



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

CSEPEL ZSÓFIA LUCA

TDK DOLGOZAT

FÉM HAB ÉS FRÖCCSÖNTÉS KOMBINÁLÁSA BIPOLÁRIS
LEMEZHEZ

Témavezető:

Dr. Kovács József Gábor

egyetemi docens

Dr. Orbulov Imre Norbert

egyetemi tanár

BUDAPEST, 2023

TARTALOMJEGYZÉK

Jelölések jegyzéke	iv
1. Bevezetés	2
2. Szakirodalmi áttekintés.....	4
2.1. Hidrogéncella	4
2.1.1. <i>Működése</i>	4
2.1.2. <i>Alkalmazása</i>	6
2.1.3. <i>Technológia kihívásai</i>	7
2.2. Bipoláris lemezek.....	8
2.2.1. <i>Grafít bipoláris lemez</i>	9
2.2.2. <i>Fém bipoláris lemez</i>	9
2.2.3. <i>Polimer kompozit bipoláris lemez</i>	11
2.2.4. <i>Fémhab bipoláris lemez</i>	11
2.3. Fémhabok.....	13
2.3.1. <i>Fémhabok jellemzői</i>	14
2.3.2. <i>Fémhabok előállítása</i>	15
2.4. Vezetőképes polimerek, polimer kompozitok.....	16
2.4.1. <i>Hővezető polimerek és polimer kompozitok</i>	16
2.4.2. <i>Elektromosan vezető polimerek és polimer kompozitok</i>	20
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések	24
3.1. Felhasznált alapanyagok	24
3.2. Alkalmazott berendezések és vizsgálati módszerek.....	24
3.2.1. <i>Fröccsöntés</i>	24
3.2.2. <i>Szürkeségi fok elemzés</i>	24
3.2.3. <i>Nyomóvizsgálat</i>	25
3.2.4. <i>Optikai mikroszkóp</i>	25
3.2.5. <i>Pásztázó elektronmikroszkóp</i>	25

4. Kísérleti/fejlesztési rész	26
4.1. Fémhabra fröccsöntött minták gyártása.....	26
4.2. Minták vizsgálata.....	29
4.2.1. <i>Vizsgálat optikai mikroszkóppal</i>	29
4.2.2. <i>Vizsgálat szűrkeségi fok elemzéssel</i>	32
4.2.3. <i>Nyomóvizsgálat</i>	35
4.2.4. <i>Vizsgálat pásztázó elektronmikroszkóppal</i>	40
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	42
5.1. Magyar nyelvű összefoglaló	42
5.2. További megoldásra váró feladatok.....	43
6. Felhasznált források	44

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
A	keresztmetszet (cross section)	mm ²
F	nyomóerő (compression force)	N
L	hossz (length)	mm
p	nyomás (pressure)	bar
P _{befröccs}	befröccsöntési nyomás (injection pressure)	bar
P _{utó}	utónyomás (holding)	bar
R	elektromos ellenállás (electrical resistance)	Ω
tömeg%	tömegszázalék (weight percentage)	%
v	befröccsöntési sebesség (injection velocity)	cm ³ /s
Δh	összenyomódás (compression)	mm

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
σ	fajlagos elektromos vezetőképesség (specific electrical conductivity)	Scm ⁻¹
λ	hővezetési tényező (thermal conductivity factor)	Wm ⁻¹ K ⁻¹
ρ	fajlagos elektromos ellenállás (specific electrical resistance)	Ωcm

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
3D	háromdimenziós (three dimensional)
5G	ötödik generáció (fifth generation)
AFC	lúgos üzemanyagcella (alkaline fuel cell)
Ag	ezüst (ezüst)

Al	alumínium (aluminium)
Al ₂ O ₃	alumínium-oxid (aluminium oxide)
AlN	alumínium-nitrid (aluminium nitride)
BN	bór-nitrid (boron nitride)
BNNS	bór-nitrid nanoréteg (boron nitride nanosheet)
CF	szénszál (carbon fiber)
CNT	szén nanocső (carbon nanotube)
Cr	króm (chrome)
CrN	króm-nitrid (chromium nitride)
Cu	réz (copper)
EP	epoxi (epoxy)
FC	üzemanyagcella (fuel cell)
FCV	üzemanyagcellával működő gépjármű (fuel cell vehicle)
GDL	gázdiffúziós réteg (gas diffusion layer)
GO	grafén-oxid (graphene oxide)
GP	grafit por (graphite powder)
ICR	érintkezési ellenállás (interfacial contact resistance)
ITR	határfelületi hőellenállás (interfacial thermal resistance)
MCFC	olvasztott karbonátos üzemanyagcella (molten carbonate fuel cell)
Mn	mangán (manganese)
MWCNT	többrétegű szén nanocső (multiwall carbon nanotube)
NaBH ₄	nátrium-borohidrid (sodium borohydride)
NbN	nióbium-nitrid (niobium nitride)
NH ₃ BH ₃	ammónium-borán (ammonia borane)
Ni	nikkel (nickel)
PA	poliamid (polyamide)
PA	poliacetilén (polyacetylene)
PAFC	foszforsavas üzemanyagcella (phosphoric acid fuel cell)
PANI	polianilin (polyaniline)
PEEK	poli(éter-éter-keton) (poly(ether-ether-ketone))
PEM	protoncserélő membrán (proton exchange membrane)
PI	poliimid (polyimide)
PLA	politejsav (polylactic acid)
PMMA	polimetil-metakrilát (polymethyl methacrylate)
PP	polipropilén (polypropylene)

PPP	poli(p-fenilin) (poly(p-pheniline))
PPY	polipirrol (polypyrrole)
PS	polisztirol (polystyrene)
PTFE	poli(tetrafluoretilén) (polytetrafluoroethylene)
PTh	politiofén (polythiophene)
PVA	polivinil-alkohol (polyvinyl alcohol)
PVDF	polivinilidén-fluorid (polyvinylidene fluoride)
SCF	rövid szénszál (short carbon fiber)
SiC	szilícium-karbid (silicon carbide)
SiN	szilícium-nitrid (silicon nitride)
SOFC	szilárdoxidos üzemanyagcella (solid oxide fuel cell)
Ti	titán (titanium)
TiN	titán-nitrid (titanium nitride)
V	vanádium (vanadium)

1. BEVEZETÉS

Manapság egyre fontosabbá válnak a környezetterhelést mérséklő eljárások és intézkedések. A fosszilis erőforrás-tartalék jövőbeli csökkenése, kimerülése felveti azt a problémát, hogy idővel nem lesz képes fedezni a világ energiaigényét. Az erőforrás mennyiségének csökkenése, valamint a használatokor keletkező káros, üvegházhatású gázkibocsátás igényt teremt új típusú energiaforrások kutatására. Számos tanulmány készült alternatív, megújuló erőforrásokkal kapcsolatban, melynek célja a jövő energiaigényének fedezése fenntartható módon. Ilyen erőforrások közé tartozik a nap-, szél-, víz-, geotermikus és nukleáris energia, valamint a biomasszából, illetve a hidrogénből nyerhető energia. A hidrogén felhasználásának egy lehetséges módja üzemanyagcella készítése, amely ígéretes alternatíva a jövő energiaellátása szempontjából. Az üzemanyagcella olyan fenntartható energiaforrás, amelynek károsanyag-kibocsátása kicsi, megközelítheti a nullát [1].

Az üzemanyagcellák elektrokémiai berendezések, amelyek a cellában található üzemanyagot átalakítva egyenáramot hoznak létre. Tiszta hidrogén üzemanyag használatokor működés közben melléktermékként csak víz és hő keletkezik, ami vonzóvá teszi a technológiát a károsanyag – többek között szén-dioxid – kibocsátás jövőbeli mérséklése tekintetében [2]. Számos különböző típusú üzemanyagcella létezik, a legígéretesebbnek a protonátértesztő membrános (PEM – Proton Exchange Membrane) cella bizonyul [3]. A hidrogén és az üzemanyagcella a jövő közlekedése szempontjából bírhat nagy jelentőséggel, használatával a közlekedési eszközök kibocsátása és a jelenleg használt nem megújuló üzemanyagoktól való függés csökkenthető lehet [4].

