

CSEPEL ZSÓFIA LUCA^{1,2}, CSAPÓ MAJA^{1,2}, KOVÁCS JÓZSEF GÁBOR^{1,2}

FÉM HAB ÉS FRÖCCSÖNTÉS KOMBINÁLÁSA HIDROGÉN ENERGIACELLÁK BIPOLÁRIS LEMEZEIHEZ

COMBINING METAL FOAM AND INJECTION MOLDING FOR BIPOLAR PLATES IN HYDROGEN ENERGY CELLS

A fosszilis erőforrások csökkenése és a káros gázki-bocsátás miatt nő az igény az alternatív energiaforrások iránt, mint a nap-, szél-, víz-, geotermikus és nukleáris energia, valamint a biomasza és a hidrogén. A hidrogén üzemanyagcella használata ígéretes, mivel működés közben víz és hő keletkezik, szinte nulla károsanyag-kibocsátással. A legígéretesebb technológia a protonátteresztő membrános (PEM) üzemanyagcella, amelynek egyik kulcseleme a bipoláris lemez. A hagyományos grafit bipoláris lemezek törékenyek és drágán gyárthatók, a fém bipoláris lemezek nehezek és szintén költségesek. Munkánkban ezért vizsgáltuk a fémhab és polimer kompozit kombinációjával létrehozható bipoláris lemezeket oly módon, hogy a fémhabra történő ráfröccsöntést teszteltük az egy lépéses gyártás megvalósításához.

The decline of fossil resources and harmful gas emissions have increased the demand for alternative energy sources, such as solar, wind, hydro, geothermal, and nuclear energy, as well as biomass and hydrogen. The use of hydrogen fuel cells is promising, as they produce water and heat during operation with almost zero harmful emissions. The most promising technology is the proton exchange membrane (PEM) fuel cell, one of the critical components of which is the bipolar plate. Traditional graphite bipolar plates are brittle and expensive, while metal bipolar plates are heavy and costly. Therefore, our work investigated the bipolar plates that can be created by combining metal foam and polymer composite, testing the injection molding onto the metal foam to achieve a one-step manufacturing process.

1. BEVEZETÉS

1.1. HIDROGÉNCELLA

Az első működő üzemanyagcellát 1843-ban Sir William Grove hozta létre oxigén és hidrogén reagáltatásával kénsavba merített platina elektródák használatával. Az üzemanyagcellák akkori kezdetleges, kis hatékonyságú technológiája nem vette fel a versenyt a Jedlik Ányos által elképzelt, végül Siemens által 1866-ban szabadalmaztatott dinamóval. Az ezt követő több mint 100 évben létrehoztak több üzemanyagcellát is, az áttörést a kutatásban azonban az 1960-as években a Gemini és az Apollo űrprogramok hozták meg, ahol az űrhajók elektromos energiaellátását üzemanyagcellák biztosították [1]. Napjainkban a fosszilis erőforrás-tartalék csökkenése és az energiahordozó nyersanyagok okozta geopolitikai függés mérséklési szándéka igényt teremt olyan alternatív energetikai megoldásokra, mint az üzemanyagcellák [2].

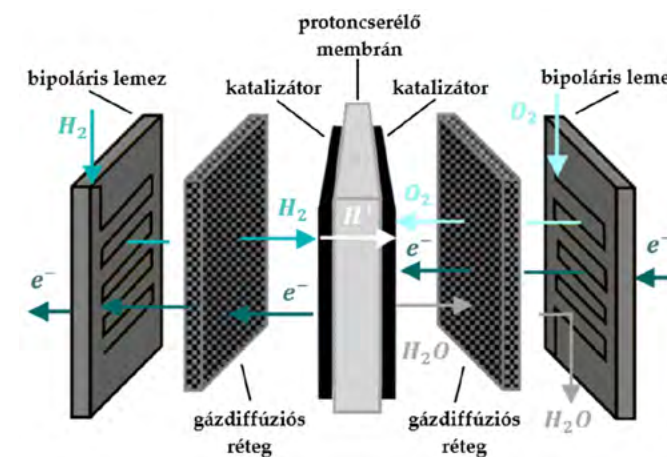
Az üzemanyagcellák nagy (akár 60% feletti) hatékonyságú elektrokémiai energiaátalakító berendezések, amelyek kémiai energiából elektromos energiát állítanak elő folyamatosan, amíg a szükséges alapanyagok betáplálásra kerülnek. Az alkalmazott

elektrolitól függően számos különböző típusú üzemanyagcella létezik, például lúgos (AFC, Alkaline Fuel Cell), foszforsavas (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell), olvasztott karbonátos (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell), szilárdoxidos üzemanyagcellák (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell) [3]. A különböző típusok közül a legtöbb figyelmet a protonátteresztő membrános (PEM) hidrogén-cella kapja (1. ábra). Ennek oka a nagy energiahatékonysága, kis károsanyag-kibocsátása és kis üzemi hőmérséklete (40-80 °C). Ennek köszönhetően a járműiparban is ez a típus bizonyul a legígéretesebbnek [4].

A hidrogén a legkönnyebb és legkisebb atom, így megfelelő tömítések alkalmazása szükséges. Biztonságtechnikai okokból a hidrogén diffúziója és disszociációja miatt rendkívül fontos a megfelelő alapanyagok kiválasztása a hidrogénüzemű berendezésekben. Kis méretéből fakadóan a hidrogén atom képes bedifundálni számos anyagba, rontva ezzel a mechanikai tulajdonságokat és ridegítve az anyagot. Foorginezhad és társai [5] szerint

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

² MTA-BME Lendület Könnyűszerkezetes Polimer Kompozitok Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.



