

A HIDROGÉN HATÁSA A FÖLDGÁZSZÁLLÍTÓ CSÖTÁVVEZETÉKEK INTEGRITÁSÁRA

Lukács János

Abstract: A hidrogén iránti kereslet világszerte nő, következésképpen nő a hidrogén szállítása iránti igény is. Ennek gazdaságos és hatékony formája a csővezetékes szállítás. Tekintettel arra, hogy ezzel párhuzamosan a földgázz szállító hálózat kihasználtságának csökkenése prognosztizálható, logikus a rendszer hidrogén tartalmú közeg szállítására való alkalmazásának célkitűzése. Ennek első lépésében a hidrogén földgázba való bekeverése lehet a járható út. Jelen közlemény célja kettős: egyrészt a hidrogén földgáz hálózatba való bekeverése kérdéskörének vázlatos áttekintése, másrészt egy acél cső anyagminőség példáján a vonatkozó kihívások megvilágítása. Összefoglalásra kerülnek a bekeveréssel összefüggő kihívások, a hidrogén okozta károsodási módok, azok csővezetékek integritására gyakorolt hatása, továbbá napjaink hidrogén bekeverési gyakorlata. Egy jellegzetes csővezeték acél anyagminőség (X52) példáján keresztül bemutatásra kerül az alapvető mechanikai tulajdonságok változása hidrogén és sósvíz közegekben. A megismert tapasztalatok rámutatnak a fokozatosság elve betartásának a fontosságára és a helyi sajátosságok figyelembe vételének a szükségességére.

Abstract: As demand for hydrogen increases worldwide, consequently does the need to transport it. Pipeline transport is an economical and efficient form of transport. Given that, at the same time, the utilisation of the natural gas transmission network is forecast to decrease, it is logical to aim to use the system for transport of hydrogen-containing media. As a first step, hydrogen blending into natural gas could be a viable option. The aim of this publication is twofold: firstly, to provide an outline of the issues involved in hydrogen blending into the natural gas network and, secondly, to highlight the challenges involved, using the example of a steel pipe material quality. The challenges associated with blending, the damage modes caused by hydrogen, their impact on pipeline integrity and the current hydrogen blending practices will be summarized. Using a typical pipeline steel grade (X52) as an example, the variation of basic mechanical properties in hydrogen and brine media will be illustrated. The acquired experience highlights the importance of respecting the principle of gradualism and the need to take account of local specificities.

Kulcsszavak: hidrogén, csőtávvezetékes szállítás, károsodási mechanizmusok, szerkezetintegritás, X52 acél

Keywords: hydrogen, pipeline transport, damage mechanisms, structural integrity, X52 steel

1. Bevezetés

A világ földgázz szállító csőtávvezeték hálózatának hossza meghaladja az 1,2 millió kilométert és további, mintegy 0,2 millió kilométer hosszúságú vezeték van építés alatt vagy az építés előtti fejlesztés fázisában (Anon., 2022). A nettó zero kibocsátásra (Anon., 2021a) vonatkozó vállalások teljesülése esetén a földgázfogyasztás jelentős csökkenése prognosztizálható, amellyel a jelenlegi földgázz szállító hálózat egy része feleslegessé válik. Ugyanakkor, a hidrogén felhasználása és – azzal szoros összefüggésben – szállítása iránti igény fokozatosan nő és növekedni fog (Anon., 2022), logikus tehát a földgázz szállító rendszer ilyen célú alkalmazásának víziója, még hozzá rövid távon. Tekintettel arra, hogy a földgáz és a hidrogén tulajdonságai eltérőek, ezt a lehetőséget körültekintően meg kell vizsgálni.

A hidrogén csőtávvezetékes szállításához alkalmazkodni kell, a csővezeték típusától és működési jellemzőitől függően eltérő műszaki kihívásokkal kell szembenézni. Abban az esetben, ha ezek a műszaki kihívások megoldhatók, akkor az újrafelhasználás (repurposing) – a földgázt szállító vezeték átállítása tiszta hidrogén szállítására – várhatóan olcsóbb, az átállás pedig gyorsabb lesz, mint az új, kifejezetten hidrogénszállító vezetékek, illetve hálózatok kiépítése. A jelenlegi földgázszállító vezetékek ilyen célú újrafelhasználását két alapvető feltétel határozza meg (Anon., 2022):

- egyrészt, a kihasználatlan vagy alacsony szinten kihasznált vezetékek és az azokkal párhuzamos vezetékek megléte, amelyek közül az egyik átállítható tiszta hidrogénre, míg a másik kielégítheti a meglévő / majdani földgázigényt;
- másrészt, a hidrogén felvételére képes piaci szereplők (fogyasztók) jelenléte, kiegészülve azzal a várakozással, hogy a hálózat kiépülése után még több szereplő jelent be hidrogén iránti igényt, áll át földgázzal hidrogénre.

Érdeemes megjegyezni, hogy azokban az esetekben, ahol az újrafelhasználás műszakilag nem indokolt, illetve valamilyen oknál fogva nem megvalósítható, és/vagy ahol a földgáz iránti kereslet csökkenése nem prognosztizálható, ott előnyt jelenthet az új hidrogén vezetéknek a meglévő és megmaradó földgázvezetékek mellett történő megépítése (tervezési feladatok, jogok, engedélyek, átfutási idő és költségek).

Az meglévő vezeték újrafelhasználása és az új vezeték építése mellett a harmadik út a hidrogén bekeverése (blending) a földgázba, a meglévő infrastruktúra felhasználásával. Ez lehet átmeneti megoldás, tágabb értelemben átmeneti stratégia, de lehet hosszabb távú megoldás is. A bekeverés, mind a szállító, mind az elosztó rendszer esetében, számos kihívást jelent, amelyeket az *1. táblázat* foglalja össze.

Az *1. táblázat* első három sora a szállító és az elosztó vezeték hálózatokban felhasznált csővekre vonatkozó kihívásokat tartalmazza. Az üzenet egyértelmű: a hidrogén potenciális veszélyforrás, jelenléte felgyorsíthatja a degradációs folyamatokat, különösen a több évtizede üzemelő, az akkor járatos anyagokból épült csővezetékek esetében. Nehezítő körülményként értelmezhető, hogy nagyon ritka az olyan vezetékszakas (több tíz kilométer), még ritkább az olyan vezeték (akár több száz kilométer is lehet), amely azonos minőségű, falvastagságú, azonos gyártótól származó stb. csőszálakból áll, és akkor a hegesztésről, illetve a hegesztett kötésekről (csőgyártásból eredő hosszvarratok és spirálvarratok, illetve építésből és/vagy karbantartásból eredő körvarratok, valamint javító varratok) még nem is szóltunk. Jelen cikk a nagynyomású földgázszállító rendszer csőveire fókuszál, így a polimer csővezetékekre vonatkozó kérdésekre semmilyen vonatkozásban sem tér ki.