Az üzemanyagcellák egyik legfontosabb alkotóeleme a bipoláris lemez, aminek tulajdonságai jelentős hatással vannak a használhatóság és hatékonyság szempontjából és befolyásolják a cella árát is [5]. A bipoláris lemezeket gyakran grafitból készítik, az utóbbi években azonban költséghatékonyabb eljárások és alapanyagok jelentek meg [6]. A grafitlemez törékenysége miatt nem ideális például járművekben történő alkalmazásra a járművet érő rezgések miatt. A hagyományos (például grafit) bipoláris lemezekben a közegek áramlása a lemezbe munkált mikrométeres nagyságrendű csatornákon keresztül történik, amik kimunkálása költséges. Ennek megoldására egy lehetséges alternatíva a nyílt cellás fémhabok alkalmazása, ahol az áramlás a hab nyílt celláin át történik [7]. Fémhab lemezek használatával a cella teljesítménye nagy mértékben növelhető a hagyományos grafit lemezekhez képest [8].

Célom, egy olyan – üzemanyagcellában használható – bipoláris lemez létrehozása, amely magában hordozza a fémhabok és a polimer kompozitok kedvező tulajdonságait és előállítása gazdaságos, a lehető legkevesebb lépésből áll. Ennek érdekében további célom a fémhabra való ráfröccsöntés tesztelése az egylépéses gyártástechnológia kialakításának megalapozásához.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. 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 [9].

2.1.1. Működése

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 elektrolittól 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) [10]. A különböző típusok közül a legtöbb figyelmet a protonáteresztő membrános (PEM) hidrogéncella kapja. 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 [3]. Az üzemanyagcellában két elektróda található, az anód és a katód, az ezekben kialakított csatornában hidrogén (redukáló közeg) és oxigén (oxidáló közeg) halad keresztül. Az anódon a hidrogén oxidációs reakciója során pozitív töltésű kationok keletkeznek, amelyek az elektroliton keresztül a katódhoz vándorolnak, a leszakadó szabad elektronok a külső áramkörbe kerülnek.

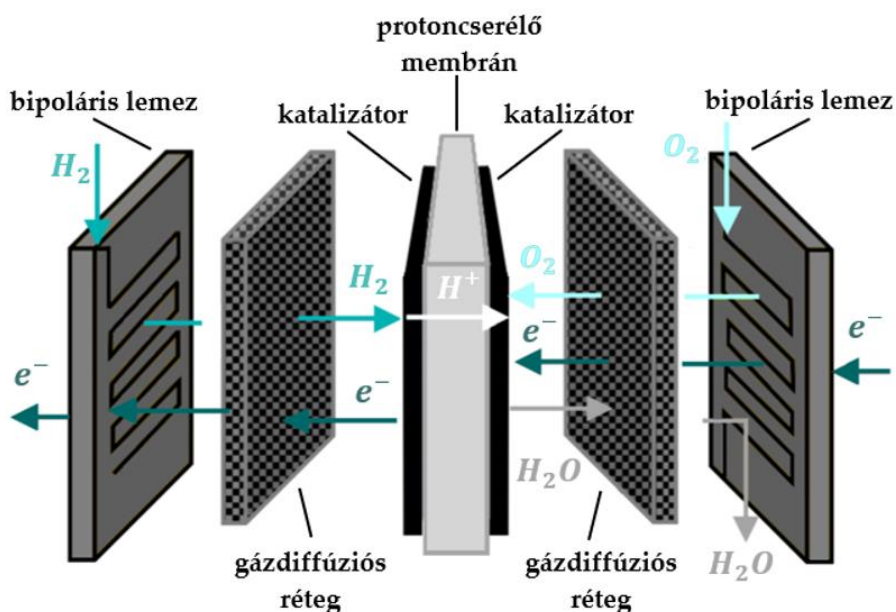


Ezzel egyidőben a katódon redukációs reakció zajlik le, amely során a betáplált oxigénből a kationok és elektronok hatására víz keletkezik.



Ez a redoxireakció teszi lehetővé, hogy a hidrogén és az oxigén kontrolláltan, irányított körülmények között menjen végbe, robbanásveszély nélkül. A reakció eredményeként víz, hő és elektromos áram keletkezik [10].

Az üzemanyagcella felépítése az 1. ábrán látható. Az elektrolitot egy polimer membrán alkotja, aminek a gázáteresztő képessége kicsi, így meggátolja a gáz közegek átáramlását. Protonok szempontjából a membrán vezetőképes, vastagsága átlagosan 5-200 μm . A gázok az üzemanyagcellák bipoláris lemezeinek kimunkált csatornáin vagy pórusain keresztül jutnak be a cellába és oszlanak el egyenletesen. A membrán oldalán egy gázdifúziós réteg (GDL - Gas Diffusion Layer) található, amely általában valamilyen vezetőképes, porózus anyagból készül. A GDL számos funkcióval rendelkezik, többek között a gázeloszlás további javítása, illetve a keletkező víz felületen való megkötése. A GDL és a membrán a redoxireakció támogatása érdekében katalizátorral van bevonva, amely általában platina vagy ennek valamilyen ötvözeté [11].



1. ábra A hidrogéncella felépítése [12] alapján

2.1.2. Alkalmazása

A PEM üzemanyagcellákat három fő területen tartják ígéretesnek a nagy energiasűrűségüknek köszönhetően: a közlekedésben, helyhez kötött lakossági felhasználásban és hordozható alkalmazásban. Japánban nagy hangsúlyt fektetnek az üzemanyagcella gépjárművekben történő alkalmazásának fejlesztésére, az Európai Unióban buszok és vonatok felé irányulnak a kutatások [3].

A járműiparban 2008-ban a Toyota Motor Corporation fejlesztéseként megjelent egy üzemanyagcellával működő gépjármű (FCV-Fuel Cell Vehicle), amelyben a cellák arany bevonattal ellátott rozsdamentes acél bipolaris lemezeket tartalmaztak. A méret és a költségek optimalizálásának eredményeképp 2014-ben a bipolaris lemezek alapanyagát rozsdamentes acélról titánra cserélték, szén védőbevonatot alkalmaztak. A Toyota által ekkor került forgalomba a világ első sorozatgyártott üzemanyagcellával meghajtott járműve, a „Mirai” (2.a. ábra) [13].



2. ábra A második generációs hidrogénhajtású Toyota Mirai (a) és az autó hajtásrendszere (b) [13]

A tengeri navigációban az akkumulátorok véges üzemidejére való tekintettel megjelent az üzemanyagcella segítségével működő navigációs rendszer. Beckhaus és társai [14] hosszútávú hajóutakon használható rendszert hoztak létre, amellyel az út során a folyamatos energiaellátás biztosítható. A cellákban fröccsöntött kompozit bipolaris lemezeket alkalmaztak.

Az üzemeltetéshez szükséges nagy mennyiségű energia (elektromos áram, fűtés) miatt Song és társai [3] az épületeket is felelősnek tartják az üvegházhatású gázkibocsátásban. Mamaghani és társai [15] szerint Európában a teljes üvegházhatású gázkibocsátás mintegy 36%-a az épületekhez köthető. Állításuk szerint megoldást jelenthetek erre a problémára az üzemanyagcellákból létrehozott energiatermelő rendszerek, amelyekkel környezetbarát módon válhat megoldhatóvá az épületek fűtés- és elektromos ellátása.