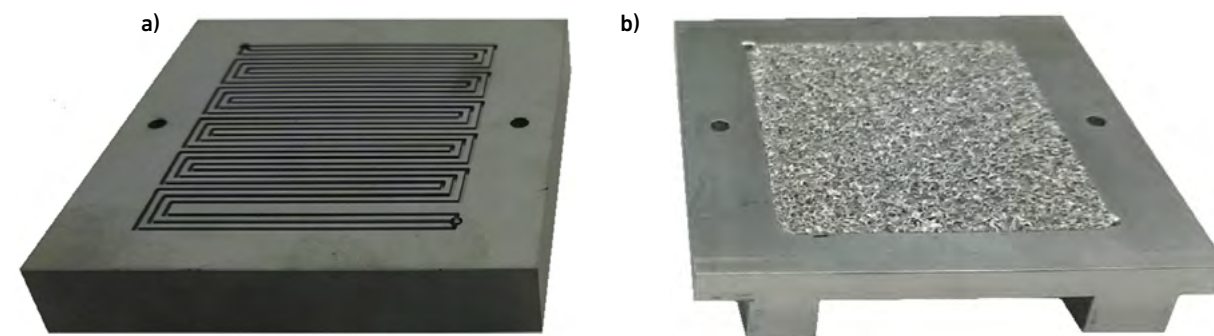
△ 1. ábra: A hidrogén-cella felépítése [4]

a hidrogén nagy nyomáson a legtöbb anyagban károsodást okoz, manapság a legellenállóbb anyagnak a nagy krómtartalmú acélok, króm-molibdén tartalmú acélokat és a polimer mátrixú kompozitokat tekintik.

1.2. BIPOLÁRIS LEMEZEK

Az üzemanyagcellák egyik legfontosabb alkotóeleme a bipoláris lemez. A PEM cellákban a bipoláris lemez biztosítja az elektronok átjutását a cellák és az elektródák között, valamint az oxigén és hidrogén egyenletes eloszlását is. Felelős a cella hőháztartásáért: elvezeti a felesleges hőt a cellából, valamint szerepe van a víz és a hűtőfolyadék elvezetésében is. Hidrogén üzemanyagcella esetén hidrogént és oxigént alkalmaznak az áram előállításához, ennek megfelelően a bipoláris lemezek és a cella tömítettsége rendkívül fontos a gázszivárgás megakadályozása érdekében [6]. Kutatások alapján a bipoláris lemezek a teljes üzemanyagcella tömegének 40-80%-át, költségének 30-37%-át adják, így alapanyagának megválasztása rendkívül nagy jelentőségű [7].

Annak érdekében, hogy a bipoláris lemez a kitűzött feladatait teljesíteni tudja, alapanyagának számos feltételnek meg kell felelnie. Cunningham és társa [8] szerint a lemezek alapanyagának a következő követelményeknek kell eleget tennie: jó elektromos vezetőképesség (>100 S/cm), kis permeabilitás, korrózióállóság, megfelelő szakítószilárdság (>41 MPa), megfelelő hajlítási szilárdság (>59 MPa), nagy hővezetőképesség (>10 W/(m·K)), kémiai stabilitás, kis hőtágulás, hatékony feldolgozhatóság.



△ 2. ábra: A hagyományos (a) és fémhabbal ellátott (b) bipoláris lemez [7]

Taherian [9] szerint a **grafit** gyakran alkalmazott bipoláris lemez anyag a megfelelő elektromos vezetőképessége és korrózióállósága miatt, azonban költséges a precíz megmunkálása. A gyártás során a grafit porózussá válhat, ami szivárgáshoz és teljesítménycsökkenéshez vezethet a PEM üzemanyagcellákban, ezért utókezelés szükséges. Awin és Dukhan [10] megállapították, hogy a grafit törékenysége és alacsony hajlítási szilárdsága miatt járművekben nem alkalmas, mivel minimum 4-6 mm vastagságú lemezeket kell használni, ami csökkenti az energiasűrűséget.

A bipoláris lemezek alapanyagaként használt **fém**es anyagokra jellemző a kiváló elektromos- és hővezetőképesség, kedvező mechanikai tulajdonságok, könnyű feldolgozhatóság, kis költség, kis vastagságú és tartós szerkezet kialakításának lehetősége [4].

Antunes és társai [11] szerint a **polimer kompozitok** olyan új típusú anyagok, amik ötvözik a korrózióálló polimerek és a vezetőképes töltőanyagok kedvező tulajdonságait. A kompozitok mátrix anyagaként hőre lágyuló és hőre keményedő polimer egyaránt alkalmazható. A termoplasztikus polimerekhez képest a hőre keményedők gyártási ciklusa több időt igényel, ami miatt kevésbé alkalmasak sorozatgyártásra. A polimer mátrixhoz az elektromos vezetést megvalósító töltőanyagok keverése szükséges, ami túlzott mennyiségben azonban a mechanikai tulajdonságok romlásához vezethet. A polimer kompozit bipoláris lemezek gyártásának egyik kihívása a töltőanyag mennyiség beállítása úgy, hogy az elektromos és mechanikai tulajdonságok egyaránt megfelelőek legyenek.

Song és társai [4] szerint a polimer kompozitok az alkalmazott töltőanyagtól függően két csoportra oszthatók, a fém, illetve a szén alapú kompozitokra. Állításuk szerint a legtöbb kutatás a szén alapú töltőanyagot tartalmazó kompozitokkal kapcsolatos, ugyanis így kis tömegű lemezek gyártása lehetséges. Fém töltőanyagokkal nagyobb elektromos vezetőképesség érhető el, korrózióhajlamuk miatt azonban alkalmazásuk a cellákban nem kedvező. Szén alapú töltőanyag a grafit, korom, szénszál (CF – Carbon Fiber), többrétegű szén nanocső (MWCNT – Multi-Wall Carbon Nanotube), fémes töltőanyagként például rozsdamentes acél szálak alkalmazhatók. Polimer kompozit bipoláris lemezek gyártása általában préseléssel vagy fröccsöntéssel történik, így az összetett geometria és a folyási csatornák is egy lépésben kialakíthatók, nincs szükség költséges utólagos megmunkálásra.

A hagyományos (például grafit) bipoláris lemezekben a közegek áramlása a lemezbe munkált mikrométeres méretű csatornákon keresztül történik (2.a ábra), amelyek kimunkálása költséges. Ezekben a lemezekben a folyási út mentén a nyomás nagy mértékben csökken, ami jelentős hatékonyság csökkenést

eredményezhet a beömlőtől távolodva. Ennek megoldására egy lehetséges alternatíva a nyílt cellás fémhabok (2.b ábra) alkalmazása, ahol az áramlás a hagyományos (például grafit) lemezekkel ellentétben nem a lemezbe munkált mikrométeres nagyságrendű csatornákon keresztül történik, hanem a hab nyílt celláin át [12].

