

Nagynyomású hidrogénatmoszférás kemence gyártása szénacélok elridegedésének vizsgálatához

Varbai Balázs^{1*} , Katula Levente¹, Dobránszky János², Fodor Olivér³

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország

²HUN-REN–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapest, Magyarország

³ÁEF Laboratórium Kft., Budapest, Magyarország

*Levelező szerző, e-mail: varbai.balazs@gpk.bme.hu

Beérkezett: 2023. december 22.; elfogadva: 2024. január 30.; Online megjelent: 2024. május 7.

Összefoglalás

A hidrogén tárolása iránti igény egyre növekszik, melynek oka az, hogy a hidrogén mint alternatív energiahordozó jelentős szerepet játszik a szén-dioxidkibocsátás-csökkentési törekvésekben. Azonban, az elridegedési folyamatok körében a hidrogén által előidézett károsodások jelentik a legkomolyabb problémát az acélokra nézve. Kutatásunk során egy nagynyomású hidrogénatmoszférás hőkezelésre alkalmas autoklávot terveztünk, majd gyártottunk. Az autoklávban P355 NH minőségű alapanyagból kimunkált szabványos Charpy-féle ütőpróbatesteket hőkezeltünk 150 °C-on, 40 bar túlnyomáson, 200 órán keresztül, tiszta hidrogén atmoszférában. A vizsgálatok eredményei alapján megállapítottuk, hogy a jelentős mértékű elridegedés a hidrogénezési folyamat után sem történt.

Kulcsszavak: hidrogén, autokláv, elridegedés, ütővizsgálat

Investigation of the embrittlement of carbon steels in a high-pressure hydrogen atmosphere

Balázs Varbai¹, Levente Katula¹, János Dobránszky², Fodor Olivér³

¹Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Materials Science and Engineering, Budapest, Hungary

²HUN-REN–BME Research Group for Composite Science and Technology, Budapest, Hungary

³ÁEF Laboratory Ltd., Budapest, Hungary

Summary

The demand for hydrogen storage is growing. The primary reason for this is that hydrogen as an alternative energy carrier is playing a significant role in carbon reduction efforts as a fuel for road and maritime transport. In addition, hydrogen can be seen as a long-term flexible energy storage option. Hydrogen as an energy carrier is expected to play a significant role in residential and industrial use in the future. A first step in this development is the mixing of hydrogen with natural gas in small quantities. Increasing the share of hydrogen would not only reduce CO₂ emissions, but would also facilitate the development of different hydrogen production methods and thus reduce production costs. The upper safety limit for hydrogen blending with natural gas is set by the national specification of the natural gas supply, possible material quality restrictions and the tolerance of the most sensitive equipment in the network. For this reason, the maximum allowable hydrogen content in natural gas is generally limited to 2,5 %.

However, among the embrittlement processes, hydrogen-induced damage is the most serious problem for both non-alloy and low-alloy steels. Atomic hydrogen diffuses in steel at high rates. The diffusion rate is orders of magnitude higher than that of other elements; this is due to the small atomic diameter of hydrogen.

To investigate the degradation of different carbon steels in a high-pressure hydrogen atmosphere, a hydrogenation furnace was designed and fabricated at the Department of Materials Science and Engineering at BME. The hydro-

generation furnace is the main part of a complex mechanical engineering system, for the operation of which the mechanical, heating, electrical supply, control and gas handling components are indispensable. The entire design process of the furnace was led by József Blücher, Professor Emeritus at BME, with the help of the engineers and technicians working on the project. Standard Charpy impact test specimens were machined from P355 NH grade material to test the embrittlement of carbon steels. The hydrogenation temperature was 150 °C, the internal overpressure in the chamber was 40 bar, the hydrogenation time was 200 hours and the atmosphere was hydrogen gas of purity 5.0. The impact test was carried out at -20, 0 and +20 °C.

Based on the results of the tests, it can be concluded that there was no significant degree of degradation both before hydrogenation and after prolonged exposure to hydrogen. It can be concluded that the tube material used as a sample is suitable for operation in a hydrogen medium. Based on the analysis of the burst areas and impact values of the impact test specimens, it was concluded that hydrogen did not cause any observable damage to the test material.