2.1.3. Technológia kihívásai

A hidrogén tiszta, megújuló energiaforrás, használatához azonban számos kihívás leküzdése szükséges. Hidrogén használatával lehetőség nyílna a jövőbeli karbonsemlegesség felé, az üzemanyag szabta korlátok szem előtt tartása azonban szükséges. Mori és Hirose [16] szerint a járműipar hidrogénnel szembeni követelményei a következők: biztonság, teljesítmény, költséghatékonyság, igazodás az infrastruktúrához, méretezhetőség (kis és nagy járművekhez egyaránt). A hidrogén tömegre fajlagosítva nagy (120 MJ/kg) energiasűrűséggel rendelkezik a benzinhoz (44 MJ/kg) képest [17]. Energiatartalma megegyező térfogatot tekintve a benzin energiatartalmának 1/10 részének felel meg, így a járművekben nagy mennyiségű hidrogén tárolása szükséges. A járműiparban a hidrogén széles körű használatához az egyik legfontosabb megoldásra váró feladat a tárolásának megfelelő kidolgozása, amely megfelel az iparág feltételeinek. Állításuk szerint jelenleg a hidrogéntárolás megoldható nagynyomású tartályok alkalmazásával, folyékony hidrogén tartállyal vagy hidrogén elnyelésére képes ötvözetek használatával. A jelenleg tesztelés alatt álló és a már forgalomba hozott járművek (Honda, Toyota, Mercedes-Benz modellek) nagy része nagynyomású hidrogén tartállyal rendelkezik egyszerű felépítése és könnyű feltölthetősége miatt. A nagynyomású tartályok szénszál erősítésű polimer kompozitból készülnek, amelyek akár 35-70 MPa nyomásnak is ellenállnak. A hidrogéngáz atmoszférikus nyomáson 20 K hőmérséklet alá hűtve cseppfolyósítható, sűrűsége növelhető, amely a tárolás és szállítás szempontjából kedvező. A folyékony hidrogéntartály a kis, forráspont alatti hőmérsékletű (<20 K) közeg megfelelő hőszigetelésének elérése érdekében dupla falú. Hidrogénelnyelő ötvözetek alkalmazásával nagyobb mennyiségű hidrogén tárolása lehetséges, az elnyelt hidrogén tömege azonban a járműbe helyezendő tartály tömegének csupán töredéke. Számos ötvözet alkalmas a hidrogén elnyelésére, például Ti-V-Mn, Ti-V-Cr, Ti-V-Cr-Mn és Ti-Cr. Ezek az ötvözetek akár 2,8 tömeg% hidrogén elnyelésére is képesek, az elnyeléskor keletkező nagy hőmennyiség azonban nehézséget jelent [16]. Hwang és Varma [17] szerint számos olyan vegyület is létezik, amely kémiai reakció során nagy mennyiségű hidrogént generál (például NaBH_4 , AB, NH_3BH_3). Alkalmazásuk előnyös lehet, energiasűrűségük nagy az alkotó elemek kis tömege miatt, a folyamat azonban irreverzibilis és beavatkozást igényel az újbóli használat előtt. Ezekkel a vegyületekkel akár 19,6 tömeg% hidrogén is kinyerhető és ez körülbelül 3 óra üzemanyag-ellátást biztosít. Li és társai [18] szerint a járműipari alkalmazáshoz elengedhetetlen, hogy a hidrogén üzemanyagtartály feltöltése gyors és biztonságos legyen. A hidrogénhajtású járművekre

vonatkozó szabályzás szerint biztosítani kell, hogy 5-7 kg hidrogén biztonságosan betölthető legyen 3-5 percen belül. Állításuk szerint a gyakran alkalmazott nagynyomású tartály ilyen módon történő feltöltése azonban nagy mértékű, gyors belső hőmérséklet-növekedést okoz, ami biztonsági problémákhoz és a tartály károsodásához vezethet.

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 bediffundálni számos anyagba, rontva ezzel a mechanikai tulajdonságokat és ridegítve az anyagot. Foorginezhad és társai [19] szerint a hidrogén nagy nyomáson a legtöbb anyagban károsodást okoz, manapság a legellenállóbb anyagnak a nagy krómtartalmú acélokat, króm-molibdén tartalmú acélokat és a polimer mátrixú kompozitokat tekintik.

A kívánt karbonsemlegesség eléréséhez a hidrogén, mint üzemanyag előállításának módja is kulcsfontosságú. Az ún. szürke hidrogén előállításakor fosszilis erőforrásokat használnak fel, a gyártási folyamat során jelentős károsanyag-mennyiség kerül a légkörbe. A megújuló erőforrásból előállított ún. zöld hidrogén gyártásakor ezzel ellentétben nem képződnek káros anyagok. Ilyen gyártási mód a víz elektrolízisével történő hidrogén-előállítás. Hidrogén előállítása biológiai úton is lehetséges, a biohidrogént mikroorganizmusok hozzák létre vízmolekulák és szerves vegyületek átalakításával különböző enzimek segítségével. Kovac és társai [20] szerint hulladékgazdálkodási szempontból a biohidrogén előállítása kedvező hidrogéngyártási módnak ígérkezik. Állításuk szerint az Európai Unió intézkedéseiben (EU Hydrogen Strategy) is jelentős hangsúlyt fektet a nagy mennyiségű zöld hidrogén gyártására és célja, hogy a 2050-re a tagállamok teljes karbonsemlegességet érjenek el.

2.2. 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 [5]. Kutatások alapján a bipoláris lemezek a teljes üzemanyagcella

tömegének 40-80%-át, költségének 30-37%-át adják, így alapanyagának megválasztása rendkívül nagy jelentőségű [21].

Annak érdekében, hogy a bipoláris lemez a kitűzött feladatait teljesíteni tudja, alapanyagának számos feltételnek meg kell felelnie. Cunningham és társa [22] szerint a lemezek alapanyagának a következő követelményeknek kell eleget tennie: jó elektromos vezetőképesség ($> 100 \text{ S/cm}$), kis permeabilitás, korrózióállóság, megfelelő szakítószilárdság ($> 41 \text{ MPa}$), megfelelő hajlítószilárdság ($> 59 \text{ MPa}$), nagy hővezetőképesség ($> 10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), kémiai stabilitás, kis hőtágulás, hatékony feldolgozhatóság.

2.2.1. Grafit bipoláris lemez

Taherian [6] szerint a bipoláris lemezeket gyakran grafitból készítik, az utóbbi években azonban költséghatékonyabb eljárások és alapanyagok jelentek meg. A grafit elektromos vezetőképessége és korrózióállósága megfelelő a bipoláris lemezként való alkalmazásra, sűrűsége kicsi, precíz feldolgozása azonban költséges és bonyolult. A grafit lemezeket általában szén vagy grafit porból grafitosítással gyártják, szigorú körülmények között körülbelül $2500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten. A gyártás során a grafitlemezben üregek jelenhetnek meg, amelyek a PEM üzemanyagcellában szivárgáshoz vezethetnek, ami a cella teljesítménycsökkenését eredményezheti. Emiatt a porózus grafit lemezek utókezelést igényelnek. A mechanikai teherbírást tekintve a fém, illetve polimer kompozit lemezekhez képest a grafit jelentősen törékenyebb [23]. Awin és Dukhan [8] szerint emiatt nem felelnek meg például járművekben történő alkalmazásra a járművet érő rezgések miatt. Állításuk szerint a kis hajlítószilárdság és törékenysége miatt grafitból minimum 4-6 mm vastagságú lemezek készítésére szükség van, ami csekély energiasűrűséghez vezet, így széleskörű alkalmazását ez is gátolja. Lei és társai [24] szerint a grafit megmunkálása réteges szerkezetéből fakadóan nehézkes és a szerszámon jelentkező koptató hatás jelentős, ami a szerszám élettartamának csökkenéséhez vezet.

2.2.2. Fém bipoláris lemez

A bipoláris lemezek alapanyagaként használt fémes anyagokra jellemző a kiváló elektromos és hővezetőképesség, kedvező mechanikai tulajdonságok, könnyű feldolgozhatóság, kis költség, kis vastagságú és tartós szerkezet kialakításának lehetősége. Song és társai [3] szerint az utóbbi években számos kutatás készült fém alapanyagú bipoláris lemezekkel kapcsolatban.

A kutatások eredményeképp több fém, illetve fémötvözet is alkalmasnak bizonyul, például az alumínium, titán, rozsdamentes acél, szénacélok, réz-, nikkel-, alumíniumötvözetek. Joseph és társai [25] szerint az üzemanyagcellák bipoláris lemezeinek savas ($\text{pH} \sim 3$) környezetben is korrózióállóknak kell lenniük, alumínium és rozsdamentes acéllemezek esetén is szükség van védő bevonatra. Munkájuk során két különböző vezetőképes polimer bevonatot készítettek alumínium lemezekre, amellyel állításuk szerint a cellák tömege és a költségek is mérsékelhetők. Méréseik alapján a polipirrollal bevont lemezek esetén nem tapasztalható számottevő változás a korrózióállóságban, polianilin alkalmazásával azonban jelentős javulás érhető el. Wang és társai [26] titánból készített lemezeket vizsgáltak. Megállapították, hogy a titán felületén létrejövő filmréteg meggátolja a korróziót, azonban ez a réteg képes növelni az ellenállást és elektromos szigetelőként viselkedni, ami teljesítménycsökkenéshez vezet. Állításuk szerint jelentős kitűzött cél a cellák teljesítménysűrűségének maximalizálása, ennek eléréséhez a teljesítmény romlásának elkerülésére felületmódosítást alkalmaztak. Egy irídium-dioxiddal szinterezett és egy platínával bevont titán lemezt készítettek és megállapították, hogy a megfelelő módosításokkal az üzemanyagcellákban való alkalmazás lehetséges. Bi és társai [27] szerint a felületi bevonat szerepe a korrózióállóság biztosítása mellett a lemez ellenállásának csökkentése is. Ennek megoldásaként számos különböző bevonat alkalmazható.

