

A SZÉNACÉLOK ALKALMASSÁGA HIDROGÉNTARTALMÚ KÖZEG TÁROLÁSÁRA ÉS SZÁLLÍTÁSÁRA

Pap Ádám 

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: pap.adam@kiskft.hu

Meilinger Ákos 

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: akos.meilinger@uni-miskolc.hu

Gáspár Marcell 

egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: marcell.gaspar@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A hidrogén és a hidrogénnel dúsított földgáz alkalmazása napjainkban számos kutatás és projekt központi témája. Mivel a meglévő földgáz infrastruktúra vezetékeinek döntő többsége szénacélból készült, kiemelten fontos annak vizsgálata, hogy a hidrogén miként befolyásolja ezen anyagok mechanikai tulajdonságait. Jelen közlemény hazai és nemzetközi szakirodalmak, ajánlások, laboratóriumi és törésmechanikai vizsgálatok eredményeit ismerteti a hidrogén okozta ridegedés, a szilárdsági és alakváltozási jellemzők változása, valamint a hegesztett kötések esetén felmerülő kihívások kapcsán. Összefoglalásra kerülnek a különböző H₂-földgáz keverék arányok mellett várható kockázatok, az alkalmazható acélminőségek, továbbá a kifejezetten hidrogénközegre fejlesztett szénacélok előnyei is.

Kulcsszavak: hidrogén, földgáz, szénacél, csővezetékek, hidrogén okozta ridegedés

Abstract

The application of hydrogen and natural gas–hydrogen blends is a subject of extensive research efforts. As most existing natural gas transmission pipelines are made of carbon steel, it is essential to assess how hydrogen affects the mechanical properties of these materials. This paper provides an overview of Hungarian and international literature, recommendations, laboratory studies, and fracture mechanics test results related to hydrogen-induced embrittlement, changes in strength and ductility, as well as challenges associated with welded joints. The expected risks at various H₂–natural gas blending ratios, the applicable steel grades, and the advantages of carbon steels specifically developed for hydrogen service are also summarized.

Keywords: hydrogen, natural gas, carbon steel, pipeline, hydrogen embrittlement

1. Bevezetés

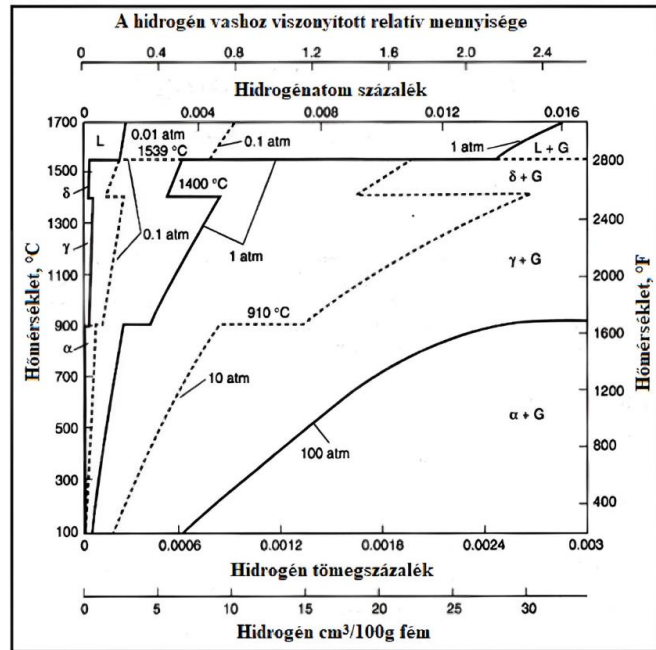
A hidrogén, mint energiahordozó szerepe, ezzel együtt az ipari jelentősége mind gazdasági, mind környezeti szempontból egyre fontosabbá válik az olaj- és a gázmezők rendelkezésre állásának csökkenése, a CO₂ kibocsátás csökkentésére vonatkozó törekvések, valamint a fenntarthatóság iránti igény növekedése miatt. A hidrogén csővezetéken történő szállítása több szempontból is ígéretes alternatívát jelent, különösen akkor, ha a meglévő földgázinfrastruktúra részben vagy egészben használható. A szakirodalom alapján három lehetséges megoldás van a hidrogén csővezetékben történő szállítására: a hidrogén földgázhoz történő hozzákeverése a meglévő rendszerben, a meglévő rendszer átalakítása tiszta hidrogén szállítására, illetve új, kifejezetten hidrogénszállításra tervezett vezetékhalózat kiépítése (Kovács et al., 2025). Függetlenül attól, hogy melyik megoldás valósul meg, alapvető kérdés, hogy a csővezeték anyagai és hegesztett kötéseik hogyan viselkednek a hidrogén jelenlétében. A hidrogén okozta károsodások és ridegedési hajlam vizsgálata során különböző mechanikai és fárasztó vizsgálatokat kell végezni, amelyek eredményei alapvető információt szolgáltatnak a csővezeték integritásának megítéléséhez hidrogén környezetben (Kovács et al., 2024). Tehát a hidrogén földgázhalózatba történő bevezetése előtt elengedhetetlen annak vizsgálata, hogy a meglévő infrastruktúra miként reagál a közegváltozásra. A vizsgálati megközelítések három fő csoportba sorolhatók: szakirodalmi források és korábbi kutatási eredmények feldolgozása; a hálózat csőanyagából vett próbatesteken végzett laboratóriumi anyagvizsgálatok; valamint teljes csőszakaszokra kiterjedő (full-scale) vizsgálatok, hidrogén nélkül és hidrogén alkalmazásával egyaránt (Lukács et al., 2024).

A hidrogénnel összefüggő anyagkárosodási jelenségek megértéséhez célszerű áttekinteni a hidrogén legfontosabb fizikai tulajdonságait, valamint az acélokra gyakorolt hatását. A hidrogén színtelen, szagtalan, igen gyúlékony gáz. A tiszta hidrogén-oxigén lángok ultraibolya fényt bocsátanak ki, és szabad szemmel szinte láthatatlanok. A hidrogén a földgáz fő alkotójánál a metánnál jóval kisebb méretű molekula és atomos formában szobahőmérsékleten is képes diffundálni az acélban. Növelt hőmérsékleten és nyomáson a diffúzió fokozott. A diffúzió oka az atomsugarak közötti különbségekre, illetve a hidrogén acélban való oldhatóságára vezethető vissza:

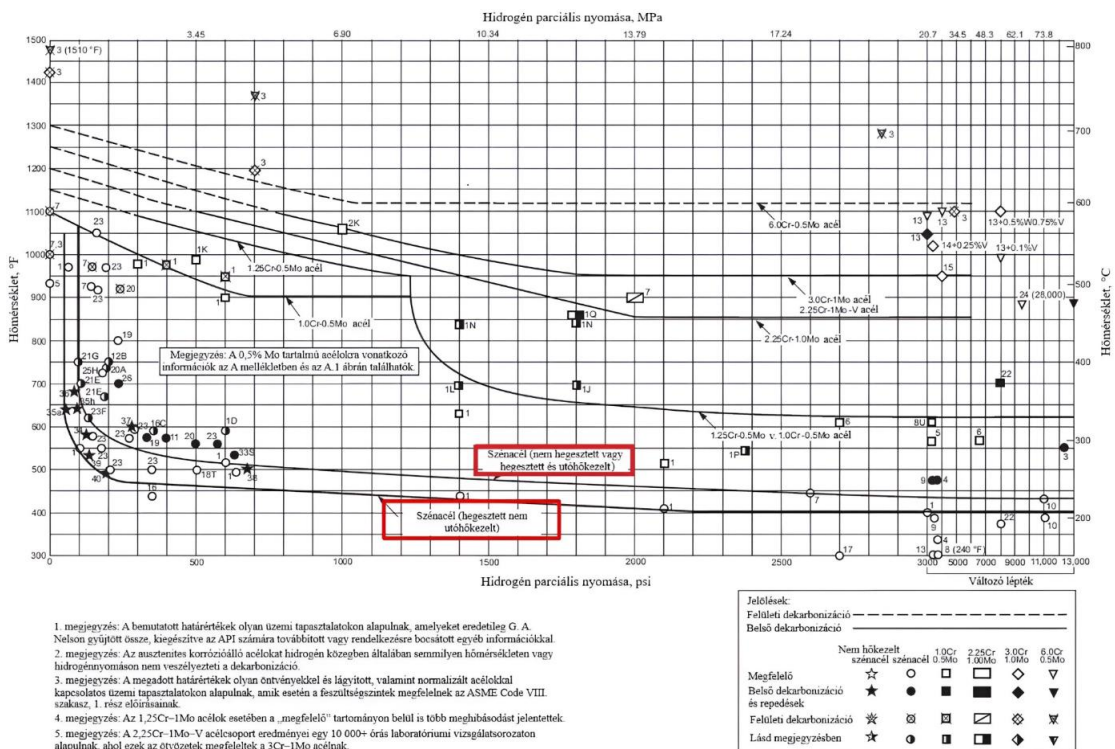
- hidrogén atomsugár: 25 pm,
- vas atomsugár: 140 pm,
- alumínium atomsugár: 143 pm.