Keywords: hydrogen, autoclave, embrittlement, impact test

Bevezetés

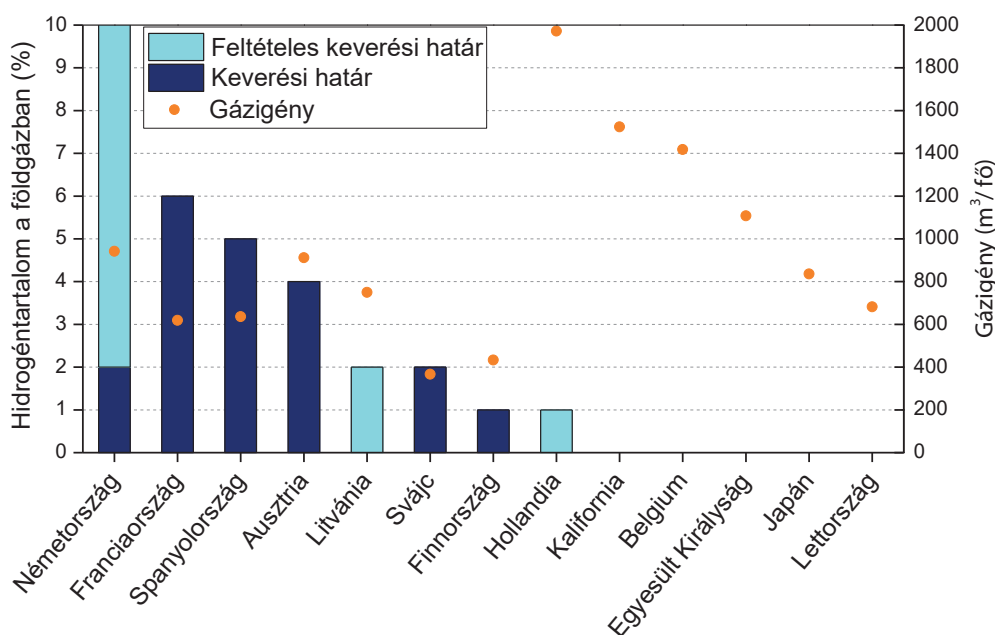
A hidrogén tárolása iránti igény egyre növekszik. Ennek elsődleges oka az, hogy a hidrogén mint alternatív energiahordozó jelentős szerepet játszik a szén-dioxidkibocsátás-csökkentési törekvésekben a közúti és a tengeri közlekedésben felhasználható üzemanyagként. Ezenkívül a hidrogén hosszú távon rugalmas energiatárolási lehetőségként tekinthető.

A hidrogén mint energiahordozó a lakossági és ipari felhasználásban várhatóan jelentős szerepet fog kapni a jövőben. Ennek a fejlődésnek egy első lépcsője a hidrogénnek kis mennyiségben a földgázhoz való keverése. A hidrogén minél nagyobb részarányú felhasználása nemcsak kisebb CO₂-kibocsátást eredményezne, de egyben elősegítené a különböző hidrogéntermelési módszerek fejlesztését, és ezáltal az előállítási költség mérséklését. A kis CO₂-kibocsátású hidrogén előállítási költsége jelenleg 11,4–14,2 USD/MJ (12–15 USD/MBtu), ami jóval nagyobb, mint a földgázból 1 MJ előállításához szükséges 2,8–9,5 USD (IEA 2019).

A földgázhoz való hidrogén-hozzákeverés biztonsági felső határát a földgázellátás nemzeti specifikációja, az esetleges anyagminőségi korlátozások és a hálózat legérzékenyebb berendezéseinek tűréshatára szabja meg. Emiatt a legnagyobb megengedhető hidrogéntartalom a földgázban általában legfeljebb 2,5%. Az 1. ábra (IEA 2020) hidrogén földgázhoz történő legnagyobb megengedett keverési határértékét mutatja néhány országban és államban, az éves, egy főre eső gázigény (m³/fő) feltüntetésével.

A hidrogén hatása a szénacélok tulajdonságaira

Az elridegedési folyamatok körében a hidrogén által előidézett károsodások jelentik a legkomolyabb problémát mind az ötvözetlen, mind pedig a gyengén ötvözött acélokra nézve. Az atomos hidrogén nagy sebességgel diffundál az acélban. A diffúziósebesség nagyságrendekkel nagyobb, mint más elemeké; ez a hidrogén kis atomtömegére vezethető vissza.



1. ábra | A hidrogén földgázhoz történő keverésének megengedett határértéke néhány államban, az éves, egy főre eső gázigény feltüntetésével (IEA 2020)

A hidrogén diffúziójáról feltételezik, hogy a proton (ami egyben a hidrogén ionja) diffúziójáról van szó. Az atomos hidrogén leadja az egyetlen elektronját, és ezzel kb. négy nagyságrenddel csökkenti méretét, miáltal rendkívüli módon megnöveli a diffúziósebességét (Nirosha et al. 2021).

Amikor a hidrogénion eljut valamilyen hidrogénscapdához, akkor ott a hidrogénion visszaveszi elektronját, és a csapdához már hidrogénatomként kötődik. A hidrogénscapda így nem más, mint a hidrogénnek az a képessége, hogy kölcsönhatásba lép a fémbe lévő valamennyi hibahellyel, legyenek azok akár mikroskálás, akár szubmikroskálás (vagyis nanoskálás) kiterjedésűek.

A hidrogénscapda kötési energiája jellemzően 20–100 kJ/mol, főleg attól függ, hogy milyen „erős” a csapda. Erős csapdának azt nevezzük, amelyben a megkötés mértéke sokkal nagyobb, mint a csapdából való kiszökés. A csapdák gyakran a kristályrács hibákhoz kötődnek. Erős csapdaként működnek a különböző kiválások, pl. karbidok és a martenzites anyagrészek. A csapdában megkötött, molekulárisra váló hidrogén akkor válik veszélyessé, ha például a mikroüreg erősen túltelítetté válik, és a környezetre nagy nyomást (10^4 – 10^5 bar) fejt ki, ami repedések kialakulásához vezethet, ha a fém alakváltozó képessége kicsi. A hegesztett kötésekben, a varratfémekben a hidrogéndús gázbuborékok hatására gömb vagy korong alakú, fényes felületű töretrészek jelentkeznek; ezt a jelenséget pelyhesedésnek vagy halszemnek is nevezik, az elnyújtott alakúakat pedig alagút-porozitásnak (Kazuho et al. 2022).