A szén alapú bevonatok közé tartozik a szén, a grafit és a vezetőképes polimer bevonat. Vezetőképes polimer bevonat esetén kiváló korrózióállóság érhető el, a bevonat gyártásához azonban többnyire fröccsöntésre van szükség. Feng és társai [28] amorf szén bevonatot készítettek rozsdamentes acéllemezekre és megállapították, hogy a bevonatolt lemez korrózióállósága nagymértékben javult, valamint tulajdonságai kedvezőbbnek bizonyulnak a grafit bipoláris lemezekhez képest is.

Fém bevonatok közé a nemesfém, fém-karbid és fém-nitrid bevonatok tartoznak. Hermann és társai [29] szerint fémes bevonatok esetén fontos, hogy a lemez és bevonat anyagának hőtágulási együtthatója közelítőleg megegyezzen az eltérő hőtágulásból adódó mikrorepedések és porusok elkerülése miatt. A fém-nitrid bevonatok közé tartozik a króm-nitrid (CrN), a titán-nitrid (TiN) és a nióbbium-nitrid (NbN). A TiN bevonat az egyik leggyakrabban alkalmazott bevonat fém bipoláris lemezekben. Kumagai és társai [30] TiN bevonatú rozsdamentes acél bipoláris lemezeket készítettek és vizsgálták a tulajdonságait. Megállapították, hogy ezzel a módszerrel elérhető az érintkezési ellenállás (ICR - Interfacial Contact Resistance) kívánt csökkenése. Állításuk szerint a gyártott bipoláris lemez alkalmas arra, hogy leváltsa az üzemanyagcellákban alkalmazott költséges grafit lemezeket. A fém-karbid bevonatok

magukban foglalják a grafit és fém bevonatok kedvező tulajdonságait, így ígéretesek lehetnek fém bipoláris lemezek esetén. Fém bipoláris lemezek nemesfém, például arany vagy platina bevonattal is gyárthatók. Alkalmazásuk költséges és a kívánt korrózióállóság eléréséhez megfelelő bevonatvastagság szükséges, aminek köszönhetően az űrtechnikában és a hadiiparban alkalmazzák.

2.2.3. Polimer kompozit bipoláris lemez

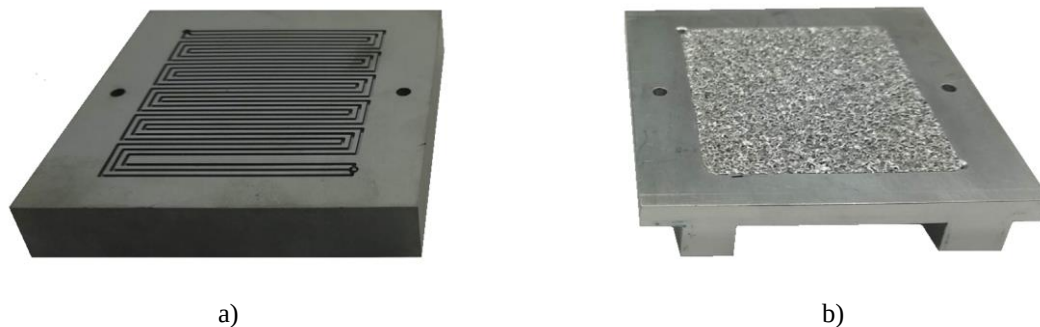
Antunes és társai [31] szerint a polimer kompozitok olyan új típusú anyagok, amik ötvözik a korrózióálló polimerek és a vezetőképes töltőanyagok kedvező tulajdonságait. A kompozitok mátrix anyagaként hőre lágyuló és hőre keményedő polimer egyaránt alkalmazható. A termoplasztikus polimerekhez képest a 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 [3] 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 vezetőképeség érhető el, korrózióhajlamuk miatt azonban alkalmazásuk a cellákban nem kedvező. Szén alapú töltőanyag a grafit, korom, szénszál (CF - Carbon Fiber), többretegű szén nanocső (MWCNT - Multi-Wall Carbon Nanotube), fémes töltőanyagként például rozsdamentes acél szálak alkalmazhatók. Polimer kompozit bipoláris lemezek gyártása általában préssel vagy fröccsöntéssel történik, így az összetett geometria és a folyási csatornák is egy lépésben kialakíthatók, nincs szükség költséges utólagos megmunkálásra.

2.2.4. Fémhab bipoláris lemez

A hagyományos (például grafit) bipoláris lemezekben a közegek áramlása a lemezbe munkált mikrométeres méretű csatornákon keresztül történik (3.a ábra), amik 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 (3.b ábra) alkalmazása, ahol az áramlás hagyományos (például grafit) lemezekkel ellentétben nem a lemezbe munkált mikrométeres nagyságrendű csatornákon keresztül történik, hanem a hab nyílt celláin át [7].



3. ábra A hagyományos (a) és fémhabbal ellátott (b) bipoláris lemez [21]

Awin és Dukhan [8] kutatásukban nyílt cellás fémhabból készült bipoláris lemezek szimulációs vizsgálatával foglalkoztak. Állításuk szerint az üzemanyagcellák bipoláris lemezeinek alapanyagával szemben támasztott követelményeknek (2.2. fejezet) egyetlen anyag sem felel meg maradéktalanul. A fémhabok termikus, mechanikai és elektromos tulajdonságai széles határok között módosíthatók a cellaszerkezet és a porozitás változtatásával. Eredményeik alapján a PEM üzemanyagcellákban fémhab bipoláris lemezek alkalmazása jelentős előnyökkel jár. Megállapították, hogy fémhab lemezek használatával a cella teljesítménye növelhető a hagyományos grafit lemezekhez képest. Alkalmazásuk egyenletes hőmérsékleteloszlást biztosít a cellában, ami rendkívül fontos a megbízhatóság szempontjából. A hagyományos grafit lemezekhez képest szűkebb üzemi hőmérséklet-tartomány érhető el, ami a cellában található membrán élettartamát tekintve jelentős előnnyel jár. A hőmérséklet mellett egyenletesebb nyomást is tapasztaltak az áramlási területen a fémhab lemez esetén, ami a kémiai reakció szempontjából kedvező. Állításuk szerint fémhab bipoláris lemezzel nagyobb teljesítmény érhető el az üzemanyagcellában azonos mennyiségű levegő és üzemanyag használata esetén. A fémhab porózus szerkezete emellett a cella jelentős tömegcsökkenését is eredményezi, a grafitlemezhez képest 27,8%-os csökkenést tapasztaltak. Awin és Dukhan [21] kísérleteikben 6101-T6 alumíniumötvözetből készített fémhab és grafit bipoláris lemez tulajdonságait vizsgálták. Megállapították, hogy az általuk használt alapanyagok és technológia esetén körülbelül 10%-os hatékonyságnövekedés tapasztalható az alumíniumhab lemezzel a grafitlemezhez képest, miközben működéséhez 4%-kal kevesebb hidrogénre van szükség. Kumar és Reddy [32] fémhab lemezt alkalmaztak a bipoláris lemezekben az áramlás

elosztására. Állításuk szerint a fémhabok előnye, hogy akár 95%-os porozitás is elérhető, ami alkalmassá teszi őket gáz közegek átengedésére úgy, hogy közben elektromos és termikus vezetőképességük is kiváló. Véleményük szerint a fémhab alkalmazásának egyetlen korlátját a kis korrózióval szembeni ellenállóképességük jelentheti. A korrozív közeg miatt a fém bipoláris lemezekhez hasonlóan a fémhabok is felületi védőbevonatot igényelnek.