Awin és Dukhan [10] vizsgálata szerint a fémhab bipoláris lemezek javítják a PEM üzemanyagcellák teljesítményét a grafit lemezekhez képest. A fémhabok változtatható termikus, mechanikai és elektromos tulajdonságai, valamint a jobb hőmérséklet- és nyomáseloszlás miatt kedvezőbbek. A grafit lemezekkel szemben a fémhabokkal könnyebb és hatékonyabb cellák érhetők el, például 27,8%-os tömegcsökkenést és 10%-os hatékonyságnövekedést tapasztaltak alumíniumhab lemez esetén [7]. Kumar és Reddy [13] kiemelik a fémhabok kiváló porozitását és vezetőképességét, de korrózióállóságuk korlátozott. Tseng és társai [14] nikkel fémhab bevonásával növelték a korrózióállóságot és teljesítményt, míg Park és társai [15] a rézhab előnyeit hangsúlyozták, amely jelentős teljesítménynövekedést eredményezett.

A **hővezető polimerek és polimer kompozitok** kis tömegük, korrózióállóságuk és könnyű feldolgozhatóságuk miatt ígéretek a hidrogén energiacellularákban [16-18]. A polimerek hővezetése kicsi, a polimer kompozitok hővezetése a töltőanyagok és a mátrix közötti hőellenálláson (ITR) múlik, amit csökkenteni kell a hővezetési képesség növelése érdekében [17]. A töltőanyag mennyisége és eloszlása kulcsfontosságú a kompozitok hővezetésének növelésében, a termikus perkoláció elérése után jelentősen javul a hővezetés [19]. Szén alapú, szervesetlen és fémes töltőanyagok, mint a grafit, bór-nitrid és réz, gyakran alkalmazott hővezető anyagok [19].

Az anyagok elektromos vezetőképessége alapján megkülönböztetünk szigetelőket, félvezetőket és vezetőket. A polimerek többnyire szigetelők, de bizonyos esetekben jelentős vezetőképesség érhető el velük. A vezetőképes polimer kompozitok gyártásakor szigetelő polimer mátrixba vezetőképes töltőanyagot, például kormot vagy szénszálat helyeznek. A vezetőképeség függ a töltőanyag típusától, mennyiségétől és a perkoláció küszöbértékének átlépésétől, amely után a vezető hálózat kialakul. A vezetési mechanizmusok a töltőanyag koncentrációjától függenek: alacsony koncentrációnál alagút effektus, magasabb koncentrációnál ohmikus vezetés lép fel.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

2.1. FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK

A próbatestek fröccsöntéséhez a Tecnoprene® AK6HI (Celanese Corporation, Egyesült Államok, Texas) alapanyagot alkalmaztuk modellanyagként. Az alapanyag sűrűsége 1130 kg/m³, rugalmassági modulusza 6700 MPa, a hajlítási modulusza szobahőmérsékleten (23 °C) 6200 MPa, hajlítószilárdsága ezen a hőmérsékleten 142 MPa, Charpy-féle ütőszilárdsága szobahőmérsékleten 55 kJ/m². Folyóképessége 230 °C hőmérséklet és 2,16 kg terhelőerő mellett 2,8 g/10 min. A Ni fémhab vastagsága 1,6 mm, névleges pórusmérete 450 µm és az 1 m² felületre vetített tömege 420 g.

2.2. ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A próbatestek **fröccsöntéséhez** Arburg Allrounder Advance 270S 400-170 (Arburg GmbH, Németország, Lossburg) típusú fröccsöntő gépet alkalmaztunk. A berendezés záróereje 400 kN, a megvalósítható maximális fröccsnyomás 2000 bar, a maximális adagsúly 77 g, a csiga átmérője 30 mm, oszloptávolsága 270 mm. Az alkalmazott ömledékhőmérséklet 200 °C, a szerszámhőmérséklet 30 °C volt.

A **szűrkeségi fok** meghatározásához Konica Minolta Universal V4 PCL szkennert használtunk és a mintákat 600 dpi felbontással digitalizáltuk TIFF formátumban.

A **nyomóvizsgálatokat** Zwick-Z005 típusú (Zwick GmbH & Co., Németország, Ulm) szakítógéppel végeztük. A vizsgálat során 5 kN-os erőmérő cellát alkalmaztunk, a mérés sebessége 1 mm/perc volt. A nyomóvizsgálathoz 8 mm átmérőjű mérőfejet használtunk.

A fröccsöntött minták elemzéséhez Keyence VHX-5000 optikai mikroszkópot (Keyence Corporation, Japán) alkalmaztunk. A minták vizsgálatát több eltérő nagyításban (40×, 100×) végeztük.

Az **elektronmikroszkópos** vizsgálathoz JEOL JSM 6380LA (Jeol Ltd., Japán, Tokió) pásztázó elektronmikroszkópot és a hozzá tartozó aranyozó berendezést használtunk. A vizsgálat során több különböző nagyításban (30×, 50×, 65×, 75×, 100×, 200×) készítettünk felvételeket a mintákról.

3. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

Célunk olyan próbatestek gyártása és vizsgálata volt, amelyek hidrogéncellák bipoláris lemezeinek szerkezeti tesztelésére alkalmazhatók a valós bipoláris lemezek költséges alakítószerszámának legyártása előtt. Kísérleteink célja egy olyan hibrid gyártástechnológia kifejlesztése, amellyel a fröccsöntött polimer kompozitok és a fémhabok kedvező tulajdonságai egyszerre használhatók ki. A bipoláris lemezben a fémhab kiváló elektromos- és hővezetéssel rendelkezik, ideális esetben a köré fröccsöntött polimer kompozit jó hővezető és kellő merevséget biztosít a lemeznek a cellák összeszerelésénél.

3.1. FÉM HABRA FRÖCCSÖNTÖTT MINTÁK GYÁRTÁSA

A próbatestek fröccsöntéséhez 80×10×4 mm befoglaló méretű próbatestek fröccsöntésére alkalmas négyfészkés fröccsöntő szerszámot használtunk. A gyártás első lépéseként a szerszám-üreg geometriájának megfelelő, 80×10 mm méretű darabokat munkáltunk ki a fémhab lemezből (3. ábra).

