 10 bar hidrogén gáznyomást az üregben, hogy a hidrogénatomoknak legyen idejük diffundálni az acélba.

Egy Instron E10000 egytengelyű anyagvizsgáló berendezésen szakítóvizsgálatokkal meghatároztuk az anyag szilárdsági és alakváltozási tulajdonságait, ezen vizsgálatokat elvégeztük argon és hidrogén gázos esetekben is, melyekhez végeeselemes szimulációkat készítettünk a validáció érdekében. A mérések és a modellezés eredményeként, a valódi nyúlás-valódi feszültség adatok felhasználásával meghatározásra került az anyag folyási görbéje gázzal terhelt környezetben, melyet az 1. ábra szemléltet.



1. ábra. A P355NH acél folyásgörbéjének összehasonlítása hidrogén és argon gáz hatására

3. GURSON-TVEERGARD-NEEDLEMAN PARAMÉTEREK

Az anyag repedéskeletkezéssel és repedésterjedéssel történő károsodásának leírására több lehetőség létezik, de napjainkban legelterjedtebben egy mikromechanikai modellt alkalmaznak. A Gurson-Tvergaard-Needleman modell jó közelítést ad a mikroüregek keletkezésének, növekedésének és összekapcsolódásának a meghatározására egy anyag tönkremenetele során. A GTN modell nyolc paramétert tartalmaz, mely a következő formában adható meg [8]:

$$\Phi = \Phi(q_1, q_2, f_0, f_c, f_n, f_f, \varepsilon_n, S_n) \quad (1)$$

A GTN modell paramétereinek meghatározásához végeelem szimulációk elvégzésére van szükség. A szimulációk elkészítése előtt szükséges a paraméterekből egy értéktartományt definiálni, annak érdekében, hogy a bemenő adathalmaz létrehozható legyen. Ezekhez a P355NH alapanyagra vonatkozó szakirodalmi kutatások alapján a GTN paramétereknek egy-egy tartományt határoztunk meg, amelyen belül változhatnak az értékek, ezt az 1. táblázat foglalja össze. [9]

GTN paraméterek értéktartománya [9]

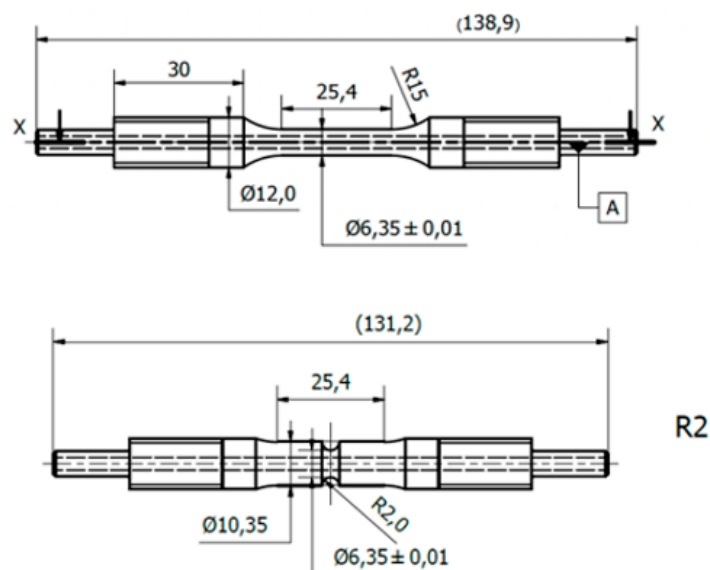
1. táblázat

Paraméter	q_1	q_2	f_0	f_c	f_n	f_f	ε_n	S_n
Érték intervallum	1.5	1	0.0005- 0.001	0.05- 0.15	0.03- 0.12	0.1-0.5	0.45-0.8	0.1

A modell paramétereinek értelmezése alapján az f_0 minél nagyobb értéke a károsodás korai megkezdését eredményezi, ezzel csökkentve az anyag szívósságát. Az f_c paraméter az üregek összenövésére vonatkozik, a lokális lágyulást írja le, az f_f a teljes anyagkárosodást eredményezi, ami a numerikus stabilitás szempontjából fontos. Az f_n paraméter értéke a potenciálisan képződő üregek mennyiségére utal, nagyobb érték esetén több új üreg keletkezik, amivel a károsodás folyamata gyorsabb lesz. Az ε_n nukleációs képlékeny alakváltozás pedig az üregeképződés kezdetét befolyásolja, magasabb értéknél az anyag szívósabban fog viselkedni.