Tseng és társai [33] munkájuk során egy PEM cella bipoláris lemezébe fémhab lemezt helyeztek el az áramlás biztosítására. Állításuk szerint a fémhab védőbevonatot igényel a korróziós hajlama miatt. Megállapították, hogy a fémhab felületének hidrofób tulajdonsággal kell rendelkeznie annak érdekében, hogy a keletkező víz könnyen eltávolítható legyen a cellából. Kísérletükben nikkel fémhabot PTFE bevonattal láttak el, amellyel elérték a kívánt víztaszítást és a korrózióállóságot is. Munkájuk alapján a fémhab bipoláris lemezzel ellátott cellák nagyobb teljesítmény leadására képesek a hagyományos grafitlemezzel ellátotthoz képest. Véleményük szerint ez a pórusok okozta egyenletesebb gázeloszlásnak köszönhető. Megállapították, hogy a fémhabok alkalmazásával a bipoláris lemezek tömege mellett a gyártási költsége is jelentősen csökkenthető, így alkalmazásuk az üzemanyagcellákban kedvezőnek bizonyul.

Park és társai [34] rézből készített fémhab lemezt helyeztek egy üzemanyagcellába és vizsgálták a tulajdonságait. Állításuk szerint a rézhab ideális erre a célra, mivel viszonylag megfizethető és számos különböző struktúra kialakítható belőle. A réz kiváló elektromos vezető, elektromos ellenállása kisebb a hagyományos lemezekhez képest, emiatt alkalmazása kedvező lehet. Munkájukban a rézhab optimális paramétereit vizsgálták, ugyanis a lemez vastagsága, porozitása, struktúrája is jelentős hatással van a maximális teljesítményre. Kutatásuk eredményeként megállapították, hogy rézhab alkalmazásával rendkívül nagy teljesítménynövekedés érhető el az általuk vizsgált üzemanyagcellákban.

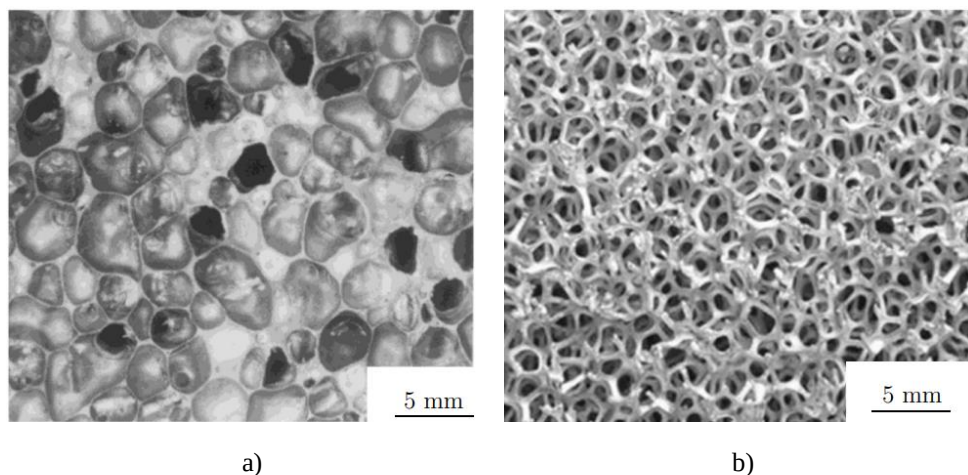
2.3. Fémhabok

A fémhabok kutatásának első dokumentált kísérletei Lefebvre és társai [35] szerint 1925-ben, Franciaországban születtek. A kereskedelmi forgalomba hozása az 1950-es évek közepén kezdődött, az alumíniumhab-gyártás elindulásával. A második jelentős fellendülés a fémhabokkal kapcsolatos kutatásban az 1990-es években kezdődött és napjainkban is tart. Ennek oka, hogy a fémhabok alkalmazásával különleges tulajdonságok érhetők el. Zitha és társai [36] szerint a szakirodalomban és a gyakorlatban a „fémhab” kifejezést gyakran tévesen

használják és ez félreértésekhez vezet. Állításuk szerint a kifejezés általánosítva történő használatával utalhatnak celluláris fémekre, porózus fémekre, szilárd fémhabokra és fém szivacsokra is. Véleményük szerint fémhabnak azok az anyagok tekinthetők, amelyek gyártása olvadék állapotban lévő fémből indul ki.

2.3.1. Fémhabok jellemzői

A fémhabok különleges fizikai, mechanikai, termikus, elektromos és akusztikus tulajdonságokkal rendelkeznek. Szerkezetük természeti ihletésű: fák, csontok, tengeri szivacsok felépítésén alapul. Fajlagos tömegük kicsi, nagy gázáteresztő képesség mellett a mechanikai teherbírásuk is nagy, valamint energia-, zaj-, hőelnyelő képességük is számos alkalmazásban kedvező lehet. Ashby és Tianjian [37] szerint gyakran alkalmazott fémhab alapanyag az alumínium, réz, acél és nikkel. Léteznek eljárások magnézium, titán, cink, ólom és arany habosítására is, használatuk azonban nem gyakori. A fémhabok gyártástechnológiája nagymértékben meghatározza a habszerkezet homogenitását, tulajdonságait és felhasználását. Megkülönböztethető zárt (4. a ábra) és nyílt (4. b ábra) cellás fémhab, az utóbbit fémszivacsnak is nevezik.



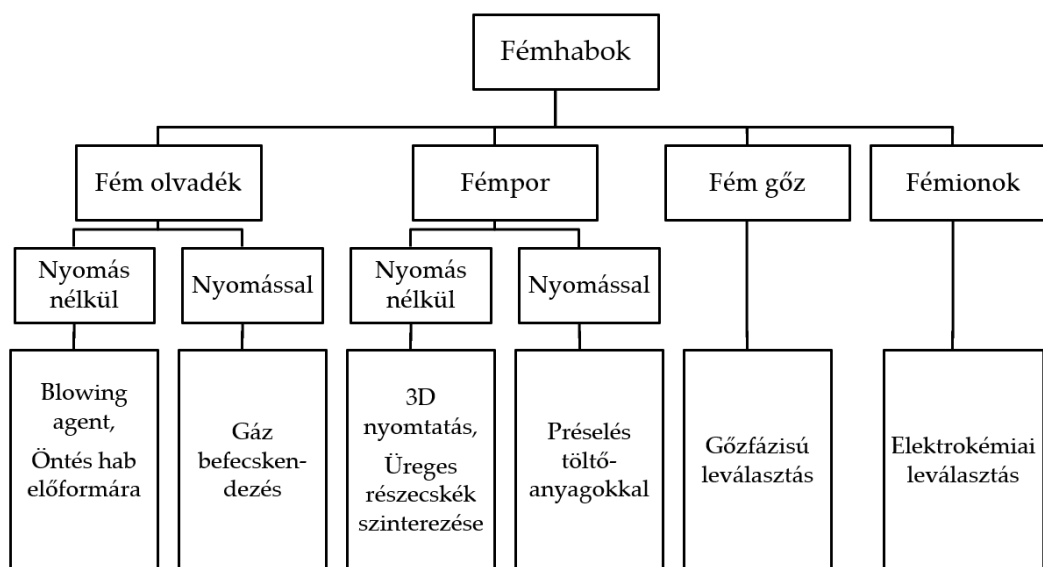
4. ábra Zárt (a) és nyílt (b) cellás alumínium hab szerkezete [38]

A fémhabok mechanikai tulajdonságaira jelentős hatással vannak az alapanyag tulajdonságai, valamint a habszerkezetre jellemző anizotrópia és a fellelhető hibák, például törött falú vagy a többitől eltérő méretű, illetve formájú cellák. A mechanikai tulajdonságok erősen függenek a hab sűrűségétől, ezeket a tulajdonságokat (rugalmassági modulus, nyomószilárdság, hajlítószilárdság) tömegre vagy sűrűségere fajlagosítva adják meg [39]. A habok szakítószilárdsága általánosságban nem nagy, a repedés kialakulása a leggyengébb

anyagréshoz, cellához köthető. A fémhabok kifáradásra hajlamosak lehetnek, fellépő ciklikus terhelés esetén (például a járműveknél) alkalmazásuk körültekintést igényel. Sharma és társai [40] szerint a fémhabok egyik legfontosabb tulajdonsága a jelentős energiaeinyelő képesség, ami vonzóvá teszi felhasználásukat a járműiparban.