A polimert 200 °C hőmérsékletre, a fröccsöntő szerszámot 30 °C hőmérsékletre temperáltuk. A termékgyártás során a négyből kettő

△ 3. ábra: A fémhab lemezből kimunkált darabok

fészekbe elhelyezett nyílt cellás, 420 g/m²-es, 1,6 mm vastag nikkel habra fröccsöntöttünk.

A hidrogéncellák bipoláris lemezeinek funkciója többek között az elektronáramlás biztosítása. Ennek megfelelően a próbatest gyártás során célunk olyan minták létrehozása volt, amelyek jó elektromos vezetőképességgel rendelkeznek, miközben hővezető képességük is megfelelő.

A technológiai paraméterek optimalizálásánál célunk annak elérése, hogy a polimer ömledék csak részlegesen hatoljon be a hab pórusaiba. Ennek megfelelően a gyártás közben különböző paramétereket alkalmaztunk (1. táblázat).

Az 1. minta esetén a polimer ömledék nagy mértékben behatolt a fémhab pórusaiba. A fémhab lemez külső felületén jelentős mennyiségű polimer ömledék jelent meg, ami feltehetően a nagy befroccsöntési- vagy utónyomás következménye volt. Annak ellenőrzésére, hogy a kitöltési nyomás vagy az utónyomás bír jelentősebb hatással, a következő két minta (2. és 3. minta) esetén a fröccsöntési sebességet csökkentettük, ezzel csökkentve a kitöltési fázisban kialakuló nyomásértéket. A felületen megjelenő (látható) polimer mennyiség szignifikáns mértékben csökkent, ezzel igazolva a kitöltési nyomás jelentős hatását. A hatás ellenőrzésére ellentétes mértékben változtatott, tehát növelt sebességgel

Minta sorszáma	Technológiai paraméterek		
	v [cm³/s]	P _{befröccs} [bar]	P _{utó} [bar]
1	50	750	500
2	10	550	500
3	25	450	500
4	75	850	500
5	25	600	500
6	5	Részleges kitöltés (tervezetten)	
7	5	400	500
8	5	450	150
9	5	450	150



△ 4. ábra: A nyílt cellás nikkelhab szerkezete (nagyítás 100×)

(4. minta) további igazolást adtunk a kitöltési sebesség által létrehozott kitöltési nyomás hatásának. A 6. minta esetén részleges kitöltést alkalmaztunk, megvizsgálva, hogy atmoszférikus nyomáson haladó ömledékfront mennyire itatja át a fémhabot. A mikroszkópi vizsgálatok során megállapítottuk, hogy ebben az esetben sokkal kisebb az ömledék behatolása a fémhabba. A következő mintáknál (7. és 8. minta) a fröccsöntési sebességet a még megfelelő kitöltést eredményező legkisebb értéken tartva végeztük a gyártást, ami az eddigieknél is kisebb kitöltési nyomást eredményezett. Azt ellenőrizendő, hogy az utónyomásnak mekkora hatása van, egyik esetben (7. minta) az eddig is alkalmazott 500 bar utónyomást, majd a következőnél (8. minta) 150 bar utónyomást alkalmaztunk. Már szemmel is látható volt, hogy az eddigi-ekhez képest ez a változás kisebb hatást gyakorolt az átitatásra.

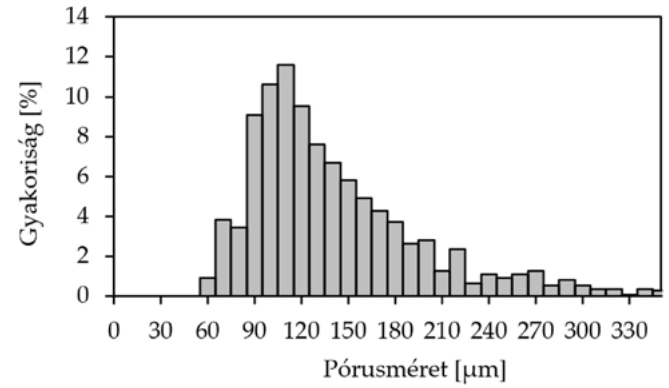
3.2. MINTÁK VIZSGÁLATA

A fémhab töltött polimer konstrukció bipoláris lemezként történő alkalmazásával elérhetővé válik a kívánt jó elektromos vezetőképesség melletti jelentős hővezető képesség a későbbi gázáramlási zónában. A fémhab lemez a cellában felszabaduló elektronok továbbításához szükségszerűen a minta felületén található. A technológiai paraméterekkel célunk annak elérése, hogy a polimer ömledék a hab pórusaiba csak olyan mértékben hatoljon be, hogy a gázok eloszlatása és a felületi elektronfelvétel megvalósulhasson.

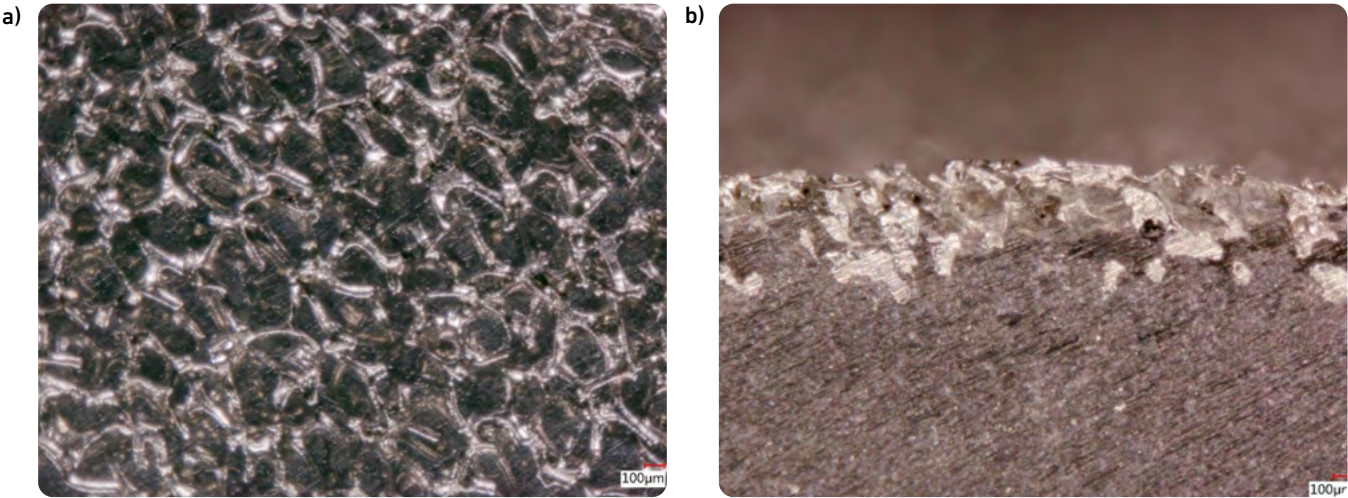
A minták vizsgálatához Keyence VHX-5000 optikai mikroszkópot használtunk. Először az érintetlen fémhab szerkezetét vizsgáltuk (4. ábra). Látható, hogy a nikkel hab nyílt cellás, a pórusai épek. Ezt követően a mikroszkóp segítségével a hab látszólagos pórusméretét határoztuk meg, ahol eredményként 216 µm átlagos pórusméret adódott (5. ábra).