Az acélban oldott hidrogén az acél ridegedését okozza, továbbá a repedésképződéshez is hozzájárul. Az előzőekből adódóan műszaki-biztonsági oldalról fokozott körültekintéssel kell eljárni a hidrogénátállással kapcsolatban. A hidrogén vasban való oldhatósága jelentős mértékben függ a hőmérséklettől (1. ábra). Továbbá az alábbi ábrán az is megfigyelhető, hogy a rozsdamentes acélokra (304, 316L) jellemző lapközepes (ausztenites) rács esetén nagyobb a hidrogénoldó képesség, mint a szénacélokra (S235, P355) jellemző térközepes rács esetén. Ugyanakkor az is megjegyzendő, hogy a hidrogén diffúziós tényezője a térközepes rácsban nagyobb, mint a lapközepes rácsban.

Szénacélokat régóta alkalmaznak hidrogénnyomásnak kitett környezeti feltételek esetén. Az API RP 941 előírásban szereplő Nelson diagram (API RP941, 2016) szolgál a növelt hőmérsékleten bekövetkező hidrogén okozta károsodási jelenség előrejelzésére az egyes szénacél anyagminőségek esetén (2. ábra). A diagram alapján a hidrogén okozta károsodással szemben legkevésbé ellenállóak az ötvöztelen szénacélok, ugyanakkor 200 °C-ig ezek az acélok is jól viselik a hidrogén közeget. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy a földgáz- és hidrogénszállító vezeték esetében az üzemi hőmérséklet jellemzően -20...+50 °C tartományba esik, amelyről konkrét információt nem szolgáltat a diagram.



1. ábra. A hidrogén oldhatósága a vasban a hőmérséklet függvényében (Kumar et al., 2013)



2. ábra. Nelson diagram (API RP 941, 2016)

Ebből következően célszerű lehet ebben a hőmérséklet tartományban vizsgálatokat folytatni a szénacélok hidrogén közegben történő viselkedéséről. Az ötvözetlen szénacélok tekintetében két változatot különböztet meg a diagram: nem hegesztett vagy hegesztett és utóhőkezelt; illetve hegesztett, de nem utóhőkezelt ötvözetlen szénacélt. Ebből arra lehet következtetni, hogy szénacéloknál a hegesztést követő utóhőkezelés alkalmazásával növelhető a hidrogénnel szembeni ellenállóképesség.

2. Hazai és nemzetközi ajánlások

Egy hazai földgázrendszer-üzemeltető által készített döntés-előkészítő vizsgálatban elemezték a 2 mól% hidrogéntartalmú földgázkeverék anyagokra gyakorolt hatásait. A tanulmány releváns megállapításai a következők: A kis szilárdságú, PED-harmonizált szénacélok (pl. P235, P355) és bizonyos ausztenites korrózióálló acélok (pl. 1.4401) általában jól viselik a legfeljebb 2 mól% H₂-t. Ugyanakkor az inhomogén összetételű – főként régebbi –, illetve nagyobb szilárdságú (pl. DX52, L485, P460) anyagok nyúlása jelentősen csökkenhet és hidrogén okozta ridegedés léphet fel, ami dinamikus igénybevétel esetén töréshez vezethet; ezen anyagok elterjedtségét fel kell mérni és célzott vizsgálatokkal kell értékelni a kockázatot. Az $R_{p0,2} \geq 500$ MPa szilárdságú anyagok ütőmunkája számottevően csökkenhet, ezért szigorúbb ellenőrzési protokoll (mintavétel, soron kívüli vizsgálat, szükség esetén nyomáskorlátozás) indokolt. A gázelegyben legfeljebb 2 mól% H₂ önmagában – az előbbi kivételektől eltekintve – rövid-középtávon nem növeli számottevően az ötvözetlen és enyhén ötvözött acél elemek károsodásának kockázatát. A katódos korrózióvédelem esetén a hidrogénes reakciók (az MSZ EN ISO 15589-1:2018 szabványban meghatározott) –1,2 V alatt léphetnek fel. Az ASTM szabványban szereplő egyes A-jelű anyagminőségek (A35B, A38B, A40B, A44B) ridegedésének kockázata jelentősen nőhet, ezért fokozott ellenőrzésük és – szükség szerint – cseréjük javasolt a földgázrendszerben. Összességében a fő szilárdsági jellemzők (például szakítószilárdság, folyáshatár, rugalmas alakváltozás) 2 mól% H₂ jelenlétében számottevő mértékben nem változnak (FGSZ, 2022).

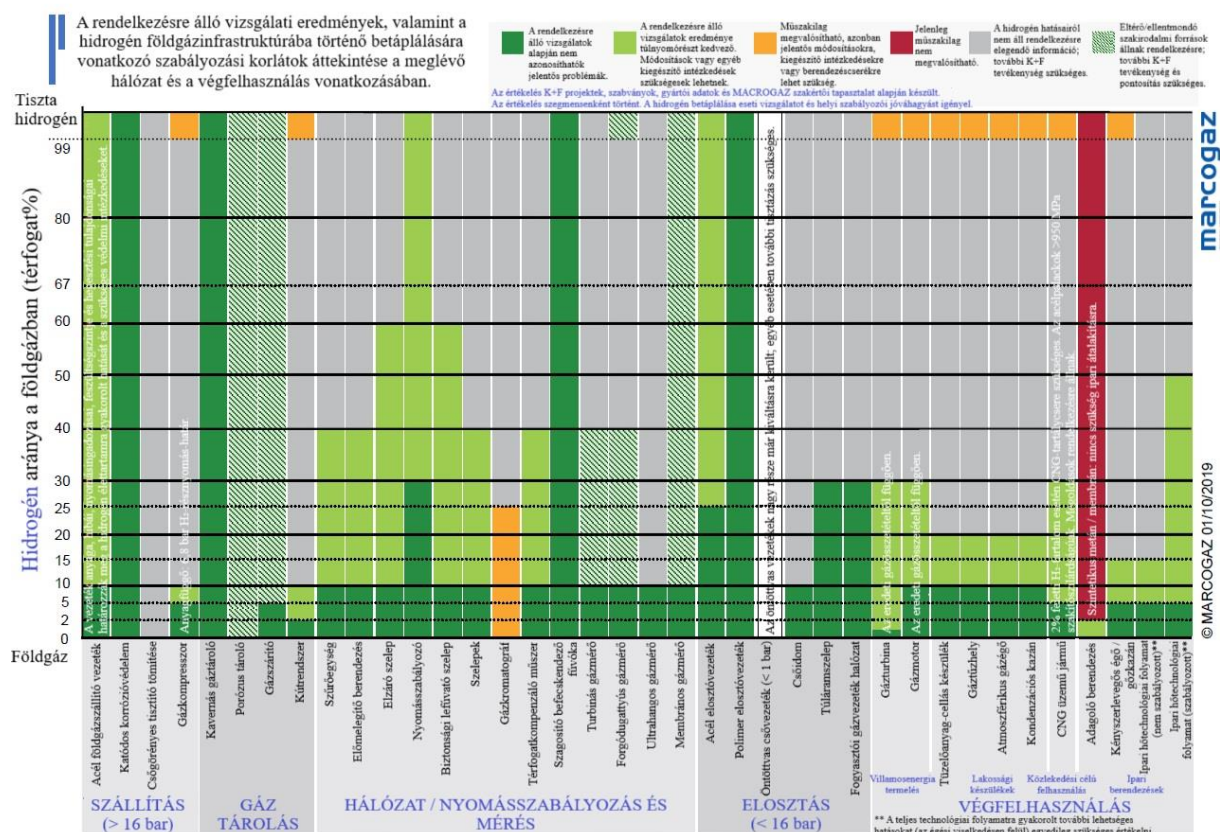
A hazai tanulmányokkal összhangban különböző nemzetközi ajánlások is foglalkoznak a hidrogénnel dúsított földgáz hatásaival a különböző anyagminőségekre. Példaként a 3. ábrán a Marcogaz-nak, azaz az európai gázipar műszaki szervezetének anyagminőségre vonatkozó ajánlásai láthatók összefoglaló jelleggel (Marcogaz, 2025).