4. VÉGESELEMES MODELL ÉS GEOMETRIA

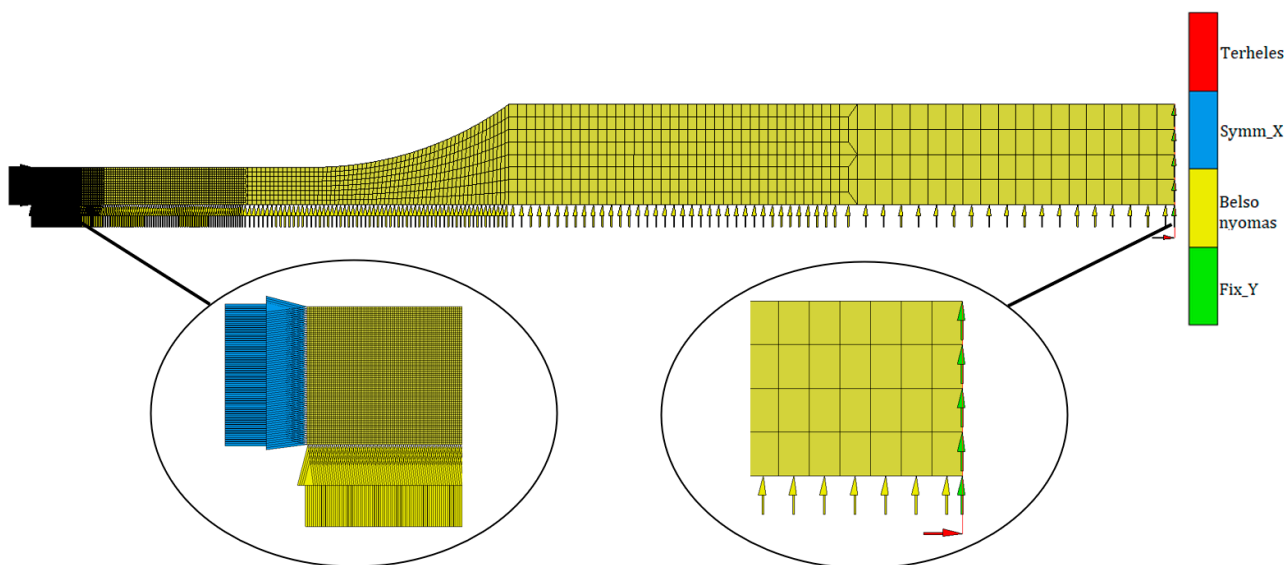
A GTN paraméterek meghatározásához különböző típusú próbatetekre van szükség: bemetszett és hagyományos szakítópróbatetekre. A végeelemes szimulációból származó erő-elmozdulás diagramjainak kiértékelésével határozzuk meg a korábban említett GTN modell károsodási paramétereinek értékeit az argon és hidrogén gázzal feltöltött próbatetek alapanyagaira, az ehhez szükséges szimulációkat az alábbiakban ismertetjük. A próbatetek geometriai tervezését elvégeztük, a bemetszett próbatest esetében a bemetszés sugara $R=2$ mm-ben lett meghatározva. A hengeres szakítópróbatetek geometriáját a 2. ábra szemlélteti, a bemetszett próbatesten nem jelölt méretek megegyeznek az üreges próbatest alapváltozatánál megadott méretekkel.