1. táblázat: A hidrogén földgázszállító és -elosztó rendszerbe való bekeverésekor értelmezhető kihívások

A kihívás tartalma	Szállítóvezeték hálózat	Elosztóvezeték hálózat
Növekvő fáradásos repedésterjedés a csővezeték acéljában	✓	✓
Csökkenő töréssel szembeni ellenállás a csővezeték acéljában	✓	✓
Hidrogén szivárgás polimer csővezetékben		✓
Csökkenő energiaátviteli kapacitás	✓	✓
Megnövekedett nyomásesés az energiaigény kielégítésekor; megnövekedett gázsebesség	✓	✓
Megnövekedett kompressziós teljesítmény igény	✓	
Megnövekedett centrifugálkompresszor fordulatszám; a centrifugálkompresszor működési tartományának eltolódása	✓	
Megnövekedett NO _x -kibocsátás a hajtóművek és a végfelhasználók számára	✓	✓
Túlzott égésdinamika, lángfelszállás, visszacsapódás	✓	✓
Tüzelőanyag-előgyulladás belső égésű motorokban	✓	
Szelepszivárgás és tartósság	✓	✓
Mérési pontosság és tartósság; gázösszetétel-elemzés pontossága	✓	✓
Biokémiai hidrogén-átalakítás földalatti tárolókban; hidrogénvesztés a földalatti tárolók közetén keresztül	✓	

Forrás: a szerző szerkesztése Topolski et al. (2022) alapján.

Mindezek alapján jelen közlemény célja kettős: egyrészt a hidrogén földgázhálózatba való bekeverése kérdéskörének vázlatos áttekintése, másrészt egy acél cső anyagminőség (API 5L szerinti X52 (API, 2018)) példáján a vonatkozó kihívások megvilágítása.

2. Csővezetékek integritása

Egy szerkezeti elem, illetve szerkezet, így a csőtávvezetékek csövei esetében is, az integritást az üzemeltetésre való alkalmasságként értelmezhetjük, az élettartam bármely pillanatában (Lukács et al., 2012). A hidrogén bekeverésének kezdete egy új pillanat a csővezeték életében, megjelenése kedvezőtlenül befolyásolhatja a csővezeték működését. Nem véletlen, hogy az ASME csővezetéki előírás

rendszerében külön előírás vonatkozik a hidrogént szállító rendszerekre (ASME, 2012), továbbá, a gázszállító csőtávvezetékek integritásával foglalkozó előírások (ASME, 2020; EN, 2022) külön foglalkoznak a hidrogénnel való kitettséggel.

Az alapvető károsodási formák, az alakváltozás, a törés, a korrózió, a kopás és a leromlás közül, akár önállóan, akár interakcióban jelennek meg, egy vagy több köthető egy-egy iparághoz és/vagy szerkezeti elemhez, illetve szerkezethez. A jellemző károsodási formák és azok élettartam során bekövetkező változásai, továbbá az azokhoz kapcsolható károsodási mechanizmusok alapvetően befolyásolják a szerkezetek integritását, illetve élettartamát (Lukács et al., 2012). A belső nyomással terhelt szerkezeti elemek, a csövek, a nyomástartó edények stb. integritásának kézbentartása, élettartamának becslése, várható és/vagy maradó élettartamának meghosszabbítása, műszaki és gazdasági jelentőségű (Lukács, 2005; Koncsik, 2019; Koncsik, 2021).

A hidrogén megjelenéséből eredő hátrányok semlegesítésére, részben általánosan, részben csővezeték specifikusan, több lehetőség kínálkozik, amelyek mindegyike eleme a csővezeték integritásának (Anon., 2022):

- állapotellenőrzés, különösen intelligens görényes vizsgálatokkal, ha azt a vezeték lehetővé teszi (API, 2013, POF, 2021);
- feltárások, ha az intelligens görényes vizsgálatokat a vezeték nem teszi lehetővé (NACE, 2010; NACE, 2016; NACE, 2015);
- bevonatok, így hidrogénzáró bevonat alkalmazása a csővezeték védelmére;
- nyomáscsökkentés a biztonságos működéshez szükséges küszöbérték eléréséig;
- a nyomásváltozások minimalizálása (Dakhel–Lukács, 2021).

3. Hidrogén okozta károsodások

A hidrogén által, a fémekben és ötvözeteikben okozta károsodások egy lehetséges rendszerezését mutatja be az *1. ábra*, a gyakorlatban alkalmazott rövidítésekkel és az angol nyelvű terminológiával együtt. A károsodások több jellegzetes csoportba sorolhatók, a hidrogén okozta elridegedés (HE = Hydrogen Embrittlement) pedig tovább is részletezhető.

1. ábra: A hidrogén okozta károsodások fémekben és ötvözeteikben

Rövidítés	Megnevezés (HU)	Megnevezés (EN)
HD	hidrogén okozta károsodások	Hydrogen Damage
HB	hidrogén okozta hólyagosodás	Hydrogen Blistering
–	töredezett repedés, pehely, halszem	Shatter cracks, flakes, fisheyes
(HT)HA	(magas hőmérsékletű) hidrogén „támadás”	(High-Temperature) Hydrogen Attack
MHF	fémhidrid képződés	Metal Hydride Formation
DFP	alakváltozó képesség csökkenése	Degradation in Flow Properties
HE	hidrogén okozta elridegedés	Hydrogen Embrittlement
HE / HEE	hidrogén környezet okozta elridegedés	Hydrogen Environment Embrittlement
HE / HSC	hidrogén (feszültség) okozta repedés	Hydrogen Stress Cracking
HE / LTD	(húzó) szívósság csökkenés	Loss in Tensile Ductility

Forrás: szerző szerkesztése Ustolin et al. (2021) és Francis (2001) alapján.

A 2. ábra részletezi azokat a jellemző körülményeket, hidrogén jelenlét, illetve tartalom, nyomás és hőmérséklet, amelyek az egyes károsodások megjelenésére jellemzőek.