Ez alapján 10% hidrogéntartalmú keverékig alapvetően a szénacél csővezetékek jól alkalmazhatók 16 bar nyomás felett a földgázszállításban, a rendelkezésre álló tanulmányok nem vetnek fel jelentősebb problémákat. 10% keverék felett az egyedi csővezetékeknél alkalmazott anyagminőségek, működési feltételek, az aktív repedésszerű hibák jelenléte, a nagyságrendi, frekvencia- vagy nyomásváltozások, feszültségszint és hegesztés miatti felkeményedés stb. meghatározzák a hidrogén lehetséges hatását az élettartamra és a szükséges intézkedésekre. Az elosztó rendszerben lévő 16 bar nyomás alatti szénacélok esetén egészen 25% hidrogéntartalmú keverékig nem vetnek fel érdemi problémákat az egyes tanulmányok (Marcogaz, 2025).

Az Amerikai Nemzeti Megújuló Energia Laboratórium által készített (Melaina et al., 2013) jelentésben szerepel, hogy a földgázhoz 5-15% hidrogén keverése működőképes megoldást jelenthet a megújuló energiahordozók növelése területén anélkül, hogy jelentősen növelné a gázkeverék végfelhasználói eszközökben való felhasználásával kapcsolatos kockázatokat (pl. háztartási gépek), vagy a meglévő földgázvezeték-hálózat tartósságát és épségét. Ugyanakkor a jelentés is kiemeli, hogy részletes vizsgálatokra van szükség a hidrogén bekeverés infrastruktúrára gyakorolt hatása területén.

A nemzetközi ajánlások és kutatási eredmények mellett az ipari gyakorlat is fontos támpontot ad a hidrogénnel kapcsolatos anyagválasztási szempontok megítéléséhez. Az ipari gázok előállításával és

forgalmazásával foglalkozó vállalatok az elmúlt évtizedek alatt jelentős tapasztalatokat halmoztak fel a hidrogén tárolása és szállítása területén. A hidrogén tárolására szolgáló palackok esetén már régóta tapasztalják, hogy a nagyszilárdságú acélok alkalmazása nem célszerű, mert hidrogén közegben rövid időn belül tönkremennek az ilyen palackok.



3. ábra. A Marcogaz összefoglalása a földgázhoz kevert hidrogéntartalom gázszállító rendszerek elemeire és fontosabb jellemzőire gyakorolt hatásáról, különböző vizsgálati eredmények alapján (Marcogaz, 2025)

Ezen cégek ajánlásai közül kiemelendő a Messer Hungarogáz Kft. ajánlása (Bándy, 2023), amely szakmai álláspontja alapján 200 °C hőmérséklet és 200 bar nyomás alatt szénacélok alkalmazhatók hidrogén tárolására és szállítására. Ugyanakkor 400 MPa folyáshatár feletti szilárdsági kategóriájú acélokat nem javasolnak hidrogénhez, továbbá a molibdénrel való ötvözés csökkenti a ridegedési hajlamot hidrogén közegben. Ugyanakkor a Messer is felhívja a figyelmet arra, hogy a hidrogén tárolására és szállítására kiépített nyomástartó rendszerekben fokozottan kell figyelni a kivitelezés (pl. hegesztés) minőségére. Törekedni kell arra, hogy a hegesztett kivitelű berendezésekben minél kisebbek legyenek a maradék feszültségek, továbbá az egyes szerkezeti elemeket terhelő feszültségek is viszonylag csekélyek legyenek a szelvényvastagsághoz képest (Bándy, 2023).

3. A hidrogén közeggel szembeni ellenállóképességet befolyásoló tényezők

A hidrogén közeggel szembeni ellenállóképesség szempontjából a vegyi összetételnek (ötvöző- és szennyezőtartalom), a gyártástechnológiának, és az előbbiekből eredő szövetszerkezetnek egyaránt hatása van. A földgázzállításra használt normalizált acélok finomszemcsés ferrit-perlites szövetszerkezetűek, amelyet normalizáló hőkezeléssel vagy normalizáló hengerléssel állítanak elő. A finomszemcsés szerkezet kedvezően hat a szilárdsági és szívóssági jellemzőkre, ugyanakkor az egységnyi térfogatra vetített nagy szemcsehatárfelület és a két fázis közötti fázishatár egyaránt növeli a lehetséges hidrogéncsapdák számát. A termomechanikusan kezelt acélok is finomszemcsés, ráadásul a normalizált acélokhöz képest rendszerint kisebb a szemcsék mérete. Ennek oka, hogy ezeknél az acéloknál a hagyományos meleghengerléshez képest kisebb hengerlési hőmérsékleten történik a hengerlés. Az alakítóhengerek között áthaladó lemez elnyújtott ausztenit szemcséi a hengerek közül kilépve hirtelen túlhűtötté válnak, amelyek eredményeként rendkívül sok kristályosodási csírán indul meg a kristályosodás, ezáltal eredményezve nagyon finom szemcseszerkezetet. Ennek az acélcsoportnak az előnye, hogy a normalizált acélokhöz képest kevesebb (gyakran fele annyi) karbont tartalmaznak, amely kedvező a szívósság szempontjából és a hidrogén okozta ridegedés tekintetében is. Ezen acélokra ferrit-bénites szövetszerkezet jellemző, amelyek külön-külön is szívós szövetelemnek tekinthetők. A szénacélok hidrogén szállítására, illetve tárolására vonatkozó alkalmasságának szempontjából meghatározó szerepe van a szennyezőtartalomnak. A kén és a foszfor növeli a ridegedési hajlamot, ezért minél kisebb szennyezőtartalmú ($S < 0,015\%$, $P < 0,025\%$) acélt javasolt ilyen feladathoz választani. Az acélok jelölésében lévő kiegészítő jelek közül az L1/L2 az alacsony hőmérsékletű alkalmazásokra szánt acélokat jelöli. Bár a földgázz szállító rendszerek üzemi hőmérséklete nem indokolná, de az ilyen acélok szennyezőtartalmára vonatkozó szigorúbb előírások miatt célszerű lehet ilyen acélokat használni.

Megfelelő szénacél kiválasztásakor figyelemmel kell lenni a szilárdsági kategóriára, mivel a hidrogén közegben történő üzemelés bizonyítottan csökkenti az alakváltozási jellemzőket, fajlagos nyúlást (A) és a kontrakciót (Z). Mivel a szilárdsági kategória növelésével csökkennek ezek az alakváltozási jellemzők, hidrogén közeg esetén célszerűbb kisebb szilárdságú acélokat választani, amelyeknek nagyobb a fajlagos nyúlásuk és a kontrakciójuk. Az Egyesült Királyság földgázz szállító rendszerével és a hidrogénátállással foglalkozó cikkben a szerzők kiemelik, hogy nagy nyomáson a nagyszilárdságú acélok nem alkalmazhatók hidrogén környezetben, mivel fokozottan hajlamosak a ridegedésre (Dodds et al., 2013). Egy másik tanulmány (Wang et al., 2022) összefoglalójában szerepel, hogy több hidrogénszállítással foglalkozó projekt igazolta, hogy 30 és 50 bar közötti hidrogén nyomáson az AP 5L Grade B/X42/X52 (nem azonos Dx52-vel!) kis karbontartalmú, nagy alakváltozóképeségű acélok alkalmazhatóak. Hegesztési vizsgálatok és kapcsolódó hibaelemzések kimutatták, hogy a hegesztési varratok fokozottan hajlamosak a hidrogén okozta károsodásra, mivel inhomogén a mikroszerkezetük és a keménységeloszlásuk, maradó húzófeszültségek vannak bennük és a hegesztés közben keletkező eltérések, anyagfolytonossági hibák lokális hidrogén-felhalmozódást okozhatnak. A hegesztési varratok hidrogénállóságának javítása továbbra is egy fontos kérdés a jövőre nézve (Wang et al., 2022).

A hidrogén okozta ridegedést szénacélok esetén számos tényező befolyásolja (Ohaeri et al., 2018):

- szövetszerkezet,
- mechanikai tulajdonságok,
- szemcsehatár jellemzői,
- kristályszerkezeti orientáció,
- zárványok és kiválások,

- mikroötvöző elemek,
- hőmérséklet.