2. ábra. Hengeres üreges (felül) és bemetszett (alul) szakítópróbatetek műszaki ábrázolása

A szimulációs futtatások során a P355NH jelölésű acél anyagtulajdonságait alkalmaztuk. A rugalmassági modulus értéke 210 GPa, a Poisson-tényező 0,3 volt és az 1. ábrán felvett folyásgörbék lettek felhasználva. A modell geometriáját a 2. ábra alapján rajzoltuk meg, a számítások során a szimmetriát és a hengerességet kihasználva kétdimenziós tengelyszimmetrikus modelleket alkalmaztunk. A modellen négycsomópontú izoparaméteres, kvadratikus elemeket definiáltunk, melyen az elemméretet a kontrakciós szakaszban 0,005 mm-ben vettük fel, a modell összesen 8292 elemet tartalmaz.

A 3. ábra az alkalmazott peremfeltételeket szemlélteti az üreges, hengeres próbatest modellen. A szimmetriát kihasználva x (Symm_X) irányban, illetve a terhelés helyén y (Fix_Y) is lekötöttük a szabadsági fokokat. A terhelés a próbatest végének középpontjában került definiálásra, melyhez egy link paranccsal hozzárendeltük a felület csomópontjait. A terhelést a hossz tengellyel párhuzamos irányú elmozdulással adtuk meg, melynek értéke 3,75 mm volt. A gáznyomást (1 MPa) az üreg belső falára egy felületi terhelésként adtuk meg, mely az elemek középpontjában merőlegesen lettek definiálva a szoftver által. Az elvégzett számítások mindegyike statikus terheléses mérések voltak, melyeknél a szimuláció 2000 lépésben futott le a teljes időegység alatt.