2. ábra: A hidrogén okozta károsodások jellemző körülményei

Rövidítés	Megnevezés (HU)	Körülmények
HD	hidrogén okozta károsodások	N/A
HB	hidrogén okozta hólyagosodás	H ₂ aktivitás (0,2 – 1) 10 ² MPa; 200 - 595 °C
–	töredezett repedés, pehely, halszem	bugában oldott hidrogén
(HT)HA	(magas hőmérsékletű) hidrogén „támadás”	≤ 10 ² MPa; 200 - 595 °C
MHF	fémhidrid képződés	0,1 - 10 MPa
DFP	alakváltozó képesség csökkenése	0,1 - 10 ppm H ₂ tartalom, ≤ 10 ² MPa
HE	hidrogén okozta elridegedés	N/A
HE / HEE	hidrogén környezet okozta elridegedés	10 ⁻¹² - 10 ² MPa; -100 - 700 °C
HE / HSC	hidrogén (feszültség) okozta repedés	0,1 - 10 ppm H ₂ tartalom; -100 - 100 °C
HE / LTD	(húzó) szívósság csökkenés	0,1 - 10 ppm H ₂ tartalom; -100 - 700 °C

Forrás: szerző szerkesztése Ustolin et al. (2021) alapján.

A 3. ábra, a 2. ábra szerves folytatásaként, azokat az anyagcsoportokat mutatja be, amelyek esetén – összhangban a körülményekkel – az egyes károsodások előfordulnak.

3. ábra: Kapcsolat a hidrogén okozta károsodások jellemző körülményei és az anyagcsoportok között

Rövidítés	Körülmények	Anyagcsoportok
HD	N/A	N/A
HB	H ₂ aktivitás (0,2 – 1) 10 ² MPa; 200 - 595 °C	acélok, Cu és Al ötvözetek
-	bugában oldott hidrogén	acélok (kovácsolás és öntés)
(HT)HA	≤ 10 ² MPa; 200 - 595 °C	karbon- és alacsonyán ötvözött acélok
MHF	0,1 - 10 MPa	Mg, Ta, Nb, V, U, Th, Zr Ti és ötvözetek
DFP	0,1 - 10 ppm H ₂ tartalom, ≤ 10 ² MPa	vas, acélok, Ni bázisú ötvözetek
HE	N/A	N/A
HE / HEE	10 ⁻¹² - 10 ² MPa; -100 - 700 °C	acélok, Ni bázisú ötvözetek, metastabilis rozsdamentes acélok, Ti ötvözetek
HE / HSC	0,1 - 10 ppm H ₂ tartalom; -100 - 100 °C	karbon- és alacsonyán ötvözött acélok
HE / LTD	0,1 - 10 ppm H ₂ tartalom; -100 - 700 °C	acélok, Ni bázisú ötvözetek, Be és Cu bronzok, Al ötvözetek

Forrás: szerző szerkesztése Ustolin et al. (2021) alapján.

A 4. ábra a környezeti körülmények által előidézett repedések (EAC = Environmentally Assisted Cracking) legfontosabb típusait részletezi, kiemelve azok közül a hidrogénhez közvetlenül köthető változatokat.

4. ábra: Környezeti körülmények által előidézett repedések

Főcsoport	Rövidítés	Megnevezés
EAC	SCC	Stress Corrosion Cracking ← A KLASSZIKUS
	SSC (SSCC)	Sulphide Stress Cracking (Sulphide Stress Corrosion Cracking)
	HSC	Hydrogen Stress Cracking
	HIC (SWC)	Hydrogen Induced Cracking (régebben StepWise Cracking)
	SOHIC	Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking
	SZC	Soft Zone Cracking (SSC a karbon acélok hegesztett kötéseiben)
	HAC	Hydrogen Assisted Cracking ← hegesztett kötés
	HISC	Hydrogen Induced Stress Cracking ← katódvédelem

Forrás: szerző szerkesztése Francis (2001) és Thodla (é. n.) alapján.

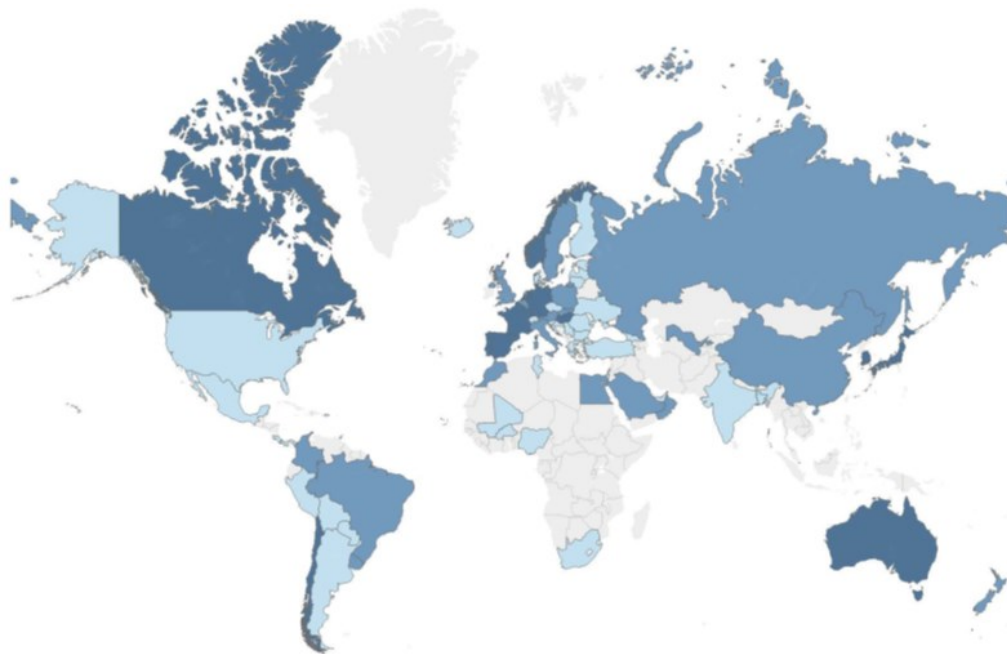
Tekintettel arra, hogy a földgázz szállító csőtávvezetékek csöveinek jellemző anyagminősége az ötvöztelen acél (karbon acél), üzemeltetésük jellemző hőmérséklet-tartománya nem esik a nagyon alacsony, illetve a nagyon magas hőmérséklet-tartományokba, a hidrogén okozta elridegedés különböző változataira kell elsődlegesen felkészülnünk.