A próbatestek optikai mikroszkópos vizsgálatához a polimerrel legjobban és a legkevésbé átitatott mintákat vizsgáltuk. A 3. minta esetén a felületen jelentős mennyiségű polimer látható (6.a ábra), vagyis az itt alkalmazott technológiai paraméterek nem voltak megfelelőek annak eléréséhez, hogy a minta felületén a hab pórusai kitöltetlenek maradjanak. A keresztmetszeti mikroszkópi képen (6.b ábra) látható, hogy a hab pórusai közé nagy mennyiségű polimer hatolt be, a hab felületén a pórusok jelentős deformációt szenvedtek a gyártás során.

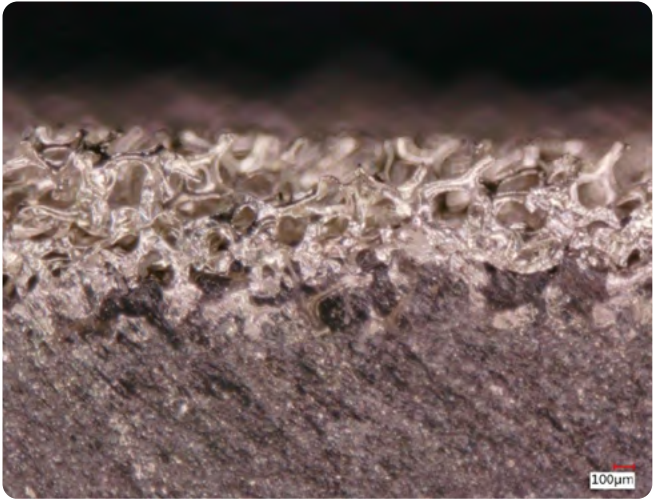
A 6. minta keresztmetszeti mikroszkópi képen (7. ábra) látható, hogy a fémhab felületi pórusai kevésbé deformálódtak a szerszámban, a habszerkezet sértetlenebb maradt. A polimer



△ 5. ábra: A hab pórusméreteloszlása



△ 6. ábra: A 3. minta hab oldali felülete (a) és keresztmetszete (b) (nagyítás 100×)

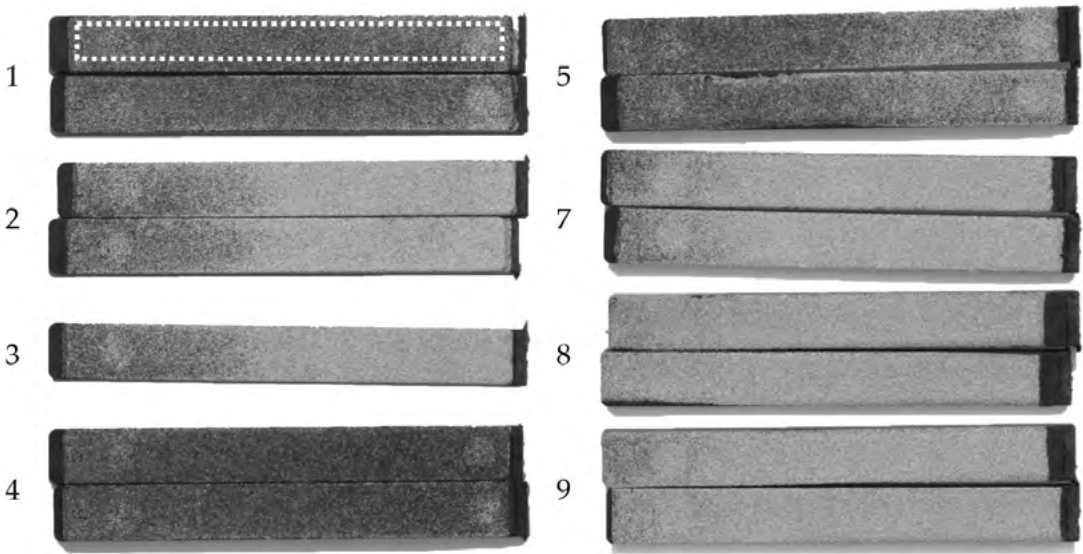


△ 7. ábra: A 6. minta keresztmetszete (nagyítás 100×)

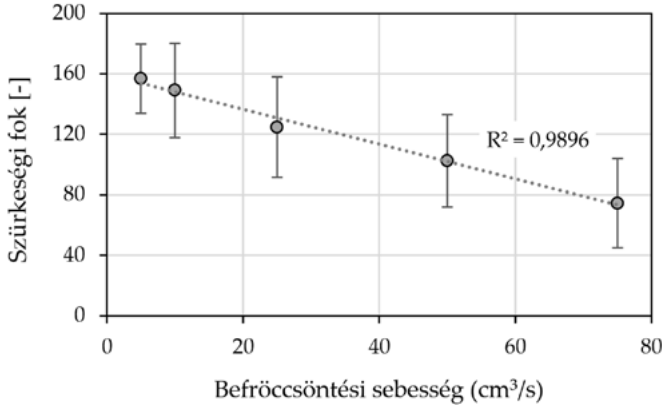
ömledék a gyártás során alkalmazott technológiai paraméterek felhasználásával arányaiban kevésbé hatolt be a fémhab pórusai közé. A kisebb deformáció és a fajlagosan kisebb behatolási mélység oka a fröccsöntéskor megvalósított részleges kitöltés és szerszámüregben jelentkező kisebb nyomások.