A szénacél alapanyagok és hegesztett kötések szövetszerkezetében ferrit, perlit, bénit, martenzit és maradék ausztenit egyaránt előfordulhat az acél típusától, és az alkalmazott hegesztéstechnológiától függően. A szövetszerkezet típusa alapvetően befolyásolja az acél ridegségét, illetve ridegedési hajlamát. Alapvetően a ferrit-bénit tartalmú szövet szívósabb szerkezetet eredményez. A szövetszerkezetben kiválások is megjelenhetnek, amelyek szintén hidrogéncsapdaként szolgálnak, ugyanakkor fontos szerepük van a szemcseméret és a szívóssági jellemzők befolyásolásában. Jogosan vetődik fel a kérdés, hogy egy finomabb szemcse-, illetve szubszemcse-szerkezettel rendelkező, apró kiválásokat tartalmazó szövetszerkezet, amelyben számos hidrogéncsapda található, tekinthető ellenállóbbnak a hidrogén okozta ridegedéssel szemben, vagy pedig egy olyan szerkezet, amelyben kevesebb akadálya van a hidrogén diffúziójának. Azok a szénacélok, amelyekben kevesebb az akadálya, illetve a hidrogéncsapda, jellemzően ridegebbek, illetve kevésbé ellenállóak a repedések megjelenésével és terjedésével szemben. Nyilvánvalóan a hidrogén alkalmazások tekintetében ezért is célszerű egyfázisú ausztenites rozsdamentes acélokat alkalmazni (amennyiben a költségvetés megengedi), mivel azok mindig szívósak, nincs átmeneti hőmérsékletük, homogén a szövetszerkezetük, ezért kevés hidrogéncsapdát tartalmaznak.

A bénites és tús (hegyes) ferrites szerkezetű csővezeték acélok viszonylag ellenállóak a hidrogén okozta károsodással szemben. A maradék ausztenit jelenléte kedvező a hidegrepedési veszély csökkentése szempontjából a cementit tartalmú szövetszerkezetéhez képest. A (Ohaeri et al., 2018) cikkben hivatkozott tanulmányokban szerepel, hogy a sávós ferrit-perlites szövet fokozza a hidrogénhólyagosodásra való hajlamot. A szövetszerkezet hidegrepedéssel szembeni ellenállóképessége szempontjából a mikroszerkezeti szegregációs folyamatoknak is fontos szerepük van. A repedésterjedés gyakran a nagyobb keménységű perlit mentén következik be. A legkedvezőtlenebbnek tartott martenzit tartalmú szövetszerkezet egyértelműen növeli a hidrogén okozta károsodás veszélyét csővezeték acéloknál. A martenzites szövetszerkezetben sok interstíciós szénatom reked a kristályrácsban, ezáltal elősegítve a „hidrogéntámadást”. Továbbá, a martenzit lécek között elhelyezkedő ausztenit és karbid elősegíti a hidrogén diffúzióját. Mind a karbon szemcsehatármenti szegregációja, mind a martenzitre jellemző nagy rácsfeszültség fokozza a hidrogén okozta károsodás veszélyét (Ohaeri et al., 2018).

A tús (hegyes) ferrit és a bénit jelenléte kedvező az acélban a szemcsefinomodás, a szilárdságnövelés és a növekvő diszlokációsűrűség szempontjából. Ezek a tényezők kedvezőek a kiváló szívóssági tulajdonságok elérése szempontjából. Ugyanakkor a nagyobb szilárdság gyakran növeli a hidrogén okozta ridegedés kockázatát. A bénites szövetszerkezetű csővezeték acéloknál általában kedvező mechanikai tulajdonságaik vannak, ugyanakkor a hidrogén okozta károsodási jelenség a nagy szilárdság miatt fokozottan jelentkezhet ezeknél az acéloknál. A hidrogén okozta károsodás az alakváltozóképeség csökkenésében nyilvánul meg, amelyet leginkább a kontrakció csökkenésében lehet kimutatni. Kimutatták, hogy a nagyobb szilárdságú csővezeték acéloknál a hidrogén nagyobb mértékű ridegedést okoz (Ohaeri et al., 2018). A tús (hegyes) ferritre és a bénitre jellemző kedvező szövetszerkezeti sajátosságok, és a kis karbontartalom viszont kedvező a hidrogén okozta ridegedés szempontjából.

Tekintettel arra, hogy a hidrogénatomok a szemcsehatárok mentén torlódnak fel, az acélfejlesztők kiemelt figyelmet fordítanak olyan szemcseszerkezet kialakítására, amely csökkenti a hidrogén okozta károsodás kockázatát. A termomechanikus hengerlés növeli a kisszőgű szemcsehatárok mennyiségét, amely a szövetszerkezetet kevésbé hajlamossá teszi a „hidrogéntámadásra”. Ezért hidrogén alkalmazásra szánt csővezeték acéloknál kedvező, ha a mikroszerkezetben a kisszőgű szemcsehatárok dominálnak. Kimutatták, hogy a meleghengerlés után kialakuló egyenlőtlen mikroszerkezet ellenére a

csővezeték acél felületével párhuzamos, $\langle 110 \rangle$ és a $\langle 111 \rangle$ kristálytani síkokat tartalmazó szemcsék közötti határok ellenállóak a hidrogén okozta károsodással szemben (Ohaeri et al., 2018). Azonban fontos megjegyezni, hogy a napjainkban forgalomban lévő legtöbb csővezeték acélra véletlenszerű és nem homogén szemcseorientáció jellemző. Ráadásul a hegesztési varratban és a hőhatásövezetben az alapanyaghoz képest jelentős változáson megy keresztül a szemcse szerkezet.

Az acélban lévő nemfémes zárványok és kiválások hozzájárulnak a „hidrogéntámadáshoz” azáltal, hogy elősegítik az atomos hidrogén feltorlódását. Továbbá a kiválások általában keményebbek az acélnál, és gyakran inkohere ns fázishatárak van az acél mátrixszal, ezáltal hozzájárulnak a hidrogéncsapdák kialakulásához. Az alpmátrixszal nagyobb koherenciát mutató kiválások jelenléte hozzájárul a repedéssel szembeni ellenállóképesség növeléséhez. A zárványok és az alpmátrix közötti apró üregek szintén hidrogéncsapdaként szolgálhatnak. Továbbá az elnyújtott zárványok esetén a hidrogénatomok a zárványok szélein dúsulnak fel, ahol nagyobb a feszültségkoncentráció (Ohaeri et al., 2018).

A nitrid és a karbidképző elemek, mint a Mo, V, Nb, Cr és a Ti csökkentik a hidrogén diffúzióját azáltal, hogy a segítségével kiválások jönnek létre a szövetszerkezetben, ugyanakkor elősegítik a repedéssel szemben ellenálló, kedvező szilárdságú szövetszerkezet kialakulását.

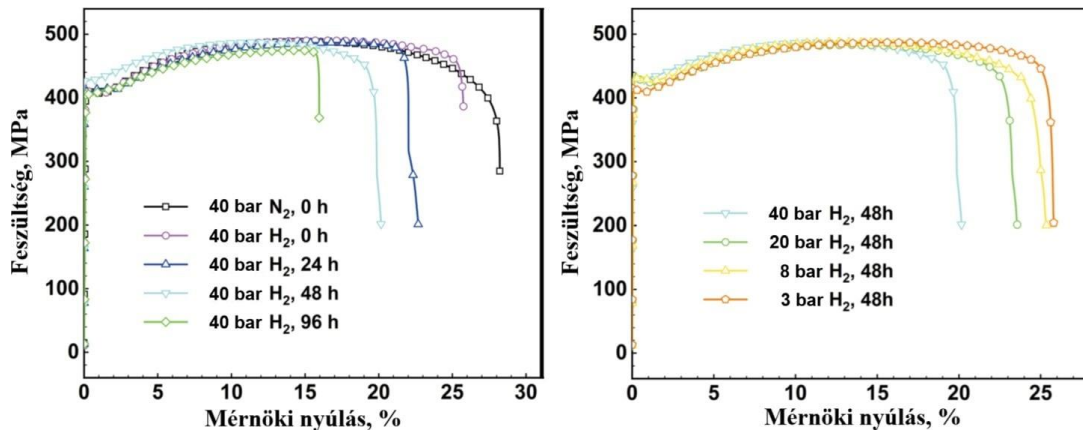
Az előzőekben ismertetett összefüggések alapján megállapítható, hogy hidrogén közegben történő alkalmazások esetén célszerű olyan szénacélokat használni, amelyeket kifejezetten hidrogénalkalmazásokra fejlesztettek ki (Triton Alloys Inc., 2025; Vöestalpine, 2025).