2.3.2. Fémhabok előállítása

Banhart [41] szerint számos különböző módszer létezik fémhabok előállítására. Néhány gyártási eljárás a polimerek habosításához hasonló technikán és elven alapszik, mások kihasználják a fémek speciális tulajdonságait, például szinterezhetőségét. A gyártási eljárások egy lehetséges csoportosítása az 5. ábrán látható. Az alapanyagként használt fém állapota alapján négy technológiai család különíthető el. Ezek a fém olvadékból, fémporból, fémionokból és fém gőzből kiinduló eljárások.



5. ábra Fémhab gyártási technológiák csoportosítása [36] alapján

A fém olvadékból dolgozó eljárások egyik lehetséges módja a direkt habképzés, amely során a fémolvadékban gázbuborékokat hoznak létre. Ez megvalósítható az olvadékba való gáz befecskendezésével, vagy az olvadékban létrehozott in-situ gázképzéssel, ami megfelelő gáz termelésére alkalmas habképző szerekkel (Blowing agent) érhető el [42]. Indirekt habképzés esetén általában nyílt cellás polimer habból indulnak ki, majd a polimer hab pórusait hőálló anyaggal (pl.: kalcium-karbonát) töltik fel. Ezt követően a polimert hevítéssel eltávolítják, majd a kívánt fémmeel megtöltik a létrehozott hőálló formát. Az eljárás végén a kezdeti polimer habbal megegyező geometriájú fémhabot hoznak létre. Fém olvadékból töltőanyagok

felhasználásával is létrehozható fémhab. A fém olvadákot a töltőanyag részecskéi köré öntik, majd a kívánt habszerkezetnek megfelelően utókezelést végeznek. A töltőanyagok megfelelő oldószerekkel, savakkal vagy hevítéssel eltávolíthatók, vagy a hab szerkezetében hagyva szintaktikus fémhabok hozhatók létre [41,43].

Fémhabok gyártása por alapú fémből kiindulva is lehetséges. A fémpor ebben az esetben a teljes gyártási folyamat során szilárd halmazállapotú marad, csupán szinterezés, vagy egyéb szilárd állapotú kezelés történik. A részecskék szilárd halmazállapotban tartása elengedhetetlen a gyártott hab megfelelő szerkezetének eléréséhez. A felületi feszültség miatt olvadék állapotban zárt cellás struktúra jellemző, míg szilárd fémpor alkalmazásával tipikusan nyílt cellás szerkezet hozható létre. A hab szerkezetét ekkor a részecskék között szinterezés során kialakuló „nyak” jellemzi. Szinterezés során alumíniumötvözetek alkalmazása nehézséggel jár a granulátumok felületén kialakuló vékony oxidréteg miatt. Annak érdekében, hogy a részecskék között fémes kapcsolat alakuljon ki, ezt a réteget szükséges feltörni, vagy szinterezési segédanyagot (pl.: réz, magnézium por) használni. Fém granulátum helyett fémszálak is alkalmazhatók, ami új lehetőségeket nyit a porózus szerkezetek kialakításában [41,44].

Gáz fázisú fém felhasználásával is kialakítható habszerkezet. A vákuumkamrában létrehozott fémgőz a hideg, szilárd előforma felületéhez érve kondenzálódik. Az általában polimer előforma felületén létrejövő fém réteg vastagsága a gőz sűrűségétől és a gyártási időtől függ, a hab szerkezetét a szilárd előforma geometriája befolyásolja. A polimer előforma a fémhab elkészültét követően termikus vagy vegyi úton eltávolítható [41].

2.4. Vezetőképes polimerek, polimer kompozitok

2.4.1. *Hővezető polimerek és polimer kompozitok*

A hővezetésre képes polimerek és polimer kompozitok jelentős kutatási területté váltak, alkalmazásuk számos új területen ígéretesnek bizonyul. Az 5G kommunikációs korszak eljövételével az elektronikai ipar jelentős célkitűzése az alkatrészek és technológia gyors fejlesztése, amivel kis méret és tömeg, nagy teljesítmény és teljesítménysűrűség érhető el. Jelentős figyelmet kapnak az energiatermelő rendszerek, amelyeket hibrid és elektromos járművekben, repülőgépekben, műholdakban, használnak. Az eszközök nagy teljesítménye jelentős hőmennyiség felhalmozódását idézheti elő, ami befolyásolja a termék stabilitását,

megbízhatóságát és élettartamát is. Ez igényt teremt kiváló hővezető képességű anyagok alkalmazására a megfelelő hőhajtás biztosításához. Hővezető polimerek használata kis tömegűeknek, korrózióállóságuknak, könnyű és költséghatékony feldolgozásuknak köszönhetően kedvezőnek bizonyul [45-47].

A polimerekre általánosságban jó hőszigetelőként tekintenek, az anyagban található hibák, lánc összefonódások, láncvégek, kristályos-amorf határfelületek, üregek hatására a hőáram szóródik és terjedése akadályba ütközik, aminek következtében a hővezetésük általában rossz. A leggyakrabban alkalmazott polimerek főláncában szén-szén kovalens kötések találhatók, hasonlóan a gyémánthoz, az egyik legjobb hővezetéssel rendelkező anyaghoz, ami szintén felveti a hővezető polimerek fejlesztésének lehetőségét [45]. A gyémánt hővezetőképessége szobahőmérsékleten akár $2000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ is lehet, a szobahőmérsékleten a legmagasabb hővezetőképességgel rendelkező fémek a réz ($400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) és az ezüst ($430 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) [48, 49], egy általános szénacél $10\text{-}70 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ hővezetéssel rendelkezik [50].

A polimerek hővezetőképességére a kémiai összetétel, láncelrendeződés, kristályosság és a morfológia is jelentős hatással van. Orientált szerkezettel rendelkező polimerekben jelentős javulás mérhető a hővezetésben az orientáció irányában, gyakran alkalmazott orientációs módszer az uniaxiális vagy biaxiális nyújtás. Ezekben a polimerekben a kristályos és az amorf részek is orientáltak, a kiegyenesített láncok mentén hatékonyabb hőtranszport valósítható meg. Ideális esetben az egytengelyűen nyújtott polimerekben a főlánc kovalens kötéseinek jelentős része a nyújtás irányában áll, amely hatékony energiatranszportot tesz lehetővé ebben az irányban. Erősen orientált polietilén mikroszálak hővezetése szobahőmérsékleten akár $20 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, nanoszálak hővezetése akár $104 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ is lehet, amely meghaladhatja a fémek és a kerámiák hővezetését is. Biaxiálisan nyújtott polietilén film esetén is jelentős növekedés tapasztalható, akár $18 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ hővezetés is elérhető, amely az acélokéval is összemérhető lehet. A polimerek hővezetését a kristályosság is növelheti. Általánosságban az amorf, rendezetlen tartományok akadályozzák a hőtranszportot, így a részben kristályos polimerek hővezetőképessége általában nagyobb az amorf polimerekhez képest [45].

Számos kísérlet született hővezető polimer kompozitok gyártására, a kapott hővezetési együttható (λ) azonban a legtöbb esetben jelentősen elmarad a mátrix és töltőanyag tulajdonságai alapján előzetesen várt értéktől. Ennek oka a polimer kompozitok eltérő fázisai között kialakuló határfelület és a nagy határfelületi hőellenállás (ITR – Interfacial Thermal Resistance), amely jelentős korlátot szab a hővezetési együttható növelésének. A polimer kompozitok határfelülete szerepet játszik a terhelés átvitelében az erősítő- vagy töltőanyag és a

mátrix között, megakadályozhatja a repedés terjedését, szórhat és elnyelhet hullámokat (pl. fény- vagy hanghullámokat). Ez a határfelület jelentősen befolyásolja a polimer kompozit mechanikai, termikus, elektromágneses stb. tulajdonságait is. Polimer kompozitokban a hőáram a határfelülethez érve akadályba ütközik, jelentős hőveszteség lép fel, ami a hővezetési tényezőt is csökkenti. A kompozitokban az ITR hőellenállás két típusa jelenik meg, a hővezető töltőanyagok közti, illetve a töltőanyag és a mátrix közti hőellenállás. λ növelése az egyik, vagy esetleg mindkét ITR hőellenállás csökkentésével lehetséges [46].