4. Hidrogén stratégiák

Hidrogén stratégiák különböző céllal és mélységben készülnek, azok fókuszában állhat egy-egy fő célkitűzés (például dekarbonizáció), egy-egy szektor (például ipar), egy-egy szektorális prioritás (például közlekedésen belül a személyautók) stb., a

legjellemzőbb talán a horizontális és a vertikális szempontok összhangjára való törekvés, azok megjelenítése. Az 5. ábra az országok hidrogénstratégia kidolgozására irányuló tevékenységeinek áttekintő térképe, ahol sötétkék szín jelzi azokat az országokat – közöttük Magyarországot –, amelyek már közzétették nemzeti hidrogén stratégiájukat, középkék azokét, amelyek jelenleg készítik azt, világoskék pedig azokat az országokat mutatja, amelyekben szakpolitikai egyeztetések és/vagy első demonstrációs projektek zajlanak (Anon., 2021b).

5. ábra: Országok hidrogénstratégia kidolgozására irányuló tevékenységei



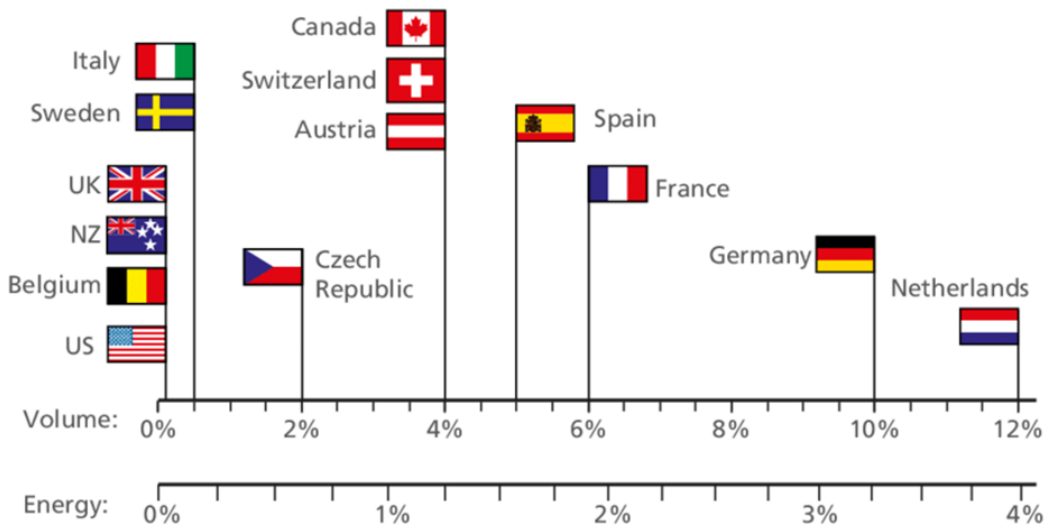
Forrás: Anon. (2021b)

Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiájában a támogató célok egyike a „2% térfogatarányos bekeverés lehetővé tétele a földgázrendszerben rövid távon, amelyet közép távon az addig elvégzett vizsgálatok függvényében emelni kell” (Anon., 2021c, p. 8.). Részletesebben kifejtve, „[b]elátható időn belül Magyarországon is számítani kell a földgázhálózati hidrogén megjelenésére. Ezt megalapozandó, a rendkívül kiterjedt és nemzetközi viszonylatban is kiváló földgáz infrastruktúrát szükséges vizsgálni a hidrogén földgázhálózati betáplálásával kapcsolatosan. A földgáz-infrastruktúra hasznosítása mellett fontos feladat az európai hidrogén gerincvezetékhez történő kapcsolódás megteremtése is” (Anon., 2021c, p. 8.). A stratégia kitekint 2030-on túlra is, a 2040 utáni időszakra kitűzött cél „[a] földgáz elosztóhálózat, valamint a felhasználói rendszerek felkészítése tiszta hidrogén befogadására és felhasználására” (Anon., 2021c, p. 14.).

5. A hidrogén bekeverése a földgázszállító hálózatba

A bekeverés a hidrogén bejuttatása a földgázáramba, a meglévő infrastruktúra felhasználásával. Egyes kutatások azt mutatják, hogy a kevert hidrogénnek a földgázszállító hálózatokba való integrálása 5-10% körüli szinteken viszonylag kismértékű korszerűsítéssel megvalósítható (Anon., 2021a). A 6. ábra összefoglalja a hidrogén nemzeti gázhálózatokba történő bekeverésére vonatkozó korlátozásokat, országonként.

6. ábra: A hidrogén nemzeti gázhálózatokba történő bekeverésére vonatkozó küszöbértékek



Forrás: Staffell et al. (2017)

A küszöbértéket körültekintően kell meghatározni, figyelembe véve a gázminőségre érzékeny különböző fogyasztókat. Továbbá, keverési küszöbértékek közötti különbségek befolyásolhatják a gázinfrastruktúra határokon átnyúló átjárhatóságát, ami a cserepontokon harmonizálást igényelhet. A 2. táblázat bemutat néhány tervezett, illetve javasolt hidrogén csőtávvezeték folyosót (Anon., 2022), amely egyfelől elgondolkodtató következtetésekre adhat okot (vesd össze az 5. és a 6. ábrákkal), másfelől azonban iránykijelölő szerepet is betölthet. Amint az a 2. táblázatból látszik, a projektek között található szárazföldi és tengeri csőtávvezetékek létesítésére vonatkozó terveket, azok különböző fázisban vannak, egyes elképzeléseknek pedig még az idő horizontja sem ismert. A hidrogén iránti igények növekedése (Anon., 2022) és a nettó zéró kibocsátás stratégiája (Anon., 2021a) külön-külön és együttesen egyaránt azt valószínűsíti, hogy ezeknek a projekteknek a jelentősége növekedni, átfutási idejük pedig csökkenni fog.