4. Anyagjellemzők változása hidrogén közeg hatására

A (Cai et al., 2022) tanulmányban kísérleti úton vizsgálták az X42, X52, X70 és AISI 1020 anyagminőségek esetén a hidrogén okozta ridegedés jellemzőit és mechanizmusát. A hidrogén közegben elvégzett kis nyúlási sebességű szakítóvizsgálatok eredményei alapján az AISI 1020 anyagminőség mutatta a legnagyobb ridegedési hajlamot. Az X70 és az X42 bizonyult a legkevésbé hajlamosnak a ridegedésre. Az elvégzett TDS (Total Dissolved Solids) vizsgálatok segítségével kimutatták, hogy a karbon és a magántartalomnak jelentős hatása van a hidrogénoldó képességre. A cikkben egy egyszerű módszert javasoltak a szénhidrogén-hidrogén szállító csővezeték kiválasztására és értékelésére. Véleményük szerint ilyen acéloknál célszerű, ha a karbontartalom nem haladja meg a 0,13%-ot, a kéntartalom a 0,00068%-ot, a mangántartalom pedig az 1,06%-ot. Továbbá megjegyzik, hogy a martenzites acélok nem alkalmazandók ilyen csővezetékekhez. Ferrites acélok esetén a hidrogén okozta ridegedést a szemcseméret is befolyásolja, amelynek maximálisan megengedett értékére 35 μm -t adnak meg.

Egy másik tanulmányban (Davani et al., 2018) a szövetszerkezet mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgálták X65 csővezeték acélnál hidrogén jelenlétében. A hidrogénnel való feltöltés eredményeként az alapanyag keménysége 10%-kal, a folyáshatára 5%-kal, a hőhatásövezet keménysége 13%-kal, a folyáshatára 7%-kal növekedett. A fajlagos nyúlás értéke 32-70% közötti mértékben csökkent, a szívós töret aránya pedig 46%-kal lett kisebb, amely arra utal, hogy hidrogén jelenlétében a próbatestek ridegen törnek. A vizsgálatok alapján a réteges ferrit-perlites szövetszerkezet nagyobb érzékenységet mutatott a hidrogénnel összefüggésbe hozható hibák kialakulására, mint a hőhatásövezet tús ferritet és kemény fázisokat tartalmazó mikroszerkezete. Abban a mintában volt a legnagyobb a diffúzióképes hidrogéntartalom, és ebből adódóan a hidrogénhibák mennyisége, amelynek a szemcsemérete kisebb volt (a nagyobb szemcsehatár felület miatt).

A (Wan et al., 2023) tanulmányban az X52 acél hidrogén okozta ridegedési hajlamát vizsgálták különböző hidrogén töltési idő és nyomásviszony esetén csőpróbateteknél. Mind a töltési idő, mind a nyomás jelentős hatással van az X52 acél ridegedésére. A hidrogén okozta ridegedési hajlam növekedett a hidrogéntöltési idővel, 45,86%-ot ért el 96 óra alatt 4 MPa (40 bar) töltési nyomáson (4. ábra). A ridegedési jelenség a próbatetek töretfelületén is igazolást nyert.

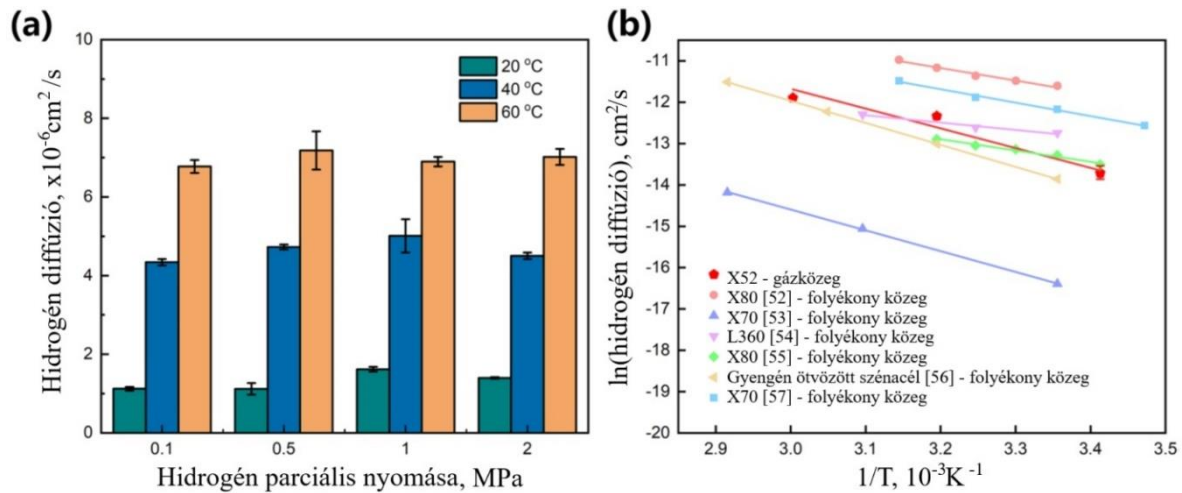


4. ábra. Szakítóvizsgálat során meghatározott feszültség – mérnöki nyúlás diagramok cső próbateteknél különböző hidrogéntöltési idő és töltési nyomás esetén (Wan et al., 2023)

A hidrogénnel kevert földgázvezetékeknek az üzemi hőmérséklet hatással van a hidrogén és a csővezeték acélja közötti kölcsönhatásra, így befolyásolva a hidrogén ridegedés kockázatát (Xu et al., 2024). Az X52 anyagminőségen különböző hőmérsékleten elvégzett vizsgálatok azt igazolták, hogy 20-60 °C hőmérséklettartományban a hidrogén diffúziója jelentős mértékben megnövekszik. A felület alatti hidrogéntartalom ugyanakkor csökkent, mivel a hidrogén diffúziója a vizsgált hőmérséklet intervallumban gyorsabb ütemben nőtt, mint a hidrogén abszorpciója a felületen. A töretfelület vizsgálatok alapján a hőmérséklet növekedésével az X52 acél nagyobb hidrogén okozta ridegedést mutatott, mivel 60 °C hőmérsékleten nagyobb mennyiségű hidrogén került csapdába (5. ábra).

A ferrites szénacélok hidrogén közegekre való alkalmasságát összefoglaló jelentésben (Sommerday, 2010) számos acélminőség szerepel. A dokumentum első része az egyes acélminőségek hidrogénáteresztő képességét, a hidrogén diffúzióját és a hidrogén oldhatóságát tárgyalja. Az áteresztő képesség a vizsgált acélok tekintetében a karbontartalom növekedésével csökken. A hidrogénoldó képességgel kapcsolatban hasonló tendencia figyelhető meg, azaz a karbontartalom növelésével csökken a hidrogénoldó képesség. Az elvégzett vizsgálatok alapján a normalizált szövetszerkezet nagyobb hidrogénoldó képesség jellemzi, mint a nemesített szerkezetet. Az acélokon elvégzett normál szakítóvizsgálati eredmények alapján a nagy nyomású hidrogén közeg csökkenti a kontrakciót, ugyanakkor nincs káros hatása a szakítószilárdságra. A kontrakció csökkenése hidrogéngázban figyelemre méltó, a legtöbb érték 35% és 47% közötti értékre adódott, függetlenül a hidrogéngáz nyomásától. Az 1. táblázat az X52 acélon hidrogén közegben elvégzett szakítóvizsgálatok eredményeit mutatja. Az adatokból látható, hogy a szilárdsági jellemzők minimálisan változnak a vizsgált nyomáson, az alakváltozási jellemzők közül pedig a kontrakció nagyobb arányban csökken, mint a fajlagos nyúlás. Miközben sima szakítópróbatest esetén a szakítószilárdságot érdemben nem befolyásolja a hidrogén

közeg, addig bemetszett próbatestnél egyértelműen kimutatható a hidrogén közeg szakítószilárdságra gyakorolt káros hatása.



5. ábra. (a) A hidrogén diffúziója különböző hőmérsékleten és parciális nyomás esetén (X52 acél) (b) kapcsolat a hidrogén diffúziója és a hőmérséklet között (Xu et al., 2024)

1. táblázat. Hidrogén közegben végzett szakítóvizsgálati eredmények X52 acél esetén (Somerdar, 2010)

Próbatest	Környezet	Nyúlási sebesség s^{-1}	R_y MPa	R_m MPa	A %	Z %
sima	Levegő	3×10^{-4}	414	609	19	60
sima	6,9 MPa (69 bar) H_2	3×10^{-4}	429	597	15	37
bemetszett	Levegő	$8,5 \times 10^{-3}$	414	818	-	15
bemetszett	6,9 MPa (69 bar) H_2	$8,5 \times 10^{-3}$	429	707	-	7

A szénacélok törési szívóssága és repedéssel szembeni ellenállása is kisebb hidrogén közegben a levegőhöz, vagy semleges gázhoz képest (Somerdar, 2010). A törési szívósság értéke akár 50%-kal is csökken hidrogéngázban 6,9 MPa (69 bar) nyomás alatt, ugyanakkor abszolút értéken még így is viszonylag magas, 100 MPam^{1/2} értékhez közeli eredmények adódnak. A hidrogén közeg a repedésterjedéssel szembeni ellenállást még intenzívebben, akár 90%-kal is csökkenti. A 2. táblázatban a hidrogén közeg X42 anyagminőségre gyakorolt hatását ismertetjük. A táblázatban szereplő jelölések: K_{Ic} - törési szívósság, K_{IH} - hidrogén okozta repedésérzékenység küszöbértéke, dJ/da - repedésterjedéssel szembeni ellenállás mértéke.