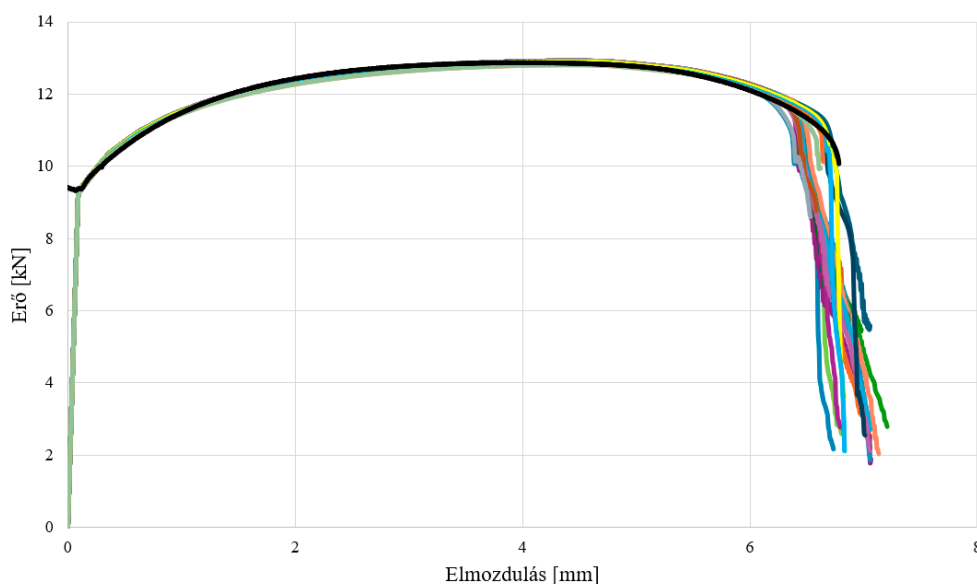


3. ábra. Alkalmazott peremfeltételek a tengelyszimmetrikus modellen

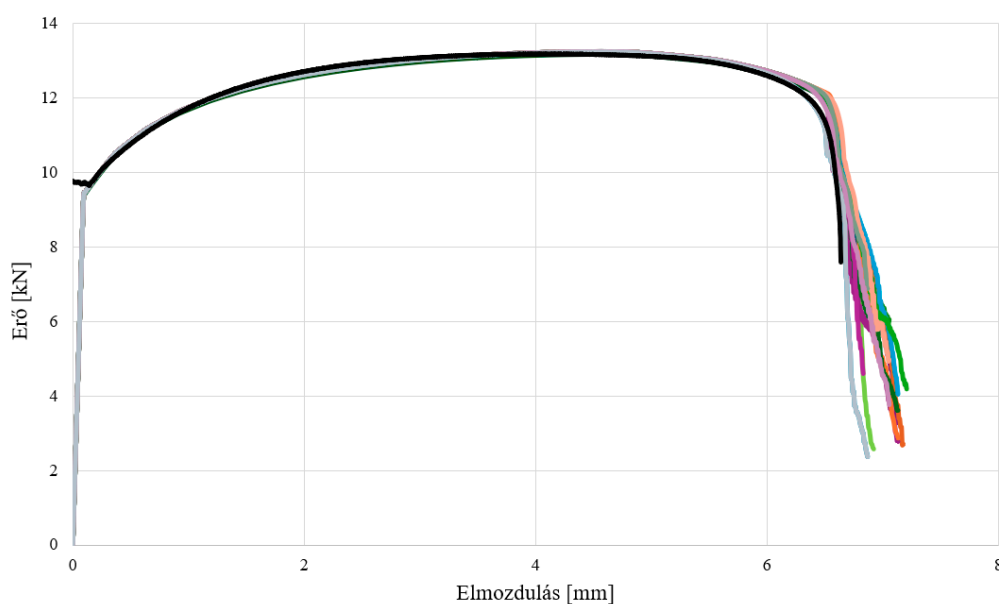
5. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉS

A meghatározott peremfeltételek alapján elkészítettük a szimulációkat a tengelyszimmetrikus modellen a két különböző folyásgörbével (1. ábra). A szakirodalmi kutatások és a tapasztalatok alapján az 1. táblázatban feltüntetett határértékekben belül végeztük el a GTN paraméterek meghatározását a szimulációk futtatása folyamán. A paraméterek vizsgálatánál az intervallumon belül a határértékek közelében vettük fel az értékeket, majd optimalizáltuk azokat. Ezen adatok alapján egy széles adatbázist vettünk fel a szimulációs futtatásokkal először a hidrogénes anyagmodellre.

Ahogy azt korábban említettük, a GTN paraméter pontos meghatározásához szükség van az egyenletes falvastagságú szakítópróbatess mellett bemetszett próbatessetekre is. A GTN paraméterek közelítő értékei azonban az üreges, bemetszés nélküli próbatess vizsgálatával is meghatározható. A kutatási munkánk során az volt a célunk, hogy az anyag szívósági viselkedésének elemzéséhez szükséges GTN paraméterek meghatározásának módszerét kidolgozzuk üreges szakítópróbatessetekkel. Ennek megfelelően első lépésben az üreges próbatess alapján validáltuk a GTN paramétereket, annak bemetszett próbatessetekkel történő pontosítását a további kutatásaink során végezzük el. Megfigyelhető a 4. és az 5. ábrán, melyeken a fekete diagramm a fizikai mérést, a színes diagrammok a szimulációs eredményeket jelölik, hogy a GTN paraméter alkalmazásával a szakadás hamarabb, kisebb megnyúlás után következik be. Ezek alapján az üreges próbatessetek modellezését elfogadottnak tekintettük és a további numerikus számításokat ezen módszertan alkalmazásával végeztük el.



4. ábra. Üreges, argon gázos próbatesten alkalmazott GTN paraméterek eredményei



5. ábra. Üreges, hidrogén gázos próbatesten alkalmazott GTN paraméterek eredményei

A szimulációs eredményekből és szakirodalmi kutatásokból következtettünk, hogy az egyes paraméterek milyen hatással vannak a károsodási folyamatokra, mennyire befolyásolják a vizsgálati értékeket [10]. Az eredmények validálásával meghatároztunk egy jól közelítő paraméterkombinációt a GTN modellre a kétféle gázzal vizsgált alanyra, melyet a 2. táblázat tartalmaz.