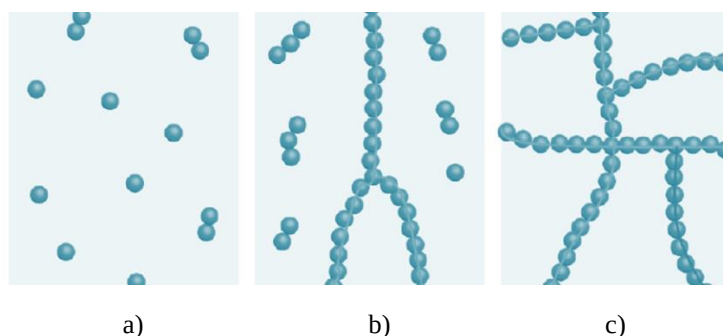
A töltetlen polimerek hővezetése általában a $0,1-0,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ tartományba esik (1. táblázat), polimer kompozitokban kiváló hővezető képességgel rendelkező töltőanyagokat alkalmaznak. A hőáram ezekben a polimer kompozitokban a mátrix anyagon és a hővezető töltőanyag részecskéken egyaránt átjut. Szilárd anyagokban a hőenergia szállítását fononok (energiakvantumok) és elektronok végzik, az elektromosan szigetelő polimerek esetén a hőáramot döntően a fononok szállítják. A hővezető polimer kompozitokban különböző töltőanyagok esetén is eltér a hőtranszport típusa. Fémes töltőanyagok esetén az elektronok, nem fémes részecskék (grafit, egyéb széntartalmú töltőanyagok) esetén elsősorban fononok végzik a hőáram továbbítását [51].

Mátrix anyag	Hővezetési tényező (λ) [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
polisztirol (PS)	0,19
polivinilidén-fluorid (PVDF)	0,20
poliamid (PA)	0,20
polipropilén (PP)	0,21
polimetil-metakrilát (PMMA)	0,22
epoxi (EP)	0,22
polivinil-alkohol (PVA)	0,22
poli(éter-éter-keton) (PEEK)	0,25
poliimid (PI)	0,27
politejsav (PLA)	0,28

1. táblázat Hővezető kompozitok gyakori mátrix anyagai és hővezetési tényezőjük [52]

A polimer kompozitok hővezetése erősen függ a töltőanyag mennyiségétől és a termikus perkolációs küszöbértéktől. Kis töltőanyag tartalom esetén a részecskék eloszlata, egymástól elkülönülve helyezkednek el a mátrixanyagban (6. ábra). A töltőanyag mennyiséget növelve elérhető a perkolációs határ, amikor a részecskék hővezető hálózatot hoznak létre a

mátrixanyagban, jelentősen növelve a polimer kompozit hővezető képességét (6. b ábra). A perkolációs határt meghaladó töltőanyag-mennyiség esetén a különálló részecskék is kapcsolódnak a hálózathoz, ekkor a kompozitok hővezetése már a töltőanyag részecskéinek kialakult hőhálózatától függ (6. c ábra) [51].



6. ábra Termikus perkoláció mechanizmusa a töltőanyag növelésével [51]

A gyakran alkalmazott hővezető töltőanyagok (2. táblázat) négy csoportba sorolhatók, ezek a szén alapú, szerves, fémes és hibrid töltőanyagok. Szén alapú töltőanyag a grafit, gyémánt, szén nanocső (CNT), grafén, szénszál (CF). Szerves töltőanyagok közé tartozik a bór-nitrid (BN), bór-nitrid nanoréteg (BNNS), alumínium-nitrid (AlN), alumínium-oxid (Al_2O_3), szilícium-karbid (SiC), szilícium-nitrid (Si_3N_4). A SiC, AlN, BN alkalmazása az elektronikai iparban gyakori a kiváló hővezető képességüknek és jó elektromos szigetelőképeségüknek köszönhetően. Általánosságban a fémes töltőanyagok, például az alumínium (Al), réz (Cu), ezüst (Ag) használata olyan elektronikai alkalmazásokban gyakori, ahol a kis tömeg nem követelmény [52].

Töltőanyag	Hővezetési tényező (λ) [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
alumínium-oxid (Al_2O_3)	36
alumínium (Al)	234
réz (Cu)	350-400
ezüst (Ag)	430
rövid szénszál (SCF)	550
grafén-oxid (GO)	1000
grafit	1500
bór-nitrid nanoréteg (BNNS)	1600-2000
szén nanocső (CNT)	~3500
grafén	~5300

2. táblázat Hővezető kompozitok gyakori töltőanyagai és hővezetése [52]

2.4.2. Elektromosan vezető polimerek és polimer kompozitok

Az anyagokra jellemző elektromos vezetőképesség és ellenállás alapján megkülönböztetünk szigetelőket, félvezetőket és vezetőket. A polimerek általában jó elektromos szigetelő anyagok, néhány esetben azonban kiváló elektromos vezetés érhető el alkalmazásukkal. A poliacetilén (PA), az első vezetőképés polimer 1970-es évekbeli véletlenszerű felfedezése Shirakawa nevéhez fűződik [53]. A kiváló vezetőképességgel rendelkező poliacetilén megalkotásának hatására a vezetőképés polimerek és polimer kompozitok fejlesztése jelentős kutatási területté vált és számos felhasználási területen megjelent (3. táblázat).

Elektromos vezetőképesség mértéke	Alkalmazás	Fajlagos elektromos ellenállás (ρ) [$\Omega \cdot \text{cm}$]
Kiváló vezető	tranzisztor	$10^{-6} - 10$
	bipoláris lemez	
	termoelektromos lemez	
Vezető	árammérő szenzor	$10 - 10^6$
	feszültségmérő szenzor	
	hőmérséklet-érzékelő	
Félvezető	üzemanyagtank	$10^6 - 10^{11}$
	antisztatikus tároló tartály	
Kiváló szigetelő	elektromos kábel szigetelő	$10^{11} - 10^{16}$

3. táblázat Polimerek és vezetőképés polimer kompozitok alkalmazása és elektromos ellenállása [54]

Az anyagok fajlagos ellenállása (ρ) és fajlagos vezetőképessége (σ) között az 1. összefüggés teremt kapcsolatot:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

ahol az elektromos ellenállás (R), a vezető keresztmetszete (A) és hossza (L) függvényében [55]:

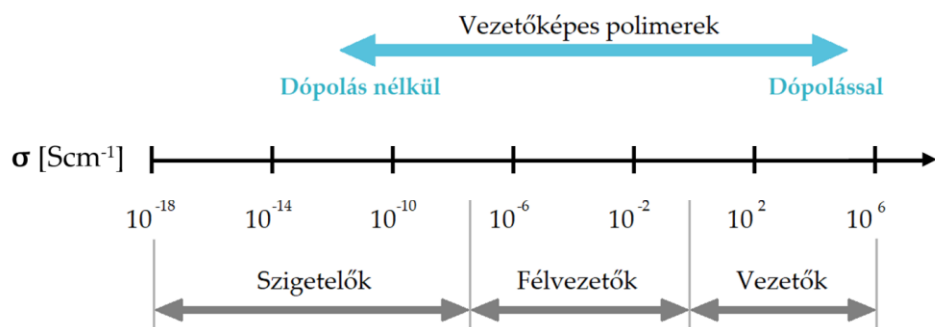
$$\rho = \frac{R \cdot A}{L}. \quad (4)$$

Az elektromosan vezető polimerek egy különleges elektromos és optikai tulajdonságokkal rendelkező szerves anyagcsalád (4. táblázat). A polimerek vezetőképességét a főláncában található konjugált kettős kötések (π kötések) eredményezik. A π elektronok képesek delokalizálttá válni és a vezetési sávba vándorolni, a keletkező vezetési sáv ideális esetben a fémekhez hasonló elektromos vezetést eredményezhet [56].

Név	Szerkezeti képlet [57]	Fajlagos elektromos vezetés (σ) [Scm^{-1}] [58]
poliacetilén (PA)	$\text{---}[\text{CH}=\text{CH}]_n\text{---}$	$10^3 - 1,7 \cdot 10^5$
polianilin (PANI)	$\text{---}[\text{C}_6\text{H}_4\text{NH}]_n\text{---}$	$30 - 2 \cdot 10^2$
polipirrol (PPY)	$\text{---}[\text{C}_4\text{H}_4\text{N}]_n\text{---}$	$10^2 - 7,5 \cdot 10^3$
politiofén (PTh)	$\text{---}[\text{C}_4\text{H}_2\text{S}]_n\text{---}$	$10 - 10^3$
poli(p-fenilin) (PPP)	$\text{---}[\text{C}_6\text{H}_4]_n\text{---}$	$10^2 - 10^3$

4. táblázat Vezetőképes polimerek szerkezeti képlete és vezetőképessége

Ez a rendszer a kötések folyamatos cserélődése, vagyis felszakadása és keletkezése során kialakuló energiarés miatt instabil. A kötések cserélődésekor kialakuló energiarés leküzdésére ionokat visznek be a rendszerbe ún. dópolás során, amelyek segítségével a vezetőképesség a többszörösére növelhető (7. ábra) [56].