2. táblázat: Tervezett és javasolt hidrogén csőtávvezetékek folyosók

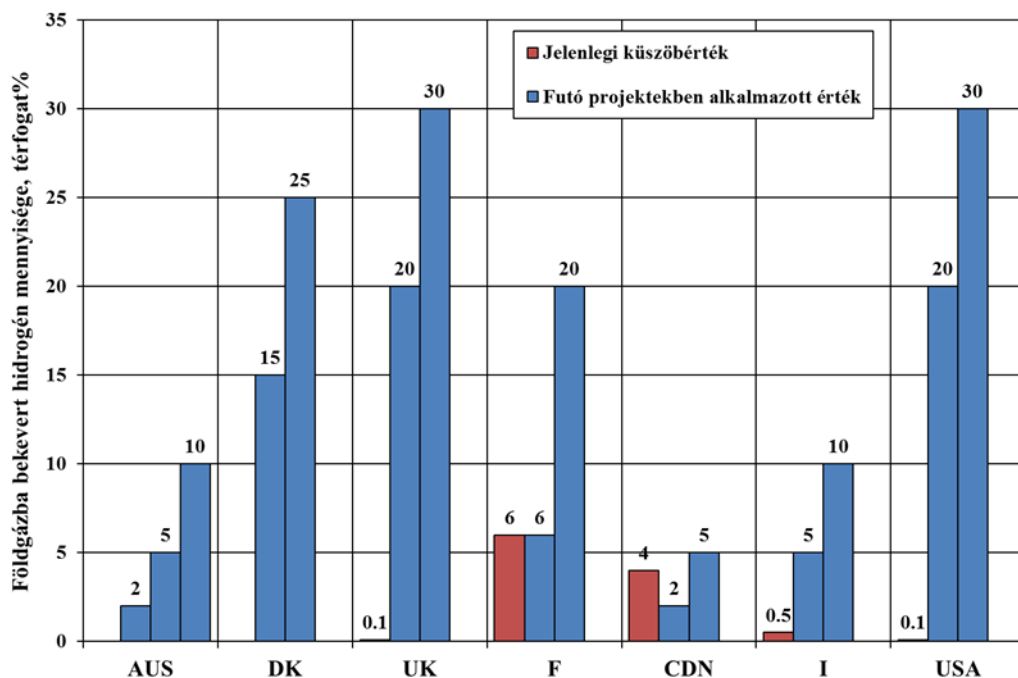
Országok	Folyosó, illetve terv	Szereplők	Típus, hossz
NL-D	Delta Corridor	NL kormány, Rotterdam kikötő, Chemelot	szárazföldi, 400 km
E	HyDeal España	Enagás, ArcelorMittal, Fertiberia, DH2 Energy	szárazföldi, 900 km
E-P	2022-2030 Strategic Plan	Enagás	szárazföldi, 100 km
E-F	2022-2030 Strategic Plan	Enagás	szárazföldi, 200 km
FIN	Nemzeti hidrogén infrastruktúra-fejlesztési terv	Gasgrid Finland	szárazföldi
FIN-S	FIN és S hálózatüzemeltetők (TSO) terve	Gasgrid Finland, Swedegas	szárazföldi, 1000 km
BG-GR	BG és GR hálózat-üzemeltetők (TSO) terve	Bulgartransgaz, DESFA	szárazföldi, 350 km
RO-HU-SK-PL	RO-HU-SK-PL hálózat-üzemeltetők (TSO) megállapodása	Transgaz, FGSZ, EUSTREAM, GAZSYSTEM	szárazföldi
UA-SK-CZ-D	Central European Hydrogen Corridor	Ukrán gáz TSO, EUSTREAM, NET4GAS, OGE	szárazföldi
N-D	Megvalósíthatósági tanulmány	N és D kormányok	tengeri, 1300 km
B-DK-D-NL	Együttműködési megállapodás	B, DK, D és NL kormányok	tengeri
E-I	Műszaki megvalósíthatóságra vonatkozó megállapodás	Enagás, Snam	tengeri, 750 km

Forrás: szerző szerkesztése Anon. (2022) alapján.

Az elosztó hálózatokban, a polimer alapú csővezetékek oldaláról, a legfeljebb 20%-os bekeverés nem igényelne jelentős változtatásokat az infrastruktúrában, a gázkromatográfokat azonban át kellene alakítani. Az elosztó hálózatokban ugyanaz a 20%-os küszöbérték komolyabb korszerűsítést igényel, ezért jelenleg ez tűnik a technikai felső határnak, amely felett már jelentős beruházásokra lehet szükség.

A 7. ábra jelenleg futó projektek hidrogén bekeverési adatait mutatja (kék színű oszlopok), összevetve azokat a 6. ábrán bemutatott küszöbértékekkel (tégelvörös színű oszlopok). A 7. ábra alapján megállapítható, hogy a projektekben használt százalékos értékek számottevően meghaladják a jelenlegi küszöbértékeket, továbbá, igazolni látszanak az előző gondolatban megfogalmazott technikai határt.

7. ábra: Hidrogén bekeverések adatai futó projektekben és a jelenlegi küszöbértékek



Forrás: szerző szerkesztése Topolski et al. (2022) és Mahajan et al. (2022) adatai alapján.

Említést érdemel, hogy újrafelhasználás típusú (100% hidrogén) projektek is futnak az Egyesült Királyságban (UK), Franciaországban (F), Németországban (D), és német-francia-belga (D-F-B) együttműködésben.

Szólni kell még a bekeverés ellentétéről, a tiszta hidrogén leválasztásáról vagy kinyeréséről (deblending), amelyet célzott felhasználás, illetve hidrogénmentes földgáz előállítás céljából végeznek, a kevert hidrogén-földgáz és a földgázáramokból. Erre egyes esetekben kifejezetten szükség lehet, más esetekben pedig lehetnek annak előnyei (Anon., 2022). Bár a gázleválasztási technológiák, mint például a kriogén leválasztás, a membránleválasztás vagy a nyomásingadozáson alapuló adszorpció, kiforrottak és évtizedek óta alkalmazzák azokat az iparban, a technológiát még nem használták nagy léptékben, például elosztóhálózatokban. Különböző helyzetekben lehet szükség a hidrogén-leválasztásra, illetve előnyös lehet a hidrogén-leválasztás:

- egyes fogyasztók nem használhatnak növelt hidrogéntartalmú gázkeveréket (például régebbi gázturbinák vagy földgáztöltő állomások), azok >98%-os földgázt igényelnek;
- egyes fogyasztók – éppen ellenkezőleg –, >99,97%-os hidrogéntartalmú gázt igényelnek (például üzemanyagcellás járművek);
- előnyös lehet a hidrogént nagy(obb) mennyiségben kinyerni egy ipari csomópontban, majd onnan tovább elosztani.

6. Az X52 acél tulajdonságairól

A szénhidrogén szállító csőtávvezetékek cső anyagának meghatározó előírása, hosszú évtizedek óta, az API 5L szabvány (API, 2018). Tekintettel az egyes anyagminőségek alkalmazási korszakaira, amelyekből napjainkra élettartamok, illetve maradó élettartamok vezethetők le, előfordulási gyakoriságaira, az acél-, illetve csőgyártó technológiák változásaira, érdemes a csőanyagokra vonatkozó elemzéseket a szabványos anyagminőségenként megközelíteni. Az előírás (API, 2018) alacsonyabb szilárdsági kategóriába tartozó minőségei közül az egyik karakteres minőség az X52 jelű acél, amelyből szerte a világban építettek szállító vezetékeket.