3.2.1. VIZSGÁLAT SZÜRKESEGI FOK ELEMZÉSEL

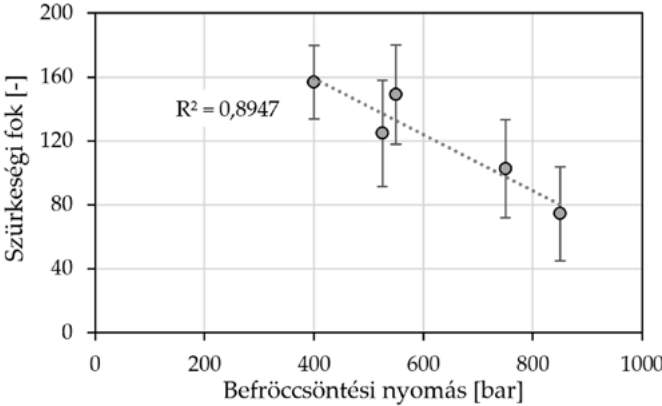
A minták vizsgálatára módszert alakítottunk ki, amivel a minták közti átítási különbség számszerűsíthető. A különböző technológia paraméterekkel fröccsöntött minták összehasonlításához optikai vizsgálatot dolgoztunk ki, amiben a minták felületének szürkeségi fokán keresztül elemezhető az átítási mértéke. Az optikai módszer lényege, hogy a polimer ömledék fekete, míg a fémhab világosszürke. A fémhabon áthatoló ömledék megváltoztatja annak színárnyalatát. A próbatetest színének elemzésével így megállapítható, hogy a polimer ömledék milyen mértékben itatta át a fémhabot.



△ 8. ábra: A síkágyas szkennelrel digitalizált minták



△ 9. ábra: A minták szürkeségi foka a befröccsöntési sebesség függvényében

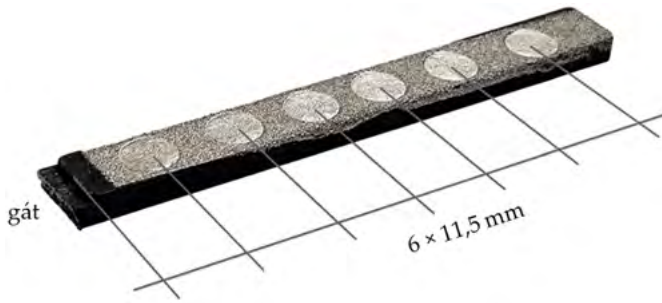


△ 10. ábra: A minták szürkeségi foka a befröccsöntési nyomás függvényében

A vizsgálat első lépéseként a fröccsöntött mintákról síkágyas szkennert alkalmazva digitális képet készítettünk (8. ábra). A mérés során a minták felületén egy azonos méretű (~350 000 pixelt tartalmazó) tartományban (téglalap szaggatott vonallal) szürkeségi fokot mértünk.

A próbatetek esetén megvizsgáltuk a befröccsöntési sebesség (9. ábra) és befröccsöntési nyomás (10. ábra) hatására bekövetkező szürkeségi fok változásokat. A befröccsöntési sebesség és a befröccsöntési nyomás növelésével is csökken a szürkeségi fok, ami a fémhab nagyobb átítását jelenti. Ekkor a nagyobb nyomás hatására a polimer ömledék nagy mértékben kitölti a fémhab pórusait, jelentős mennyiségben kijuthat a próbatest felületére is. Nagy szürkeségi fokok esetén, kis fröccsöntési sebességeknél (fröccsöntési nyomásoknál) a polimer ömledék kisebb behatolása tapasztalható. Ezekben az esetekben a hab pórusainak nagy részét nem tölti ki a polimer ömledék fröccsöntés közben.

Az utónyomás hatásának vizsgálatához összehasonlítottuk az azonos fröccsnyomással (befröccsöntési sebességgel), de eltérő utónyomással gyártott minták szürkeségi fokait. Kétmintás t-próbával igazoltuk (95%-os szignifikancia szinten), hogy az utónyomás értékében bekövetkező jelentős változás nem okozott szignifikáns eltérést a minták szürkeségi fokaiban. A fröccsöntési sebesség (nyomás) szerepe jelentős a fémhabra fröccsöntött próbatetek szürkeségi foka, vagyis polimerrel történő átítása tekintetében. Az utónyomás nagyságának hatása elhanyagolható a kitöltési nyomással szemben. Az utónyomás a próbatetek fajtérfogatát és tömegét jelentősen befolyásolja, a fémhab átítására azonban nincs szignifikáns hatással. Ennek oka az lehet, hogy a fémhab jó hővezetőképessége miatt helyileg nagy



△ 11. ábra: A nyomóvizsgálat pozíciói egy próbatesten

mennyiségű hőt képes elvonni a polimertől és a hab pórusai között a polimer dermedése valószínűleg már megtörténik az utónyomás kezdetéig. A ledermedt anyagmennyiség az utónyomás hatására már nem képes átítatni a fémhab pórusait.