A hidrogén által előidézett károsodások egyik legfontosabb szakterületét képezik a korróziós károsodások (Bueno–Moreira–Gomes 2014). Ezen belül különösen lényeges a feszültségi korrózióval kapcsolatos szakterület. Mostanra már széles körben elfogadottá vált az a szemlélet, amely szerint a feszültségi korrózióval szoros vagy laza rokonságba hozható mindazon károsodásokat együttesen célszerű vizsgálni, amelyekben a környezeti hatások és mechanikai hatások – elsősorban a húzó igénybevételek – közösen képezik a károsodási feltételrendszert (Lynch 2007).

A feszültségi korróziós repedés – repedések képződése egy általában specifikusan korrozív közegnek és húzófeszültségnek az egyidejű hatására – különböző modelljei nagyrészt két alapvető osztályra oszthatók (Latanision–Gastine–Compeau 1977):

I. osztály: Azok a modellek, melyek úgy vélik, hogy a repedés terjedése a repedés csúcsának anódos oldódásával megy végbe (oldódási modellek).

II. osztály: Azok a modellek, amelyek szerint a repedés terjedése lényegében mechanikai jellegű. Ezeket a mechanizmusokat az alábbiakban röviden felsoroljuk.

- a) Repedésterjedés a passzív film nélküli fém oldódásával, a repedés csúcsán lévő képlékeny alakváltozás által biztosított, korróziósan aktív helyek számának növekedése miatt.

- b) Repedésterjedés a fém feloldódásával a repedés-csúcsban az egyébként védő passzív filmnek a csúszási kötegek általi feltörése miatt.

- c) A repedések terjedése a repedés-csúcsnál a fémbe belenövő rideg film ismételt képződésével és összetörésével.

- d) Felületaktív anyagok adszorpciója (feszültségi szorpció), amelynek következménye a repedés kialakításához szükséges felületi energia csökkenése, és ezért a törési feszültség csökkenése.

A hidrogén előidézte szilárdság- vagy alakíthatóság-csökkenést (ezt általában a kontrakció csökkenésével fejezik ki) számos mechanizmusnak tulajdonítottak. Ezeket tömören az alábbi listában soroljuk fel (Smith 1999):

- a) A molekuláris hidrogén felhalmozódása a belső üregekben és repedésekben olyan nyomást fejt ki, ami csökkenti a törési folyamatot aktiváló feszültségeket.

- b) A kristályrács hidrogén által kiváltott, lokális dekohéziója, másként a hidrogén adszorpciója (feszültségi szorpciója) a felületi energia csökkentésére.

- c) Az (elnyelt) hidrogén által kiváltott képlékeny alakváltozás felgyorsítja a későbbi törést. Noha a képlékenységi befolyásolásának módja nem pontosan ismert, a hidrogén csökkentheti a felületen a diszlokációk képződéséhez szükséges munkát, és ezáltal képlékenységet vált ki.

- d) Hidrogénben gazdag fázis (például hidrid) képződése, amelynek mechanikai tulajdonságai eltérnek a mátrix tulajdonságaitól.

- e) Hidrogén–diszlokáció kölcsönhatások, amelyek elnyomják a csúszást, megnövelik a diszlokációk mobilitását, és lehetőséget biztosítanak helyileg nagy hidrogénfelhalmozódások kialakulására, amelyek később elridegdedést váltanak ki.

A szénacélok elridegdedésének vizsgálati módszerei közé tartozik a nagynyomású gázban kezelt próbatestek mechanikai anyagvizsgálata. Ebből a célból egy hidrogénező kemencét terveztünk és gyártottunk, melynek rövid bemutatása a következő fejezetben található.

Vizsgálati anyagok és módszer

A hidrogén atmoszférában történő kezelésre alkalmas kemence tervezése

A különböző szénacélok nagynyomású hidrogénatmoszférában történő elridegdedésének vizsgálatához a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékén egy hidrogénező kemencét terveztünk és gyártottunk.

A hidrogénező kemence egy összetett gépészeti rendszer fődarabja, amelynek működéséhez a mechanikai, a fűtési, a villamos táplálási, a vezérlési és a gázkezelési részek együttesen nélkülözhetetlenül hozzátartoznak.

A kemence tervezési folyamatának egészét Blücher József, a BME címzetes egyetemi tanára vezette a projektben dolgozó mérnökök és technikusok közreműködésével.

vel. A tervezési folyamat munkaszakaszai az alábbiak voltak:

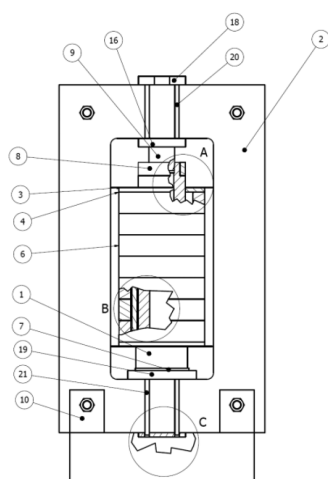
1. A nyomástartó kamra megtervezése; belső átmérő 56 mm, külső átmérő 107 mm.
2. A fűtőrendszer és elektromos bekötéseinek megtervezése.
3. A szigetelés és burkolatainak megtervezése.
4. Az alapkeret geometriájának megtervezése.
5. A nyomókeret és a nyomólapok megtervezése.
6. A nyomástartó kamra felső záródugójának megtervezése, beleértve a turbulens áramlást gátló dugórészt és a tömítések vízűtését.
7. A nyomástartó kamra záródugója mozgatoszerkezetének megtervezése.
8. A vezérlő és szabályozó elemek elhelyezésének, kiválasztásának megtervezése.
9. A nagynyomású gázrendszer és a biztonságtechnikai elemek megtervezése.
10. A fűtésszabályozás, a hőmérsékletmérés, a nyomásmérés és az adatgyűjtés villamos szekrényének megtervezése.