Az X52 minőség kémiai összetételét mutatja be irodalmi források alapján, az azokban használt acél megjelölésekkel, a 3. táblázat.

3. táblázat: X52 minőségű acélok kémiai összetétele, tömeg%

Jel	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Forrás
L360NS	0,12	1,50	0,25	N/A	N/A	0,07	0,04	Mohtadi-Bonab, 2019
X52-A	0,080	1,05	0,26	0,019	0,003	0,02	0,019	Contreras et al., 2011
X52-B	0,090	0,89	0,30	0,006	0,0015	0,07	0,05	
X52	0,060	0,870	0,120	0,011	0,006	0,030	0,020	Nanninga et al., 2012
X52TM	0,111	1,31	0,19	0,017	0,001	0,058	0,033	Michler–Naumann, 2010
X52	0,206	1,257	0,293	N/A	0,009	0,014	0,017	Allhussein et al., 2011
Jel	V	Mo	Ti	Cu	Nb	Al	V+Ti+Nb	Forrás
L360NS	N/A	0,02	N/A	0,08	N/A	N/A	–	Mohtadi-Bonab, 2019
X52-A	0,054	N/A	0,002	0,019	0,041	0,038	–	Contreras et al., 2011
X52-B	0,036	0,05	0,016	0,12	N/A	0,025	–	
X52	–	N/A	–	N/A	–	N/A	0,030	Nanninga et al., 2012
X52TM	0,009	0,012	0,004	0,075	0,019	0,03	–	Michler–Naumann, 2010
X52	N/A	0,006	0,001	0,011	<0,03	0,034	–	Allhussein et al., 2011

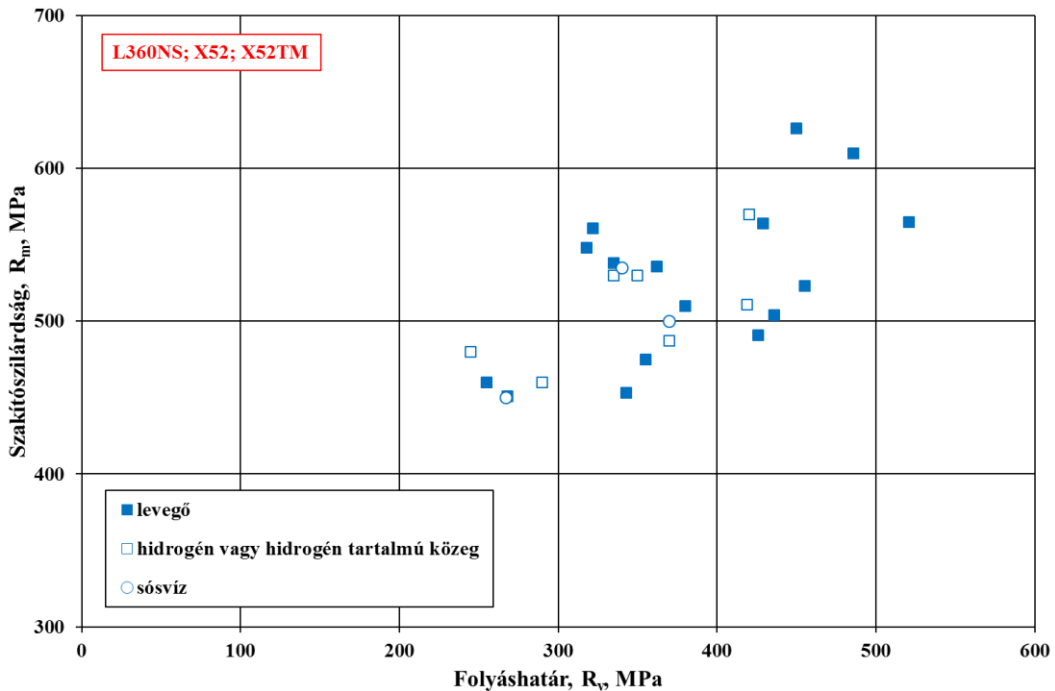
Forrás: szerző szerkesztése a táblázatban felsorolt források alapján.

A 3. táblázat adatai alapján megállapítható, hogy az egyes X52 jelű acél anyagminőségek kémiai összetétele igen tág határok között változhat, amely hatással lehet azok alapvető mechanikai tulajdonságaira, hegeszthetőségére (például

számított karbon egyenérték), környezeti hatásokkal szembeni ellenálló képességére stb.

A 8. ábra bemutatja a feldolgozott irodalmi forrásokban található X52 jelű acélok szakítószilárdság-folyáshatár (R_m - R_y) összefüggését, levegőben, hidrogénben vagy hidrogéntartalmú közegben, valamint sósvízben mért adatok alapján.

8. ábra: X52 jelű acélok szakítószilárdság-folyáshatár összefüggése

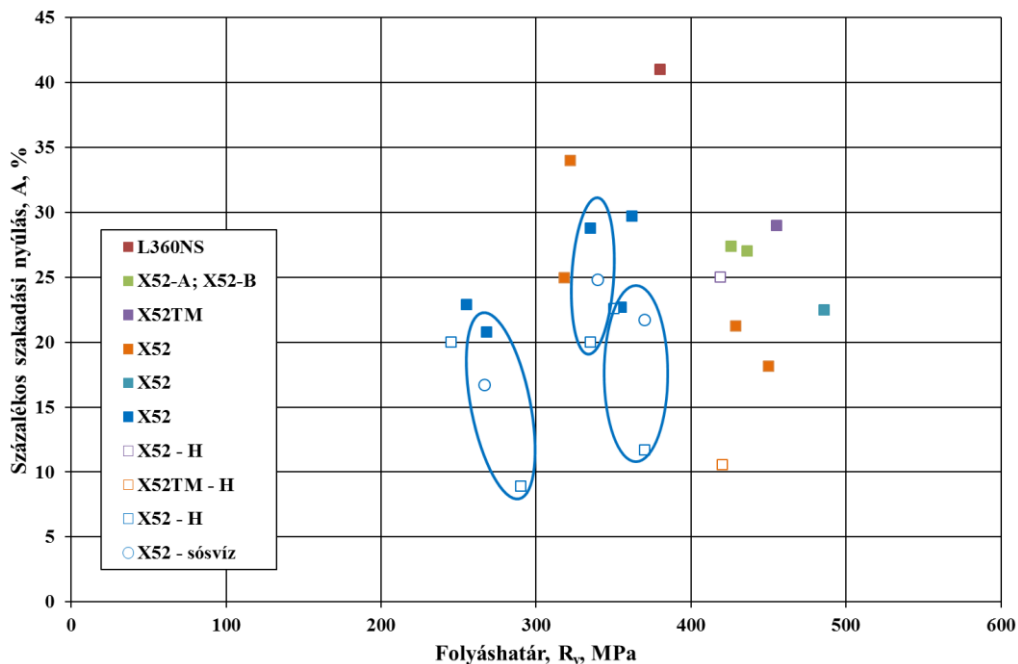


Forrás: szerző szerkesztése a 3. táblázatban felsorolt források, továbbá Slifka et al. (2014) és Nykyforchyn et al. (2009) alapján.