GTN paraméterek

2. táblázat

Paraméter	q_1	q_2	f_0	f_c	f_n	f_f	ε_n	S_n
Hidrogén esetén	1.5	1	0.0075	0.1	0.1	0.3	0.58	0.1
Argon esetén	1.5	1	0.005	0.1	0.05	0.2	0.7	0.1

A 2. táblázat adatai alapján levonható következtetések a paraméterek számszerű ismeretében, hogy a hidrogén gáz esetén az f_0 nagyobb értéke csökkentette az anyag szívósságát, amivel az ridegebbé vált. Az f_c paraméter értékében jelentős eltérést nem dokumentáltunk, az acél lágyulásában nem volt eltérés. Az f_f paraméter értéke a hidrogén gáz hatására megnőtt, amely nagyobb mértékű anyagkárosodást eredményezett. Az f_n paraméter értéke a hidrogén hatására megduplázódott, amely magasabb számú üregképződést

eredményezett a vizsgálat során, ezzel gyorsítva a károsodási folyamatot. Az ε_n paraméter értéke csökkent a hidrogén gáz hatására, amely az anyag ridegebbé válását eredményezte az argon gázzal való vizsgálatához képest. A szimulációink során meghatározott paraméterek alapján azt a következtetést vontuk le, hogy a hidrogén okozta elridegedés a vizsgált P355NH anyag esetében a keletkező üregek számának és azok növekedési sebességének emelkedésére vezethető vissza.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Magyar Földgáztároló Zrt.-nek az Akvamarin Plusz projekt megrendeléséért és támogatásáért. A cikkben bemutatott tudományos eredmények ezen projekt keretében végzett kutatásokból származnak. A jelen munka elkészítése és az eredmények felkutatása nem lett volna lehetséges a Magyar Földgáztároló Zrt. szakmai támogatása nélkül.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Sandeep Kumar Dwivedi, Manish Vishwakarma. Effect of hydrogen in advanced high strength steel materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44: 28007-28030, 2019.
- [2] Valentin G. Gavrijuk, Vladyslav M. Shyvanluk, Sergey M Teus. Hydrogen in metallic alloys – embrittlement and enhanced plasticity, *Corrosin Reviews* 3, 267-301, 2024.
- [3] Umme J., Sung J. K. Investigation of hydrogen embrittlement in steel alloys: mechanism, factors, advanced methods nad materials, applications, challenges and future directions: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 38: 1276-1301, 2025.
- [4] Anton T., Gregor M., Markus O., Spethan B., Christoph H., Christoph D. Hydrogen Uptake and Embrittlement of Carbon Steels in Various Environments, *Materials*, 13(16), 3604, 2020.
- [5] Alberto Corigliano, Stefano Mariani, and Barbara Orsatti. Identification of Gurson– Tvergaard material model parameters via Kalman filtering technique. I. Theory. *International Journal of Fracture*, 104(4):349–373, 2000.
- [6] Sondre Bergo, David Morin, Tore Borvik, Odd Sture Hopperstad. Micromechanical modelling of ductile fracture in pipeline steel using a bifurcation-enriched porous plasticity model, *Int J Fract* 227:57-78, 2021.
- [7] ISO 7039:2024 Method for evaluating the susceptibility of materials to the effects of highpressure gas within hollow test pieces.
- [8] H. Aguir and H. Marouani. Gurson-Tvergaard-Needleman parameters identification using artificial neural networks in sheet metal blanking. *International Journal of Material Forming*, 3(S1):113–116, apr 2010.
- [9] Robin Depraetere , Wim De Waele, Margo Cauwels , Tom Depover , Kim Verbeken and Stijn Hertelé: Modeling of Hydrogen-Charged Notched Tensile Tests of an X70 Pipeline Steel with a Hydrogen-Informed Gurson Model; *Materials* 2023, 16, 4839.
- [10] Carlos Felipe Guzman, About the Gurson model and his extensions, University of Liege, Belgium, 2013.