A hidrogénes atmoszférában történő kezelésre alkalmas kemence gyártása

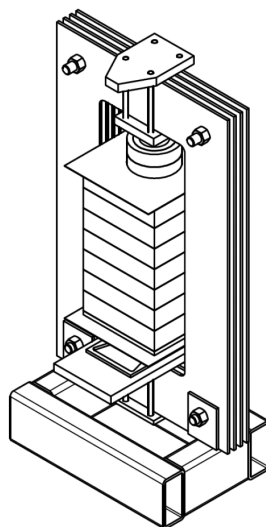
A gyártási folyamat a kemence fődarabjainak elkészítését jelentette, a fődarabok anyagainak beszerzésével, az alkatrészeinek egyedi legyártásával és/vagy beszerzésével, és az alkatrészeknek a fődarabokban való összeépítésével.

A gyártási folyamat munkaszakaszai részben egymást követően, részben pedig egymást átlapolva haladtak – és haladnak a teljes befejezésig – a következők szerint:

1. A nyomástartó kamra gyártása.
2. A fűtőrendszer gyártása.
3. A szigetelés gyártása.
4. A szigetelés külső burkolatának gyártása.
5. Az alapkeret gyártása.
6. Az nyomókeret és a nyomólapok gyártása.
7. A nyomástartó kamra felső záródugójának gyártása.
8. A nyomástartó kamra alsó és felső vízűtőkörének gyártása.
9. A nyomástartó kamra záródugója mozgatoszerkezetének gyártása.



1	Kamra
2	Nyomókeret
3	Szigetelést tartó lemez
4	Tematherm lemez
5	Fűtőelem
6	Hőszigetelő lemez
7	Mozgató lemez
8	Vízűtés gyűrű
9	Kamra dugó
10	Nyomókeret tartó lemez
11	Távtartó gyűrű
12	M20 anya
13	M20 csavar
14	Alapkeret zártszelvény
15	Alapkeret zártszelvény
16	Felső nyomólemez
17	Alsó nyomólemez rögzítő lemeze
18	Felső nyomólemez rögzítő lemeze
19	Alsó nyomólemez
20	M10 menetes szár
21	M10 menetes szár



2. ábra | A hidrogénező kemence összeállítási és axonometrikus rajza (burkolat nélkül)

10. Az 1–9. számú fődarabok összeépítése kemencetestté és annak keretszerkezetévé.
11. A fűtésszabályozó és a vízhűtőkör hőmérsékletmérőjének ideiglenes kiépítése.
12. A nagynyomású gázrendszer és a biztonsági elemek megtervezése és gyártása.
13. A fűtésszabályozás, a nyomásmérés és adatgyűjtés villamos szekrényének gyártása.

A következőkben, illusztrációszerűen, bemutatjuk a kemence gyártásának néhány lényeges lépését.

A nyomástartó kamra gyártása a tatabányai Fogaskerékgyárban történt. Ugyanitt történt a nyomókeret lemezeinek pontos méretre való forgácsolása és festése. A nyomó

mókeret lemezeinek vágását és minden más lemezszabászati munkát a székesfehérvári MW TECH Kft. végezte lézeres vágással. A nyomókeret 4 db lemezének anyaga 6 mm vastag, S235J0 acél. Ennek a 4 db keretlemeznek a méretpontossága minden méretére nézve nagyon lényeges. Ezért a lézeres vágás után a végső méreteket a négy keretlemez együttes marásával biztosítottuk.

Az alapkeret 120 × 80 × 6 mm-es zártszelvényből készült hegesztéssel, a Fogaskerékgyár csepei gyárában. A nyomókeret keretlemezeinek forgácsolása és alapozófestése után itt végeztük a támasztófülek felhegesztését. Ennek a gyártási műveletnek az a jelentősége, hogy