A 8. ábra alapján kimondható, hogy a vizsgálati közegeknek nem volt szignifikáns hatása a folyáshatár (R_y) és a szakítószilárdság (R_m) értékekre, illetve a két szilárdsági jellemző összefüggésére. A környezetitől eltérő közegekre vonatkozó eredmények illeszkednek a levegő közegben meghatározott eredményekre.

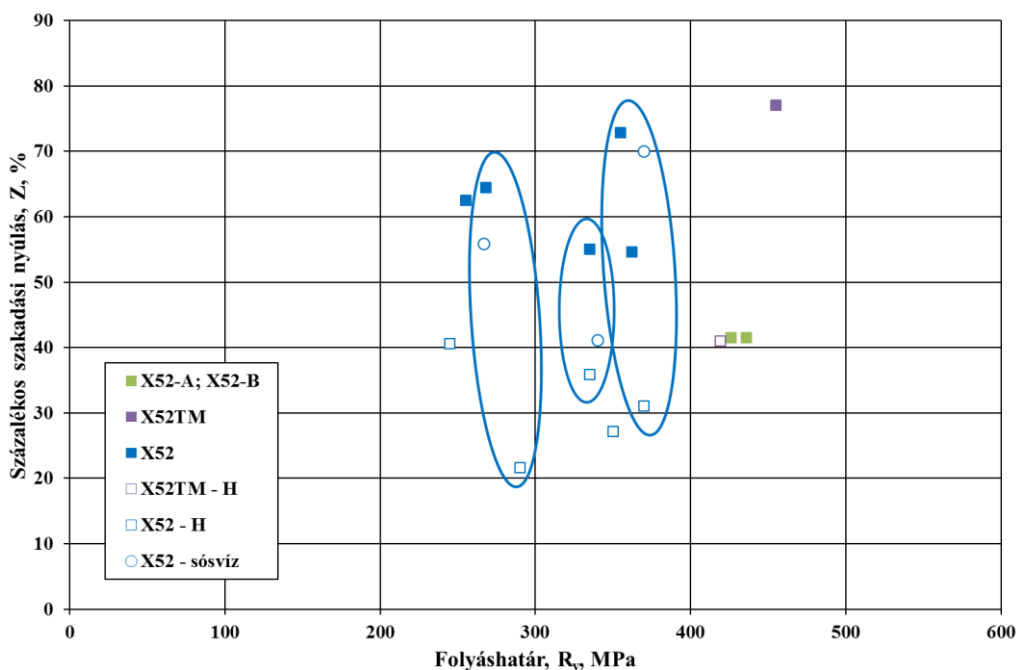
A 9. és a 10. ábrák a feldolgozott irodalmi forrásokban található X52 jelű acélok százalékos szakadási nyúlás-folyáshatár (A - R_y) és százalékos keresztmetszet csökkenés-folyáshatár (Z - R_y) összefüggéseit szemléltetik, hasonlóan a 8. ábrához, levegőben, hidrogénben vagy hidrogéntartalmú közegben, valamint sósvízben mért adatok alapján. Mindkét ábrán a bekarikázott pontok mutatják azokat az adatokat, amelyek egy-egy konkrét X52 acélra vonatkoznak, a három közegben.

9. ábra: X52 jelű acélok százalékos szakadási nyúlás-folyáshatár összefüggése



Forrás: szerző szerkesztése a 3. táblázatban felsorolt források, továbbá Slifka et al. (2014) és Nykyforchyn et al. (2009) alapján.

10. ábra: X52 jelű acélok százalékos keresztmetszet csökkenés-folyáshatár összefüggése



Forrás: szerző szerkesztése a 3. táblázatban felsorolt források, továbbá Slifka et al. (2014) és Nykyforchyn et al. (2009) alapján.

A 9. és a 10. ábrák alapján kimondható, hogy a vizsgálati közegnek szignifikáns hatása volt mind a százalékos szakadási nyúlás (A), mind a százalékos keresztmetszet csökkenés (Z) értékekre, következésképpen azok folyáshatárral (R_y) való összefüggésére is. Összevetve a vizsgálati közegek hatását egyértelműen állítható, hogy a hidrogén vagy hidrogén tartalmú közeg lényegesen kedvezőtlenebb hatású volt, mint a sósvíz közeg.

7. Következtetések

A cikkben összefoglalt ismeretek és feldolgozott adatok alapján az alábbi következtetések fogalmazhatók meg.

A nagynyomású földgázszállító távvezetési rendszer hidrogén tartalmú közeg szállítására alkalmas lehet. Ennek igazolása a fokozatosság elvének betartásával lehetséges, kezdve a bekevert hidrogén mennyiségének fokozatos növelésével.

A bekevert hidrogén mennyiségének megállapításakor, illetve határértéke meghatározásakor szükséges és érdemes a nemzetközi tapasztalatokat alaposan feldolgozni és értékelni. Ugyanakkor, a döntések meghozatalánál a hazai sajátosságokat figyelembe kell venni.

Abban az esetben, ha a távvezetési rendszert tiszta hidrogén szállítására is használni szeretnénk, akkor lényegesen alaposabb elemzéseket kell végezni.

A csőtávvezetési rendszer eltérő sajátosságú elemeinél (például cső, szerelvények, kompresszor állomás) eltérő metodika alkalmazása szükséges.

A cikkben példaként elemzett X52 jelű acél kémiai összetétele és alapvető mechanikai tulajdonságai széles határok között változhatnak. Az acél alapvető szilárdsági jellemzői (folyáshatár és szakítószilárdság) nem mutattak szignifikáns változásokat a vizsgált közegek esetében, alapvető alakváltozási jellemzői (százalékos szakadási nyúlás, százalékos keresztmetszet csökkenés) azonban igen.

Tekintettel arra, hogy a földgázszállító csővezeték szakaszok ritkán tartalmaznak csak azonos anyagminőségű csöveket, indokolt az anyagminőségek hidrogén tartalmú közegben várható viselkedését anyagminőségként és interakcióban egyaránt elemezni.