3.2.2. NYOMÓVIZSGÁLAT

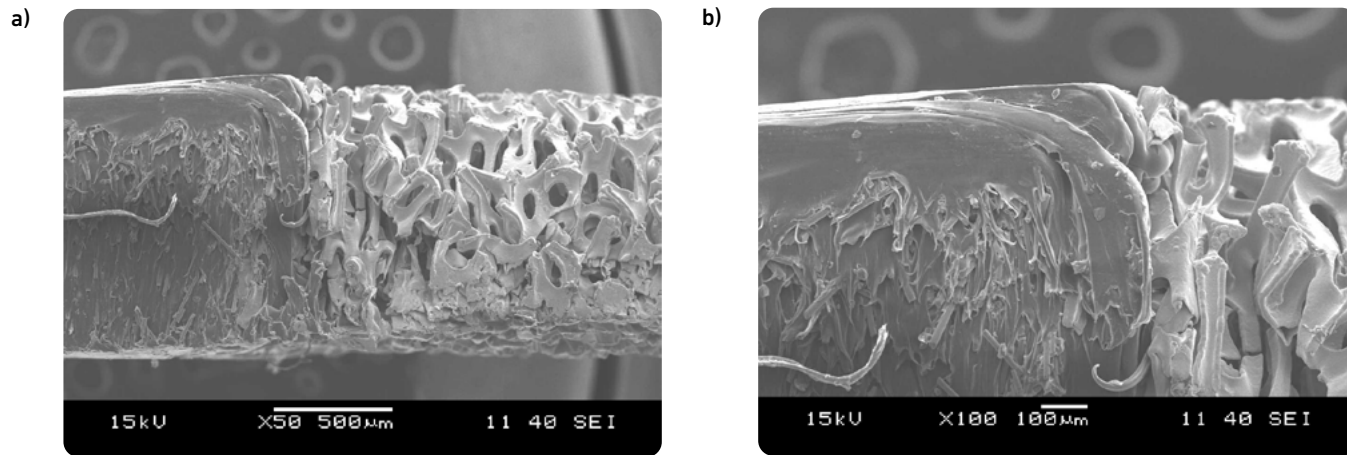
A fémhabra fröccsöntött bipoláris lemezeknél egyik legjelentősebb a cellát érő nyomó igénybevétel. A minták nyomó igénybevétellel szembeni viselkedésének elemzése céljából nyomóvizsgálatokat végeztünk. A próbatetek vizuális vizsgálata során egyes minták esetén jelentős különbség mutatkozott az átításban a folyási út elején és végén. A próbatetek nyomó igénybevétellel szembeni ellenállásának elemzéséhez minden próbatesten 6 nyomásmérést végeztünk (11. ábra).

A nyomásmérést a fröccsöntött és a fémhabra fröccsöntött próbatetekben, illetve a fémhab lemezen is elvégeztük.

A Ni hab szerkezete már csekély, körülbelül 1 MPa (10 bar) nyomás hatására deformálódhat, fröccsöntési alkalmazáshoz, a szerszámüregben uralkodó nagy nyomásoknak való ellenálláshoz nagyobb merevségű hablemez szükséges. Ez a típusú Ni hab csak olyan beépítésben alkalmazható, ahol merev szerkezetbe utólagosan illesztik be és nem kell teherviselő funkciót betöltenie a hidrogéncella működése közben. Bipoláris lemezek gyártásakor a fémhab minél kevésbé átítatott pórusszerkezetének eléréséhez kis fröccsöntési nyomás és utónyomás célszerű, hosszú folyási utak esetén azonban jelentős beszívódások jelenhetnek meg a terméken. A beszívódások hatására a tömítettség gyengülhet, a bipoláris lemez így nem felel meg az alkalmazási feltételeknek. A gyártástechnológia meghatározása során kellően nagy nyomások alkalmazása szükséges a beszívódások elkerüléséhez, de szükségszerűen kicsi a hab pórusainak kis mértékű kitöltéséhez. Ennek az ellentmondásnak a feloldására lehet, hogy a technológia vagy a szerkezet megváltoztatása szükséges. Ilyen lehet a többkomponensű fröccsöntés alkalmazása vagy az utólagos szerelési technológia.

3.2.3. VIZSGÁLAT PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓPPAL

Az optikai mikroszkópos vizsgálat során a mintákban megtalálható sötét polimer és világos fémhab térrészek megnehezítették a jó minőségű, kontrasztos képek készítését. A megvilágítás



△ 12. ábra: Az ömledékfront és a fémhab találkozási részleges kitöltéssel gyártott próbatestnél 50× (a) és 100× (b) nagyításban

beállításakor a polimer és fémhab részek egyszerre történő élesztését a jelentős színeltérés akadályozta. A lapka próbatesztekben a fémhab és a polimer kapcsolatának vizsgálata céljából pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket készítettünk. A tervezetten részleges kitöltéssel, a folyási út végén elhelyezett fémhab lemezzel gyártott próbatest esetén a polimer ömledék nem hatolt be nagy mértékben a fémhab pórusaiba (12.a ábra). Látható, hogy az ömledékfront a fémhabhoz érve megállt, a két alkotó élesen elkülönül egymástól (12.b ábra).

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánkban a hidrogén üzemanyagcellákban alkalmazható bipolaris lemezek fejlesztésére koncentráltunk, amelyeknél a fémhab és a polimer kompozitok kombinációját vizsgáltuk. Célunk az volt, hogy a hagyományos grafit és fém bipolaris lemezek problémáira, mint a törékenységre, költséges gyártásra és túl nagy tömegre, hatékony megoldást találjunk. Egy könnyebb és hatékonyabb bipolaris lemez létrehozásához végeztünk előkísérleteket, amely javíthatja a cellák teljesítményét. A kutatás során vizsgáltuk a különböző fröccsöntési technológiával gyártott minták esetében a polimer behatolását a fémhab pórusaiba. Eredményeink azt mutatták, hogy a fröccsöntési sebesség és kitöltési nyomás nagy mértékben befolyásolja a polimer behatolási mértékét, és a megfelelő paraméterek alkalmazásával a fémhabos bipolaris lemezekben megőrizhető a habszerkezet, ezzel elérhető lehet a gáz megfelelő áramlása. Összességében a fémhab és polimer kompozitok kombinálása ígéretes alternatívát nyújt a hagyományos bipolaris lemezekhez képest és lehetővé teszi könnyebb, hatékonyabb szerkezetek létrehozását, miközben a gyártási folyamat tovább javítható a költséghatékonyság érdekében.