3. ábra | A kemence nyomástartó kamrájának és nyomókereteinek gyártása



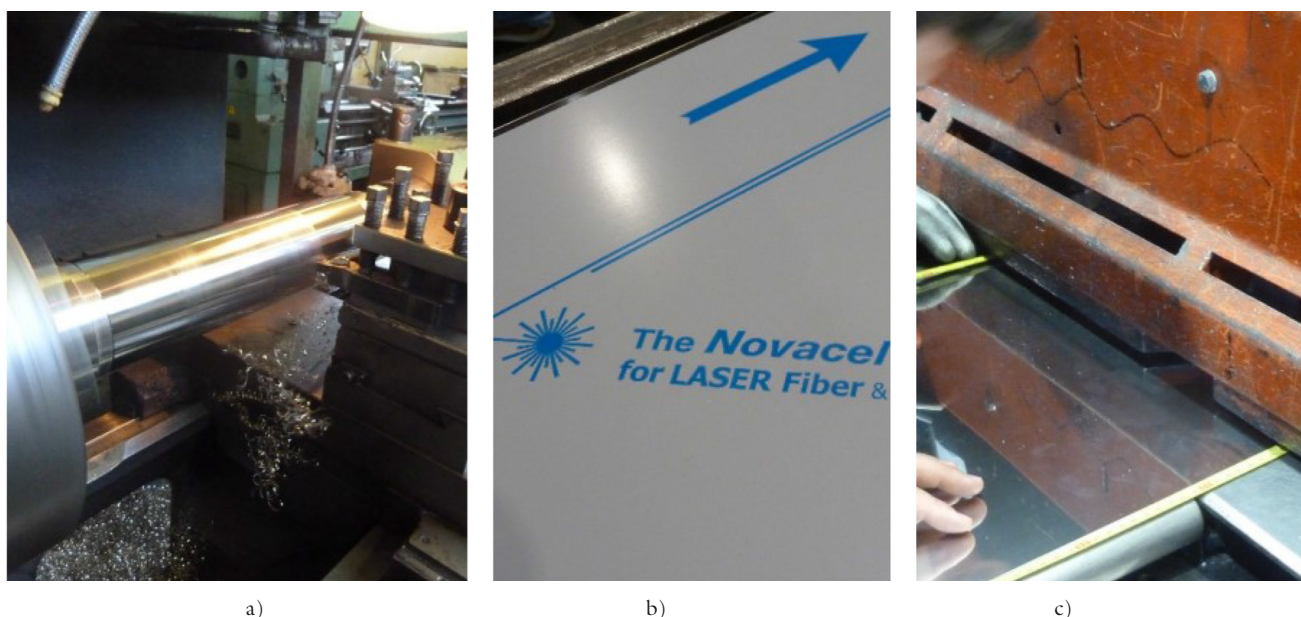
Nyomókeret

Felhegesztett támasztófülek



Alapkeret

4. ábra | A nyomókeret felszerelése a hegesztett alapkeretre

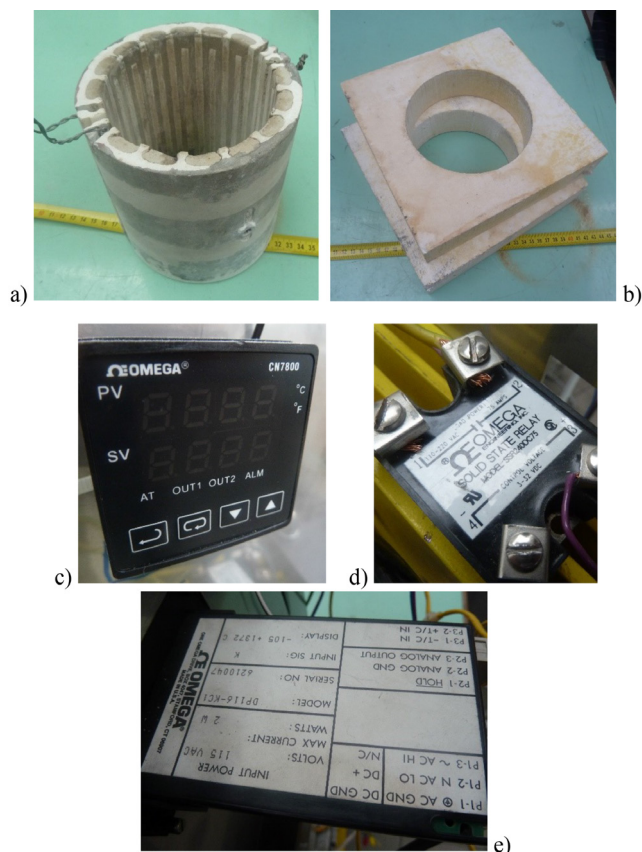


5. ábra | A kemence nyomástartó kamrájának fogácsolása és a kamraburkolat gyártása

a 4 keretlemez belső ablaka alsó és felső éleinek egy síkba kell esniük annak érdekében, hogy a kemencetartó alaplemez is és a felső zárást biztosító záródugó is mind a 4 keretlemezre egyenletesen támaszkodjon. A keretlemez belső ablakát az összeépítés és a próbaüzemeltetés során észlelt felütközések miatt utólagosan meg kellett növelni. A szigetelést és a burkolatot is a kemencetest végső szélessége miatt az ablak szélességét, a nyomástartó kamra hőtágulása miatt pedig a magasságát meg kellett növelni; ez egy újabb forgácsolási megmunkálással történt a Fogaskerékgyárban, Tatán. Ekkor ott megtörtént a keretlemez és az alapkeret festése is, „industrial yellow” színre.