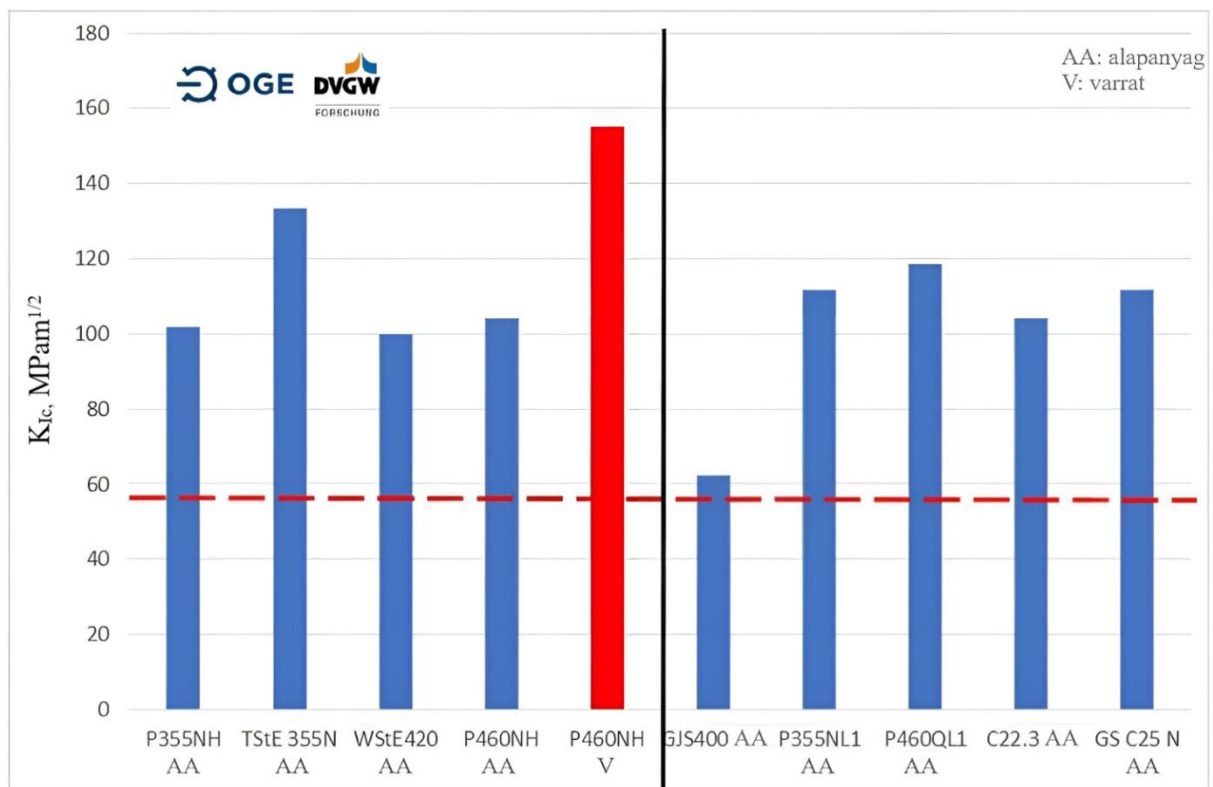
2. táblázat. Hidrogén közegben végzett törésmechanikai vizsgálatok eredményei X42 acél esetén (Somerdag, 2010)

R_y MPa	Z %	Környezet	Elmozdulási sebesség mm/s	K_{Ic} MPam^{1/2}	K_{IH} MPam^{1/2}	dJ/da MPa
366	56	6,9 MPa (69 bar) N ₂	2,5x10 ⁻⁴ -	178	107	70
		6,9 MPa (69 bar) H ₂	2,5x10 ⁻³			63
280	58	Levegő	≤ 3,3x10 ⁻⁴	147	101-128	111
		2 MPa (20 bar) H ₂		85		36
		4 MPa (40 bar) H ₂		69	31	
		6,5 MPa (65 bar) H ₂		73		
		7 MPa (70 bar) H ₂		59		
		8 MPa (80 bar) H ₂		53		
		10 MPa (100 bar) H ₂		57		
		12,2 MPa (122 bar) H ₂		46		

A DVGW nemzetközi projekt (Steiner et al., 2023) keretében számos szénacél alapanyagot és hegesztett kötést vizsgáltak meg hidrogén környezetben. A projekt elsődleges célja az ASME B31.12 előírásban (ASME B31.12) kifejezetten a hidrogén közegre megjelölt törésmechanikai paraméterek alkalmazhatóságának vizsgálata volt a német nagynyomású gázvezeték-hálózatban szereplő csőanyagokra. Ebből a célból fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokat végeztek reprezentatív módon kiválasztott különböző korú és szilárdságú csővezeték-acélminőségeken, és a kapott eredményeket összehasonlították az ASME B31.12 előírásban szereplő követelményekkel. Az összehasonlítás azt mutatta, hogy jelentős egyezés van – mennyiségi értelemben is – az ASME által meghatározott repedésterjedési összefüggések és a projektben megállapított repedésterjedési összefüggések között. A mechanikai tulajdonságok változását törésmechanikai vizsgálatok segítségével elemezték. A fáradásos repedésterjedési sebességvizsgálatok során hidrogénnyomásnak tették ki a próbatesteket, amelynek maximális értéke 100 bar volt. A jelentés készítőinek véleménye alapján a vizsgált anyagminőségek alapvetően alkalmazhatók hidrogén atmoszférában. A törési szívósság értékei, valamint a repedésterjedési viselkedés még hidrogén környezetben is jellemzően meghaladta a szabványos követelményeket. Alacsonyabb nyomás és kisebb feszültség szintek esetén a repedésterjedés a levegő atmoszférához hasonlóan következett be. Az ASME B31.12 előírással összehasonlítva a projekt keretében elvégzett vizsgálatok során a repedésterjedési sebesség jellemzően nagyobbak adódtak a kisebb feszültségintenzitási értékeknél, és kisebbnek a nagyobb feszültségintenzitási értékeknél. Az ASME előírásban szereplő összefüggésekkel összehasonlítva az élettartam előrejelzésére a projektben megalkotott összefüggések tartalmazzák a hidrogén nyomását és a közepes feszültség szintet (R érték), ezáltal még pontosabb élettartam előrejelzések adhatók. A repedésterjedési viselkedéshez kapcsolódóan a törési szívósság értékét is meghatározták a projekt keretében, amely minden csővezeték acél esetén nagyobb volt (sok esetben jelentősen) az ASME B31.12 szabványban szereplő értéknél. Ez is azt támasztja alá, hogy ezek az anyagminőségek alkalmasak a hidrogén szállítására. A projekt összefoglaló jelentésében szerepel, hogy az adatok további elemzésére van

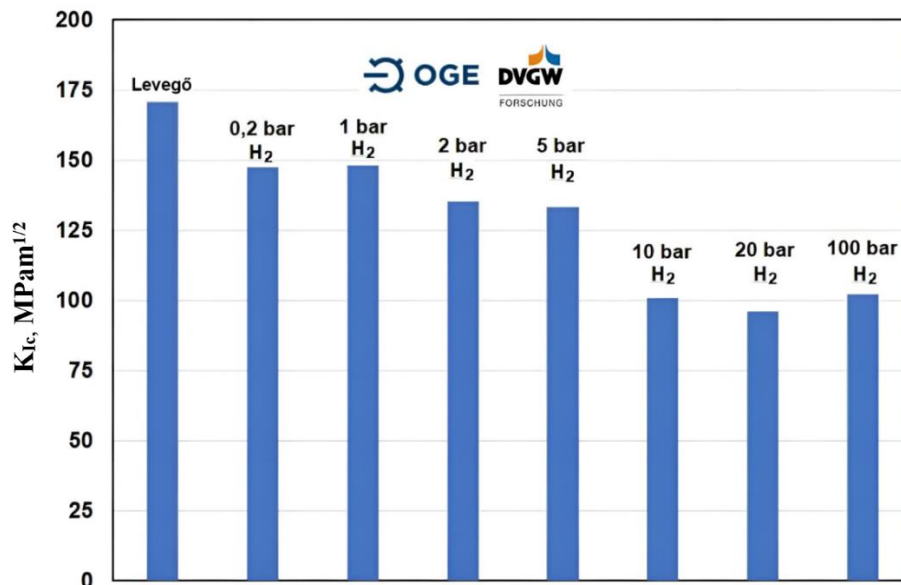
szükség abban az irányban, hogy az életkor, a szilárdsági szint, a foszfor és a kéntartalom, valamint a karbonegyénérték hogyan befolyásolja a vizsgált anyagminőségek törésmechanikai jellemzőit.