Mivel a hidrogén okozta károsodások repedésképződéssel és repedés-növekedéssel járó folyamatok eredményei, az anyagminőségekre vonatkozó elemzéseket ki kell terjeszteni a törésmechanikai mennyiségekre is. Azokban az esetekben, ha a csővezetékek terhelésében ismétlődő igénybevételekre is számítani lehet, akkor az azokkal szembeni ellenállást külön elemzése is szükséges.

Irodalomjegyzék

- Alhussein, A., Capelle, J., Gilgert, J., Dominiak, S., Azari, Z. (2011): Influence of sandblasting and hydrogen on tensile and fatigue properties of pipeline API 5L X52 steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (3): 2291–2301. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.081>
- Anon. (2021a): Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector. 4th revision, International Energy Agency. <<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>> (2023.02.24.)
- Anon. (2021b): Hydrogen on the horizon: ready, almost set, go? Working Paper National Hydrogen Strategies World Energy Council, in collaboration with EPRI and PwC.

- <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf> (2023.02.24.)
- Anon. (2022): Global Hydrogen Review 2022. International Energy Agency. <<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>> (2023.02.24.)
- API (2018): API Specification 5L: Line Pipe.
- API (2021): API STD 1163: In-line Inspection Systems Qualification Standard.
- ASME (2014): ASME B31.12: Hydrogen Piping and Pipelines.
- ASME (2020): ASME B31.8S: Managing System Integrity of gas pipelines.
- Contreras, A., Salazar, M., Albitar, A., Galván, R., Vega, O. (2011): Assessment of Stress Corrosion Cracking on Pipeline Steels Weldments Used in the Petroleum Industry by Slow Strain Rate Tests. In: Sudnik W. (szerk.): *Arc Welding*. IntechOpen, London. 127–150. <https://doi.org/10.5772/26569>
- Dakhel, A. Y., Lukács, J. (2021): How to prevent damages of transporting pipeline girth welds? *Multidiszciplináris Tudományok*, 12 (4): 208–217. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.4.25>
- EN (2022): EN 17649: Gas infrastructure – Safety Management System (SMS) and Pipeline Integrity Management System (PIMS) – Functional requirements.
- Francis, R. A. (2001): Stress Corrosion Cracking And Hydrogen Cracking: Differences Similarities And Confusion. CAP-2001 Paper 052. <https://www.academia.edu/16979884/Stress_Corrosion_Cracking_and_Hydrogen_Cracking_Differences_Similarities_and_Confusion> (2023.02.24.)
- Koncsik Zs. (2019). A szerkezetintegritás helye és szerepe az oktatásban és a kutatásban. *Multidiszciplináris Tudományok*, 9 (4): 63–71. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.4.5>
- Koncsik Zs. (2021). Szerkezetintegritási kutatások az Innovatív Anyagtechnológiák Tudományos Műhelyben. *Multidiszciplináris Tudományok*, 11 (2): 372–379. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.2.49>
- Lukács, J. (2005). Dimensions of lifetime management. *Materials Science Forum*, 473-474: 361–368. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.473-474.361>
- Lukács J., Nagy Gy., Harmati I., Koritárné Fótos R., Kuzselláné Koncsik Zs. (2012): *Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből*. Miskolci Egyetem, Miskolc.
- Mahajan, D., Tan, K., Venkatesh, T., Kileti, P., Clayton, C. R. (2022): Hydrogen Blending in Gas Pipeline Networks – A Review. *Energies*, 15: 3582. <https://doi.org/10.3390/en15103582>
- Michler, T., Naumann, J. (2010): Microstructural aspects upon hydrogen environment embrittlement of various bcc steels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (2): 821–832, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.10.092>
- Mohtadi-Bonab, M. A. (2019): Effects of Different Parameters on Initiation and Propagation of Stress Corrosion Cracks in Pipeline Steels: A Review. *Metals*, 9 (5): 590. <https://doi.org/10.3390/met9050590>
- NACE (2010): ANSI/NACE SP0502: Standard Practice Pipeline External Corrosion Direct Assessment Methodology.
- NACE (2015): NACE SP0204: Stress Corrosion Cracking (SCC) Direct Assessment Methodology.
- NACE (2016): NACE SP0206: Internal Corrosion Direct Assessment Methodology for Pipelines Carrying Normally Dry Natural Gas (DG-ICDA).
- Nanninga, N. E., Levy, Y. S., Drexler, E. S., Condon, R. T., Stevenson, A. E., Slifka, A. J. (2012): Comparison of hydrogen embrittlement in three pipeline steels in high pressure gaseous hydrogen environments. *Corrosion Science*, 59: 1–9, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.01.028>
- Nykyforchyn, H., Lunarska, E., Tsyrlunyk, O., Nikiforov, K., Gabetta, G. (2009): Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite–pearlite steel. *Materials and Corrosion*, 60 (9): 716–725. <https://doi.org/10.1002/maco.200805158>
- POF (2021): POF 100 Standard Practice: Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines. <<https://pipelineoperators.org/cdn/276341a3-f5e6-49cf-9897-de6ab41bdd5a/POF%20100%20Specifications%20and%20requirements%20for%20ILI%20-%20Nov%202021.pdf>> (2023.02.24.)

- Slifka, A. J., Drexler, E. S., Nanninga, N. E., Levy, Y. S., McColskey, J. D., Amaro, R. L., Stevenson, A. E. (2014): Fatigue crack growth of two pipeline steels in a pressurized hydrogen environment. *Corrosion Science*, 78: 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.10.014>
- Staffell, I., Dodds, P. E. (szerk.) (2017): The role of hydrogen and fuel cells in future energy systems. H2FC SUPERGEN, London. <https://www.h2fcsupergen.com/wp-content/uploads/2015/08/J5212_H2FC_Supergen_Energy_Systems_WEB.pdf> (2023.02.24.)
- Thodla, R. (N/A): Choosing the best materials to avoid environmentally assisted cracking. <<https://www.dnv.com/oilgas/laboratories-test-sites/article/choosing-the-best-materials-to-avoid-environmentally-assisted-cracking.html>> (2023.02.24.)
- Topolski, K., Reznicek, E. P., Erdener, B. C., San Marchi, C. W., Ronevich, J. A., Fring, L., Simmons, K., Fernandez, O. J. G., Hodge, B.-H., Chung, M. (2022): Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5400-81704. <https://doi.org/10.2172/1893355>
- Ustolin, F., Paltrinieri, N., Berto, F. (2020): Loss of integrity of hydrogen technologies: A critical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (43): 23809–23840. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.021>