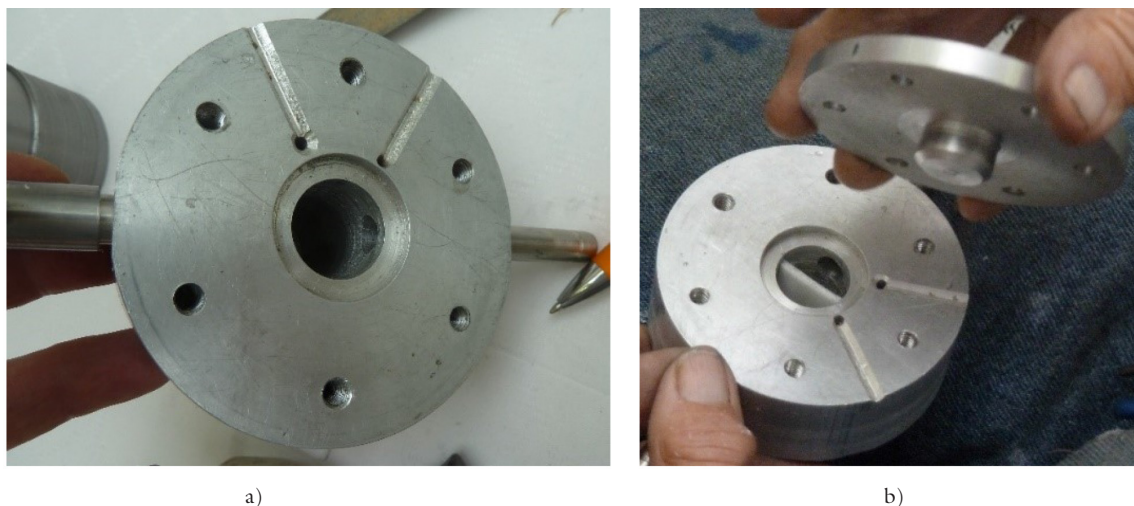
A kemence fűtését 2 db, egyaránt két félcsészéből álló kerámia fűtőelem végzi. Ezek befogadómérete névlegesen 112 mm, de az alakjuk pontatlanságai miatt nem illeszkedtek a nyomástartó kamra külső, hengeres palástjára. Ezért a nyomástartó kamra külső átmérőjét 110 mm-ről 104 mm-re kellett csökkenteni. Az 5a) ábra mutatja a Fogaskerékgyárban végzett esztergálás műveletét. A b) és c) képen a kemencetest külső burkolata gyártási folyamatának két epizódja látható: a 0,6 mm vastag, 1,4307 anyagú lemez védőfóliázott állapotban (b), illetve a lemezollóval végzett vágás és az élhajlítás közben; ezeket a műveleteket a tatabányai DINOX-H Nemesacélgyártó Kft.-nél végeztük.

A kemencetest létfontosságú alkatrészeként a 6a) ábrán látható fűtőelemből 2 db-ot építettünk be, egymásra helyezve, és a fűtőszálakat sorba kötve. A b) képen az 50 mm vastag szigetelőlapok néhány darabja látható, amelyek egymásra helyezve körbeölelik és hőszigetelik a fűtőbetétet. Mind a fűtőelemek és a szigetelőanyagok, mind pedig a c)–e) képeken látható kemencevezérlési alkatrészek rendelkezésre álltak már a gyártás kezdetén.



6. ábra | A kemence fűtőelemei és a vezérlést biztosító alkatrészek

A záródugó különlegesen összetett fődarabja a hidrogénezőkemencének. A nyomástartás mellett ezen keresztül valósul meg a gázbevezetés, a gázkivezetés és a fűtésszabályzó termoelemének a bevezetése a nyomástartó kamrába. Mivel alsó része a kemencetérrel érintkezik, saját vízhűtőköre van a folyamatosan érkező hő



7. ábra | A kemence záródugójának gyártási lépései

elszállítására. A 7a) és a b) ábrán látható a záródugó magjának közepén lévő hűtőfurata, a b) képen a vízterelő teflonlemez és a zárófedél. A tömítést a képen nem látható O gyűrű végzi.

A nyomástartó kamrába a záródugómagon 3 db furat megy át: a Swagelok-tömlőcsatlóval felszerelt gázbevezetés és gázkivezetés, a hőmérséklet-szabályzó termoelemének bepréselt, zárt köpenye számára készített furat. A gázkivezetés céljára csak egy kivezető furat készült.

A gyártási folyamat második fázisának feladata a kemencének a hidrogénezési kísérleti program végrehajtására való teljes felszerelése volt, és a következő részfeladatokról tevődött össze:

1. A kemence mechanikai elemeinek végleges készre szerelése; ütközők, műszerfal.
2. A vízhűtőkör végleges kiépítése; bilincsek, befolyóvezeték toldása.
3. A fűtésszabályozási, -ellenőrzési és adatgyűjtési műszerezés véglegesítése; teljes újrakábelezés, az elemek rögzítése a műszerfalra, főkapcsoló, árammérő bekötése.

4. A nagynyomású gázrendszer vezetékeinek és szerelvényeinek megrendelése a Linde Gáz Magyarország Zrt.-től. Ebben a munkaszakaszban megterveztük a hidrogénezőkemence saját gázellátási rendszerét, a Linde szakemberei pedig kidolgozták és megrendelték a szerelvényezési szükségletet. A Swagelok-szerelvények szállítási idejének hosszúsága miatt a hidrogénezési kísérleteket a laboratórium saját gázrendszerére telepítettük, és ezzel is fejeztük be, noha a kísérleti program végére a Linde sikeresen befejezte a kemence önálló gázrendszerének kiépítését. Ezt a teljes kiépítési állapotot ennek a fejezetnek a végén mutatjuk be.

5. A hidrogénezőkemence saját gázellátásának illesztése a tanszéki Fémkompozit-kutatási Laboratórium – ez a hidrogénezőkemence telepítési helye – egy másik kemencéjét kiszolgáló, vákuumozásra is alkalmas, nagynyomású gázrendszerhez. Szelepekkel felszerelt T idom, ehhez 2 db 8 m-es gázbevezető tömlő a palackoktól, 1 db 3 m-es tömlő a kemencéhez a gázrendszeri elosztófejtől.