Csővezeték anyagok és nyomástartó edényekben alkalmazott szelepanyagok törési szívósság értékeit 100 bar H₂ nyomásnak kitett terhelésre a 6. ábra szemlélteti. A diagramból látható, hogy a nyomástartó edényekhez használt csővezeték acélok törési szívósság értékei meghaladják az előírás követelményét ($K_{Ic}=55 \text{ MPam}^{1/2}$). Az is látható, hogy az alacsony hőmérsékletre szánt L1 kiegészítő jellel rendelkező acél (P355NL1) értéke nagyobb, mint a növelt alkalmazási hőmérsékletre szánt P355NH acél törési szívóssága.



6. ábra. Csővezeték- és szelepanyagok törési szívósság értékei, $p_{H_2}=100 \text{ bar}$ (Steiner et al., 2023)

Az elvégzett vizsgálatok azt is kimutatták, hogy az egyes acélminőségek esetén a törési szívósság értéke a hidrogén nyomásának növelésével csökkent. Példaként a 7. ábrán látható, hogy az St35 anyagminőség esetén hogyan változik a törési szívósság értéke a hidrogén nyomásának függvényében. A diagram alapján 10 bar nyomás esetén a törési szívósság mintegy 40%-kal csökken. Ugyanakkor a nyomás további növelése már nem eredményezi a K_{Ic} érték csökkenését. L485 alapanyag és hegesztett kötése esetén a törési szívósság értékei a 3. táblázatban láthatók.



7. ábra. A törési szívósság változása St35 anyagminőségnél a hidrogén nyomásának függvényében (Steiner et al., 2023)

3. táblázat. Hidrogén közegben végzett törésmechanikai vizsgálatok eredményei X42 acél esetén

Méret	Alapanyag/varrat	K _{Ic} . MPam ^{1/2}
d=1200 mm, t=23 mm	alapanyag	134,2
	varrat	129,8
	hőhatásövezet	92,4
d=1016 mm, t=16,8	alapanyag	124,3
	alapanyag (0,2 bar)	203,2
	alapanyag (1 bar)	198,6
	alapanyag (2 bar)	186,7
	alapanyag (5 bar)	173,9
	alapanyag (10 bar)	175,8
	alapanyag (20 bar)	163,6
	varrat	146,5
	körvarrat	100,8
	körvarrat (keményedett)	74,4
	körvarrat hőhatásövezet	67,9

5. Hidrogén alkalmazásokra szánt szénacélok

A hidrogénszállításra és tárolásra vonatkozó növekvő piaci igényekre reagálva az acélgyártó vállalatok napjainkban már olyan célzott szénacélokat kínálnak, amelyek ellenállóbbak a hidrogén okozta

ridegédéssel szemben. A Vöestalpine H2fit basic, H2fit classic és H2fit severe kategóriában kínál hidrogénnel szemben ellenálló szénacélokat (8. ábra) (Vöestalpine, 2025).

A H2fit basic lemezeket nagyon alacsony foszfor- és kéntartalom jellemzi. A korszerű acélgártási folyamatnak és az intenzív vákuumos kezelésnek köszönhetően ezeknek a szennyezőknek a mennyisége minimálisra csökkenthető. A fejlett öntési technológiából adódóan a szelvényméretek középső részén előforduló szegregáció minimálisra csökkenthető. Ezek a lemezek jellemzően alacsony nyomáson és alacsony hőmérsékleten alkalmazhatók tiszta H₂ környezetben, például átmeneti vagy elosztó csővezetékben vagy nagyméretű H₂ tároló tartályokban.

A H2fit classic lemezek kiemelkedően ellenállóak a hidrogén okozta repedésekkel (HIC) szemben. Nagyon kis szennyezőtartalom jellemzi ezeket az acélokat, amelyek speciális kezeléssel esnek át az acélüzemben, ahol kalcium-szilícium huzallal kezelik át az ömledéket így szabályozva a zárvány alakját. Az ilyen acéllemezek klasszikus alkalmazási területét jelentik a hidrogén puffertartályok, oszlopok és csövek közepes nyomáson és hőmérsékleten, valamint savas közegben.

A H2fit severe lemezek alkalmazása olyan fokozott üzemi körülmények esetén indokolt, mint a magas hőmérséklet és nyomás, valamint a savas és korrozív környezet. A hidrogén okozta repedéssel szemben ellenálló acélminőség, valamint a rozsdamentes acél borítású réteg kombinációja még olyan alkalmazásokat is lehetővé tesz, mint a reaktorok vagy csővezetékek a H₂ feldolgozóiparban.

	H2fit basic	H2fit classic			H2fit severe	
		HIC 3. osztály CLR 15	HIC 2. osztály CLR 10	HIC 1. osztály CLR 5	Borítás	Borítás + HIC
	Alacsony nyomás				Magas nyomás	
	Alacsony hőmérséklet				Magas hőmérséklet	
Alacsony szennyezőtartalom	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vákuumos gáztalanítás	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dinamikus képlékenyalakítás	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Korrózióállóság					✓	✓
HIC állóság		✓	✓	✓		✓
Felhasználási terület	Csővezetékek, tartályok, tiszta H ₂ közeget tartalmazó berendezések	Csővezetékek, puffertartályok, tiszta H ₂ közeget tartalmazó berendezések	Csővezetékek, puffertartályok, tiszta H ₂ közeget tartalmazó berendezések	Csővezetékek, puffertartályok, tiszta H ₂ közeget tartalmazó berendezések	Csővezetékek, reaktorok, tiszta H ₂ közeget tartalmazó berendezések	Csővezetékek, reaktorok, tiszta H ₂ közeget tartalmazó berendezések

8. ábra. A Vöestalpine H2fit acélsalád típusai, jellemzői és felhasználási területe (Vöestalpine, 2025)

A H2fit acéltípusai a következők:

- H2fit basic: P235-P690
- H2fit classic: P235-P460
- H2fit severe Clad: P235-P690 + rozsdamentes acél (304 / 316 / 317)
- H2fit severe Clad + HIC: P235-P460 + rozsdamentes acél (304 / 316 / 317)

A Triton hidrogén okozta repedéssel szemben ellenálló acéljai vegyi összetételüknek köszönhetően a korrózióval szemben fokozottan ellenállóak, mivel feszültséggel terhelt rendszerekhez tervezték őket (Triton Alloys Inc., 2025).

Ezeket az acélokat speciális vizsgálatoknak (pl. hidrogén okozta repedési hajlam vizsgálat) vetik alá abból a célból, hogy a nagy hidrogéntartalmú, savas közegnek is ellenálljanak. Ezek az acélok olyan nyomástartóedény rendszerekben alkalmazhatók, amelyeknél a szulfidok parciális nyomása nagyobb, mint 3,5 mbar. Az acélgártás során foszfortalanítást, kéntelenítést, valamint vákuumos kezelést alkalmaznak a hidrogén okozta ridegédéssel szembeni ellenállás növelése érdekében. Ezen acélok főbb jellemzői:

- Méretek:
 - lemezvastagság: 6-200 mm,
 - szélesség: 4000 mm-ig,
 - hosszúság: 12 méterig,
 - Anyagminőség: A516, SA516 Gr 60, GR 65, Gr 70 (pl. P265GH, P295GH);
 - Műszaki követelmények: nagy szilárdsági és szívóssági követelmények, vastagság irányú teljesítmény követelmények;
 - Ütővizsgálat -52 °C -on történik;
 - Alaplemez: tűzímártó horganyozással bevont, hidegen hengerelt vékonylemez;
 - Szállítási mód: kemencében normalizált, hegesztési utóhőkezelt (szimulált), hengerelt, vákuummal kezelt, normalizálva hengerelt (igény szerint);
 - Gyártási mód: melegen hengerelt.
- Alkalmazási területek: nyomástartó edények, finomítók, olaj és földgáz csővezetékek.