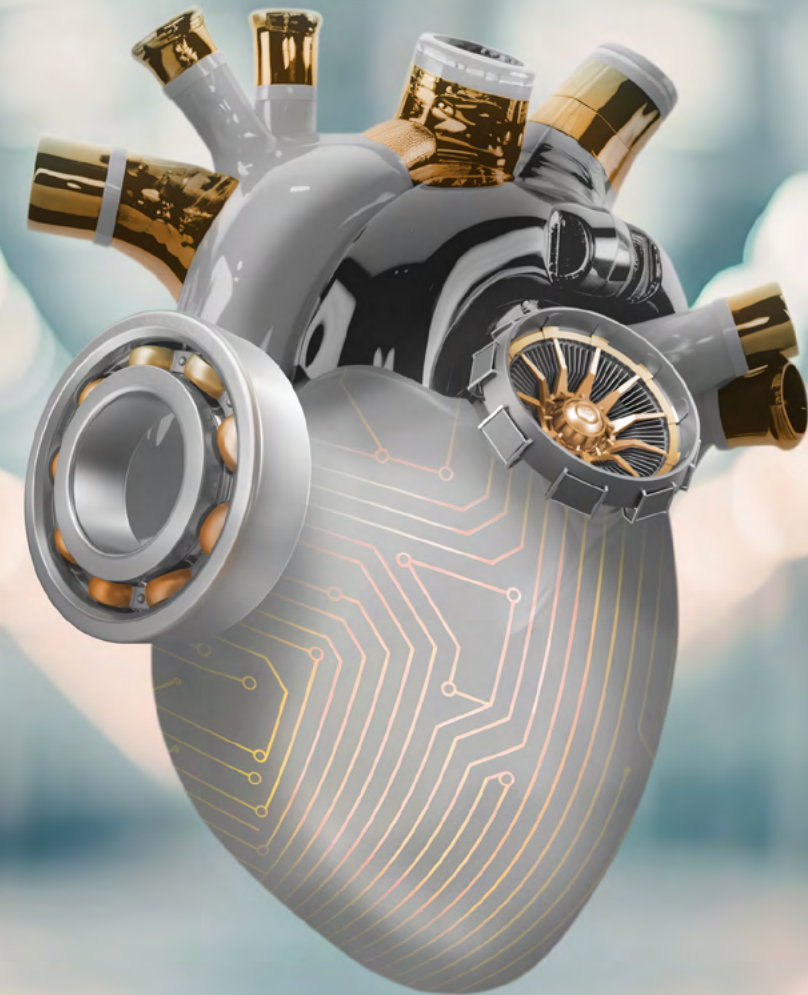
IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Sopian K., Daud W. R. W.: Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells. Renewable Energy, 31, 719-727 (2006).
- [2] Neef H. J.: International overview of hydrogen and fuel cell research. Energy, 34, 327-333 (2009).
- [3] Fan L., Tu Z., Chan S. H.: Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. Energy Reports, 7, 8421-8446 (2021).
- [4] Song Y., Zhang C., Ling C. Y., Han M., Yong R. Y., Sun D., Chen J.:

Review on current research of materials, fabrication and application for bipolar plate in proton exchange membrane fuel cell. International Journal of Hydrogen Energy, 45, 29832-29847 (2020).

- [5] Foorginezhad S., Mohseni-Dargah M., Falahati Z., Abbassi R., Razmjou A., Asadnia M.: Sensing advancement towards safety assessment of hydrogen fuel cell vehicles. Journal of Power Sources, 489, 1-22, 229450 (2021).
- [6] Zarmehri E., Sadeghi M., Mehrabani-Zeinabad A.: Construction of Composite Polymer Bipolar Plate for Pem Fuel Cell. Iranica Journal of Energy & Environment, 4, 357-360 (2013).
- [7] Awin Y., Dukhan N.: Experimental performance assessment of metal-foam flow fields for proton exchange membrane fuel cells. Applied Energy, 252, 113458 (2019).
- [8] Cunningham B. D., Baird D. G.: Development of bipolar plates for fuel cells from graphite filled wet-lay material and a compatible thermoplastic laminate skin layer. Journal of Power Sources, 168, 418-425 (2007).
- [9] Taherian R.: A review of composite and metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cell: Materials, fabrication, and material selection. Journal of Power Sources, 265, 370-390 (2014).
- [10] Awin Y., Dukhan N.: Metal-Foam Bipolar Plate for PEM Fuel Cells: Simulations and Preliminary Results. Materials Science Forum, 933, 342-350 (2018).
- [11] Antunes R. A., Oliveira M. C. L., Ett G., Ett V.: Carbon materials in composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells: A review of the main challenges to improve electrical performance. Journal of Power Sources, 196, 2945-2961 (2011).
- [12] Carton J. G., Olabi A. G.: Representative model and flow characteristics of open pore cellular foam and potential use in proton exchange membrane fuel cells. International Journal of Hydrogen Energy, 40, 5726-5738 (2015).
- [13] Kumar A., Reddy R. G.: Materials and design development for bipolar/end plates in fuel cells. Journal of Power Sources, 129, 62-67 (2004).
- [14] Tseng C. J., Tsai B. T., Liu Z. S., Cheng T. C., Chang W. C., Lo S. K.: A PEM fuel cell with metal foam as flow distributor. Energy Conversion and Management, 62, 14-21 (2012).
- [15] Park J. E., Hwang W., Lim M. S., Kim S., Ahn C. Y., Kim O. H., Shim J. G., Lee D. W., Lee J. H., Cho Y. H., Sung Y. E.: Achieving breakthrough performance caused by optimizes metal foam flow field in fuel cells. International Journal of Hydrogen Energy, 44, 22074-22084 (2019).
- [16] Xu Y., Wang X., Hao Q.: A mini review on thermally conductive polymers and polymer-based composites. Composites Communications, 24, 1-11, 100617 (2021).
- [17] Ruan K., Shi X., Guo Y., Gu J.: Interfacial thermal resistance in thermally conductive polymer composites: A review. Composites Communications, 22, 1-12, 100518 (2020).
- [18] Li S., Zheng Q., Lv Y., Liu X., Wang X., Huang P. Y., Cahill D. G., Lv B.: High thermal conductivity in cubic boron arsenide crystals. Science, 361, 579-581 (2018).
- [19] He X., Wang Y.: Recent Advances in the Rational Design of Thermal Conductive Polymer Composites. Industrial & Engineering Chemistry Research, 60, 1137-1154 (2021).

Szenvedélytől vezérelve.



IPAR NAPJAI
12. Nemzetközi ipari szakkiállítás



2025. május 13-16.

GL **evente** **hungexpo**

IPAR NAPJAI Nemzetközi ipari szakkiállítás

Társrendezvény: AUTOMOTIVE HUNGARY
Nemzetközi járműipari beszállítói szakkiállítás

Második kedvezményes jelentkezési határidő kiállítók részére: 2025. február 28.

Helyszín: HUNGEXPO Budapest Kongresszusi és Kiállítási Központ

Bővebb információ: www.iparnapjai.hu