8. ábra | A kemence kezelőpanelje és mérőműszerei

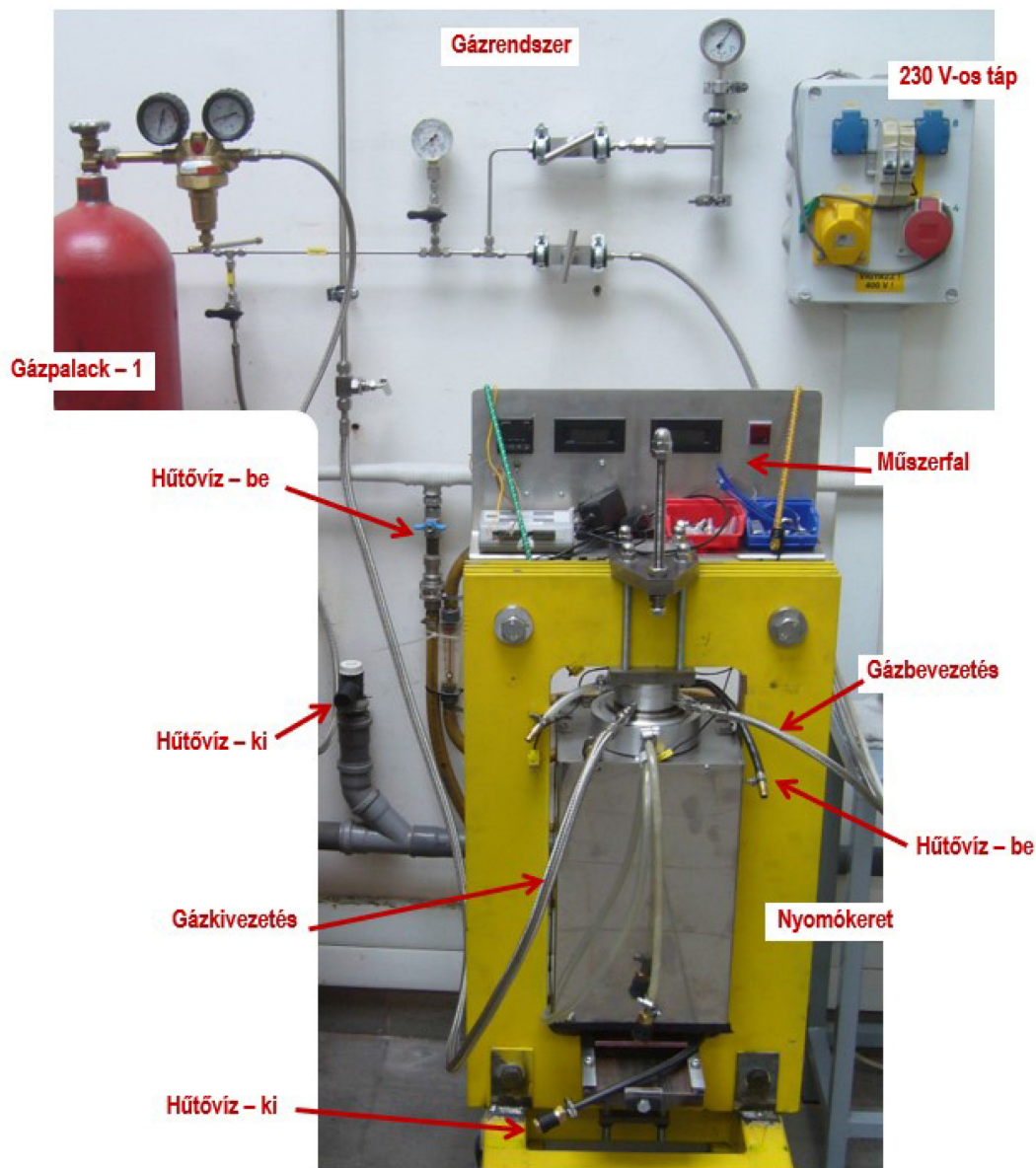
A kemence kezelőpanelje és a mérőműszerei a 8. ábrán láthatók. Az adatgyűjtő segítségével regisztrálható a felfűtési ciklus hőmérsékletprofilja, és ellenőrizhető a hőmérséklet-szabályzó működése. Az elkészült kemence és a részegységei a 9. ábrán láthatók.

A hidrogénes atmoszférában vizsgált anyagminőség és az anyagvizsgálati módszerek bemutatása

Az elkészült nagynyomású, hidrogénatmoszférás kemence működésének ellenőrzéséhez P355 NH anyagminőségű minták kezelését végeztük el. A P355 NH minőségű alapanyagból szabványos Charpy-féle ütőpróbatesteket munkáltunk ki. A hidrogénezési hőmérséklet 150 °C volt, a kamrában lévő belső túlnyomás 40 bar, a hidrogénezés időtartama 200 óra, az atmoszféra pedig

5.0 tisztaságú hidrogéngáz. Az ütővizsgálatot –20, 0 és +20 °C-on végeztük. A kamrában történő vizsgálat menete a következő volt:

1. A próbatestek behelyezése a kamrába.
2. A kamra többszöri átöblítése inert gázzal.
3. A kamra többszöri átöblítése hidrogénnel és vákuumozása.
4. A kamra feltöltése a tervezett nyomásra hidrogénes közeggel.
5. A kamra felfűtése a vizsgálati hőmérsékletre.
6. Hőn tartás a hidrogénes kezelés idejéig.
7. A kamra lehűtése, nyomásmentesítése, majd kinyitása.
8. A próbatestek kiemelése, majd szállítása szárazjégben a vizsgálat helyszínére.
9. Mechanikai anyagvizsgálatok (Charpy-féle ütővizsgálatok).