6. Összefoglalás

Tekintettel arra, hogy a meglévő földgázszállító hálózatok döntő hányada szénacél csővezetékekből épül fel, a hidrogénes alkalmazások esetén elsődlegesen ezen acélok alkalmasságának vizsgálata indokolt. A szénacél csővezetékek alkalmazása mellett szól az is, hogy a hidrogén bevezetése a földgázhálózatokba várhatóan fokozatosan valósul majd meg. A jelenlegi nemzetközi irányelvek és tervek alapján első lépésként jellemzően néhány százalék hidrogén bekeverése a cél. A nemzetközi szakirodalom alapján a szénacélok még 16 bar nyomás feletti rendszerekben is egészen 10% hidrogéntartalmú földgáz keverékig is jól ellenállnak a hidrogén okozta ridegedéssel szemben. 10% keverék felett az egyedi csővezetékeknél alkalmazott anyagminőségek, működési feltételek, az aktív repedésszerű hibák jelenléte, a frekvencia- vagy nyomásváltozások, feszültség szint és hegesztés miatti felkeményedés stb. meghatározzák a hidrogén élettartamra gyakorolt lehetséges hatását és a szükséges intézkedéseket. Az elosztó rendszerben lévő 16 bar nyomás alatti szénacélok esetén egészen 25% hidrogéntartalmú keverékig nem vetnek fel érdemi problémákat az egyes tanulmányok. Nemzetközi kutatások során törésmechanikai vizsgálatokkal igazolták, hogy például a németországi csővezetékekben alkalmazott szénacélok viszonylag elfogadható törési szívósságot és fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállást mutatnak (ASME B31.12 követelményekkel összevetve) hidrogén közegben.

Az ipari gázokkal foglalkozó cégek régóta foglalkoznak hidrogén tárolásával és szállításával, és tapasztalataik alapján kisebb nyomás (<200 bar) és alacsonyabb hőmérséklet (<200 °C) esetén a szénacélok alkalmazhatók hidrogéntartalmú közegekhez.

Annyi bizonyos, hogy a hidrogén ridegíti a szénacélokat, amely a fajlagos nyúlás és elsősorban kontrakció csökkenésében jelenik meg. A tapasztalatok alapján a hidrogén szilárdsági tulajdonságokra gyakorolt hatása nem tekinthető jelentősnek. A nagyobb szilárdságú acélok (különösen martenzit tartalmú szövetszerkezet esetén) fokozott ridegedési hajlamot mutatnak, ezért hidrogén közegben való alkalmazásuk nem javasolt. Ebből következően is kisebb szilárdságú ($R_{eh} < 400$ MPa) és nagyobb alakváltozóképeségű szénacélokat célszerű hidrogén tárolásához és szállításához alkalmazni.

A szénacélok hidrogén okozta ridegedéssel szembeni ellenállóképességét befolyásolja:

- a karbontartalom
- a szennyezőtartalom
- az acélgyártási technológia és a szövetszerkezet.

Minél kisebb az acél szennyezőtartalma (kén, foszfor), és minél jobb minőségű az acél (pl. nem zárványos, minimális a szegregáció mértéke stb.), annál jobban ellenáll a hidrogén okozta ridegedéssel szemben. Az anyagválasztás szempontjából nem lehet figyelmen kívül hagyni az acél szövetszerkezetét. A kis alakváltozóképeségű és fokozott ridegedési hajlamot mutató martenzites szövetszerkezetű acélok alkalmazása mindenképpen kerülendő. Alapvetően a ferrites, perlites és a bénites szövetszerkezetű acélok alkalmazandók hidrogén közegek esetén. Ígéretes lehetőséget jelenthetnek az offshore alkalmazásokhoz kifejlesztett, tús ferrites szövetszerkezetű, kis karbontartalmú acélok, amelyek rendkívül szívósak.

Amennyiben új rendszer kerül kiépítésre és lehetőség van rá célszerű olyan acélterméket választani, amelyet a gyártó célzottan hidrogén közeghez fejlesztett ki (pl. Vöestalpine). A tapasztalatok alapján ezeknél az acéltermékeknél gondosabb az acélgyártási technológia, tisztábbak ezek az acélok, kevésbé zárványosak, és a szegregáció mértéke is minimálisnak tekinthető bennük.

Köszönetnyilvánítás

A Kulturális és Innovációs Minisztérium Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program - Kooperatív Doktor Programja keretében, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott támogatással készült.

Irodalom

- [1] Kovács, J., & Lukács, J. (2025). Systematic review of factors influencing the integrity of pipeline girth welds exposed to hydrogen. *Welding in the World*. <https://doi.org/10.1007/s40194-025-02034-1>
- [2] Kovács, J., & Lukács, J.: *Factors affecting the integrity of pipelines transporting hydrogen containing media*. 2024 77th IIW Annual Assembly and International Conference on Welding and Joining, Rhodes, Greece, 178.
<https://www.erasmuscorp.gr/IIW2024/ProceedingFiles/FP178.pdf>
- [3] Lukács, J., & Nagy, N.: *Influence of hydrogen exposure on the behaviour of transporting pipeline sections*. 2024 77th IIW Annual Assembly and International Conference on Welding and Joining, Rhodes, Greece, 187.
<https://www.erasmuscorp.gr/IIW2024/ProceedingFiles/FP187.pdf>
- [4] Kumar, P. G., & Yu-ichi, K. (2013). Diffusible hydrogen in steel weldments – A status review. *Transactions of JWRI*, 42(1), 39–62.
- [5] American Petroleum Institute. (2016). *API recommended practice 941: Steels for hydrogen service at elevated temperatures and pressures in petroleum refineries and petrochemical plants* (8th ed.). <https://amarineblog.com/2021/10/17/nelson-curves-and-htha-damage-2/>
- [6] FGSZ Zrt. (2022). *2% mol% arányú hidrogén-földgáz keverék betáplálása. Döntéselőkészítő dokumentáció*.
- [7] Marcogaz. (2025. október 15.). *Technical works*. <https://www.marcogaz.org/>
- [8] Melaina, M. W., Antonia, O., & Penev, M. (2013). *Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: A review of key issues*. National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1068610>
- [9] Bándy, T. (2023). *Szerkezeti anyagok hidrogénben. Hidrogén technológiák a MESSER-től*. Oktatási anyag, Hidrogénellátási szakmérnöki képzés, Miskolci Egyetem.

- [10] Dodds, P. E., & Demoullin, S. (2013). Conversion of the UK gas system to transport hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 7189–7200. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.070>
- [11] Wang, H., Tong, Z., Zhou, G., Zhang, C., Zhou, H., Wang, Y., & Zheng, W. (2022). Research and demonstration on hydrogen compatibility of pipelines: A review of current status and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 28585–28604. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.158>
- [12] Ohaeri, E., Eduok, U., & Szpunar, J. (2018). Hydrogen related degradation in pipeline steel: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 14584–14617. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.064>
- [13] Triton Alloys Inc. (2025. október 17.). *HIC resistant steel plates*. <https://www.tritonalloysinc.com/hic-resistant-steel-plates.html>
- [14] Voestalpine. (2025. október 17.). *Heavy plates for hydrogen application*. <https://www.voestalpine.com/stahl/en/Products/Heavy-plates/Heavy-plates-for-hydrogen-application>
- [15] Cai, L., Bai, G., Gaou, X., Li, Y., & Hou, Y. (2022). Experimental investigation on the hydrogen embrittlement characteristics and mechanism of natural gas–hydrogen transportation pipeline steels. *Materials Research Express*, 9, 046512. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac6654>
- [16] Davani, R. K. Z., Miresmaeili, R., & Soltanmohammadi, M. (2018). Effect of thermomechanical parameters on mechanical properties of base metal and heat affected zone of X65 pipeline steel weld in the presence of hydrogen. *Materials Science & Engineering A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.101>
- [17] Wan, H.-J., Wi, X.-Q., Ming, H.-L., Wang, J.-Q., & Han, E.-H. (2023). Effects of hydrogen charging time and pressure on the hydrogen embrittlement susceptibility of X52 pipeline steel material. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. <http://link.springer.com/journal/40195> <https://doi.org/10.1007/s40195-023-01625-5>
- [18] Xu, X., Zhang, R., Wang, C., Liu, C., Zhang, J., & Li, Y. (2024). Experimental study on the temperature dependence of gaseous hydrogen permeation and hydrogen embrittlement susceptibility of X52 pipeline steel. *Engineering Failure Analysis*, 155, 107746. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107746>
- [19] Somerday, B. P. (2010). *Plain carbon ferritic steels: Technical reference on hydrogen compatibility of materials*. Sandia National Laboratories.
- [20] Steiner, M., Marewski, U., & Silcher, H. (2023). *DVGW Project SyWeSt H2 – Investigation of steel materials for gas pipelines and plants for assessment of their suitability with hydrogen*.
- [21] American Society of Mechanical Engineers. (n.d.). *ASME B31.12: Hydrogen piping and pipelines*.