9. ábra | A kemence kezelőpanelje és mérőműszerei



10. ábra | Az ütőpróbatestek töretfelületei a hidrogénezés után

Az eredmények bemutatása és értékelése

Az ütővizsgálati eredmények az 1. táblázatban láthatók.

1. táblázat | A különböző hőmérsékleteken mért ütőmunkaértékek a hidrogénezést követően

A próbatest jele	Vizsgálati hőmérséklet	Ütőmunka (J)
M1	+20 °C	245
M2	+20 °C	238
M3	+20 °C	239
Átlag: 241		
M4	0 °C	229
M5	0 °C	240
M6	0 °C	237
Átlag: 235		
M7	-20 °C	239
M8	-20 °C	216
M9	-20 °C	241
Átlag: 235		

A Charpy próbatestek ütővizsgálat utáni töretfelületei a 10. ábrán láthatók. A töretfelület szívós viselkedést mutat.

A P355 NH anyagminőségű hosszvarratos cső anyagszabványa, az MSZ EN 10217-3 a 7. táblázatában az alábbi minimális ütőmunka értékeket írja elő:

- -20 °C-on: KV > 40 J
- 0 °C-on: KV > 47 J
- +20 °C-on: KV > 55 J

A vizsgálatok eredményei alapján megállapíthatjuk, hogy mind a hidrogénezés előtt, mind hidrogénos közegben történő huzamosabb idejű tartózkodás után sem volt mérhető érdemi mértékű elridegedés. Megállapítható, hogy a mintaként felhasznált csőanyag alkalmas hidrogénos közegben való üzemeltetésre.

Az ütőpróbatestek töretfelületeinek és ütőmunka értékeinek elemzése alapján megállapítottuk, hogy a hidro-

gén nem károsította megfigyelhető mértékben a vizsgálati anyagot.

A cikkben bemutatott nagynyomású hidrogénatmoszférás kemence alkalmasnak bizonyult szénacélok hidrogénos elridegedésének vizsgálatára. A kemencetestben különböző szabványos (ütő- vagy szakító-) próbatestek hidrogénos kezelése növelt nyomású atmoszférában (40 bar) hosszú kezelési ideig (200 óra) megvalósítható. Véleményünk szerint a berendezés alkalmas egyéb gáz- és olajipari, ötvöztelen és nagy szilárdságú szénacélok hidrogénos érzékenységének vizsgálatára is.

Köszönetnyilvánítás

A fejlesztés a Magyar Földgáztároló Zrt. Akvamarin projektje keretében valósult meg. A szerzők továbbá köszönetet szeretnének mondani Blücher József professzor úrnak, a BME címzetes egyetemi tanárának, a kemence tervezésében és gyártásában nyújtott elengedhetetlen segítségéért.

Irodalomjegyzék

- Bueno, A. H. S., Moreira, E. D., & Gomes, J. A. C. P. (2014) Evaluation of stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement in an API grade steel. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 36. pp. 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.11.012>.
- IEA (2019) Special Focus on Gas Infrastructure. (Különös tekintettel a gázinfrastruktúrára.) <https://www.iea.org/articles/special-focus-on-gas-infrastructure> [Letöltve: 2023. 12. 22.]
- IEA (2020) Current limits on hydrogen blending in natural gas networks and gas demand per capita in selected locations. (A hidrogénnek a földgázhálózatokba való bekeverésére vonatkozó jelenlegi korlátozások és az egy főre jutó gázigény kiválasztott helyeken.) <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/current-limits-on-hydrogen-blending-in-natural-gas-networks-and-gas-demand-per-capita-in-selected-locations> [Letöltve: 2023. 12. 22.]
- Nirosha D. Adasooriya, Wakshum Mekonnen Tucho, Erlend Holm, Terje Årthun, Vidar Hansen, Karl Gunnar Solheim, & Tor Hemmingsen (2021) Effect of hydrogen on mechanical properties and fracture of martensitic carbon steel under quenched and tempered conditions. *Materials Science & Engineering: A*, Vol. 803. 140495. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140495>
- Kazuho Okada, Akinobu Shibata, Wu Gong, & Nobuhiro Tsuji (2022) Effect of hydrogen on evolution of deformation microstructure in

- low-carbon steel with ferrite microstructure. *Acta Materialia*, Vol. 225. 117549. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117549>
- Latanision, R. M., Gastine, O. H., & Compeau, C. R. (1977) Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement: differences and similarities. Proceedings of the Symposium on Environment-Sensitive Fracture of Engineering Materials, Z. A. Foroulis (ed.), Met. Soc. AIME, Chicago, pp. 48–70.
- Lynch, S. P. (2007) Progress Towards Understanding Mechanisms Of Hydrogen Embrittlement And Stress Corrosion Cracking. CORROSION 2007, Nashville, Tennessee, March 2007. NACE-07493
- Smith, R. D. (1999) Hydrogen distribution and redistribution in the weld zone of constructional steels – A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Materials Engineering, Brunel University