7. ábra Anyagsaládok csoportosítása az elektromos vezetőképesség szerint [56] alapján

A dópoláshoz alkalmazott adalékanyagok töltést hordoznak elektronok formájában, a főláncbeli instabilitás semlegesítésére. A polimerek adalékolása p- és n-típusú dópoló szerekkel is lehetséges [56]. Az n-típusú dópolás során az adalékanyagok elektront adnak a vezetési sávba, p-típusú esetben elektronokat vesznek fel a vegyértéksávból [59]. Shirakawa és társai [60] a poliacetilén dópolásáról megállapították, hogy alkalmazásával a polimer vezetőképessége akár 11 nagyságrenddel is növelhető.

Töltőanyag	Elektromos vezetés (σ) [S cm^{-1}]
szén nanoszál (CNF)	$10 - 10^4$
szénszál (CF)	$10^{-1} - 10^3$
grafén	10^3
grafit por (GP)	10^4
korom	10

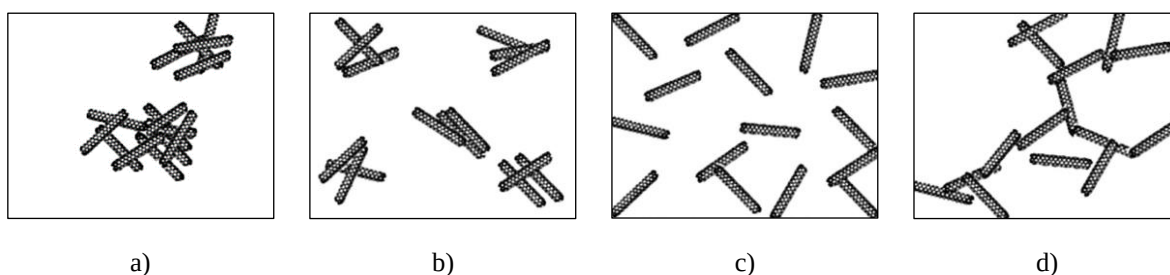
5. táblázat Elektromosan vezető polimer kompozitok töltőanyagainak vezetőképessége [61]

Radzuan és társai [62] szerint a vezetőképés polimer kompozitok jelentik az ideális alapanyagot a PEM üzemanyagcellák bipoláris lemezeihez, az elektromos és mechanikai tulajdonságaik, korrózióállóságuk, kis tömegük, kis költségük és könnyű feldolgozhatóságuk miatt. A megfelelő hatékonyság érdekében az üzemanyagcellák bipoláris lemezeinek előírt elektromos vezetőképessége az Amerikai Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériumának szabályozása szerint minimum 10^2 Scm^{-1} [63].

Elektromosan vezető polimer kompozitok gyártásakor az elektromosan szigetelő polimer mátrixba vezetőképés töltőanyagot (például kormot, szénszálat, szén nanocsövet) helyeznek. A töltőanyag részecskéinek feladata a polimer mátrixban az elektromos vezetés útvonalának kialakítása. A polimer kompozitok vezetőképessége nagymértékben függ a töltőanyag típusától és mennyiségétől. A polimer kompozit vezetőképessé válásához a töltőanyag-mennyiségnek meg kell haladnia az elektromos perkoláció küszöbértékét. A küszöbérték alatti töltőanyag-mennyiség esetén a polimer kompozit elektromos vezetőképessége a szigetelő polimer mátrix vezetőképességével egyezik meg. Ekkor a töltőanyag részecskéi egymástól távol helyezkednek el, nem alakul ki vezető hálózat a kompozitban. A töltőanyag-koncentráció növelésével az anyagban a vezető hálózatok mérete nő, az elektromos perkoláció határát elérve a kompozitban teljesen kialakul az elektromosan vezető hálózat, ekkor a vezetőképesség akár több nagyságrenddel is nőhet. A küszöbértéket jelentősen meghaladó töltőanyag-mennyiség esetén a vezetőképesség már csak kis mértékben javul, míg végül eléri a kompozitra jellemző maximális értéket [63].

Taherian és társai [63] szerint a polimer kompozitok elektromos vezetőképessége a töltőanyag típusa és mennyisége mellett a polimer nedvesítő képességétől, a töltőanyag részecskéinek méretétől és alakjától és a köztük fellépő érintkezési ellenállástól is függ. Állításuk szerint a kis méretű és a nagy (> 1) L/D (hossz/átmérő) aránnyal rendelkező

részecskék csökkentik a perkolációs töltőanyag-mennyiség küszöbértékét, vagyis könnyítik a vezető hálózat kialakítását és növelik a maximálisan elérhető elektromos vezetőképességet. Állításuk szerint a részecskék A/V (felület/térfogat) arányának növelésével nő a részecskék érintkezésének esélye, ami csökkenti az elektromos ellenállást. A polimer mátrix és a töltőanyag felületi energiája meghatározza a kialakuló nedvesítést, ami jelentős hatással van a részecskék eloszlására, aggregálódására. Nagymértékű nedvesítés esetén a polimer mátrix teljes mértékben körbeveszi az egyes részecskéket, gátolva ezzel a vezetőképésű töltőanyag-részecskék érintkezését, ami a vezetőképesség csökkenéséhez vezet. Az elektromos vezetés létrejöttéhez a részecskék érintkezése szükséges (8. d ábra), összefüggő hálózat nélküli, illetve egyenletes eloszlítás és elkülönült aggregátumok esetén nem alakul ki vezető hálózat (8. a-c ábrák). A töltőanyag-részecskék közti érintkezési ellenállás befolyásolja a vezetési mechanizmust és az elektronátmenetet a részecskék között. A részecskék méretének növelésével az érintkezési ellenállás csökkenthető és ezáltal az elektromos vezetőképesség növelhető.



8. ábra A részecskék elrendeződésének hatása az elektromos vezetésre [63]

A vezetőképésű polimer kompozitok töltőanyag-mennyiségének függvényében kétféle elektromos vezetési mechanizmus fordul elő. Kis koncentráció esetén az alagút effektus jellemző, nagy mennyiségű töltőanyag esetén ohmikus vezetés valósul meg. A kis mennyiség esetén a részecskék felületén található polimer réteg akadályt jelent az elektronok számára. A klasszikus mechanika szerint az akadálnál kisebb energiával rendelkező elektron képtelen átmenni a polimer rétegen, a kvantummechanika szerint azonban ez kis valószínűséggel megtörténhet az alagút effektus értelmében. A töltőanyag-mennyiséget a perkolációs küszöbig növelve a kis ellenállással rendelkező vezető hálózat mentén ohmikus vezetés lép fel. A perkolációs elmélet ezt a kétféle vezetési mechanizmus közti éles átmenetet írja le [64].

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

3.1. Felhasznált alapanyagok

A próbatestek fröccsöntéséhez a Tecnoprene® AK6HI (Celanese Corporation, Egyesült Államok, Texas) alapanyagot alkalmaztam. A polipropilént és 30 % üvegszálat tartalmazó nagy ütésállósággal rendelkező alapanyag javasolt feldolgozási technológiája a fröccsöntés. Az alapanyag sűrűsége 1130 kg/m^3 , rugalmassági modulusa 6700 MPa , a hajlítási modulusa szobahőmérsékleten ($23 \text{ }^\circ\text{C}$) 6200 MPa , hajlítószilárdsága ezen a hőmérsékleten 142 MPa , Charpy-féle ütőszilárdsága szobahőmérsékleten 55 kJ/m^2 . Folyóképessége $230 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérséklet és $2,16 \text{ kg}$ terhelőerő mellett $2,8 \text{ g/10min}$ [65]. HDT ($1,82 \text{ MPa}$ terhelés alatti behajlás) hőmérséklete $151 \text{ }^\circ\text{C}$, Vicat-féle lágyulási hőmérséklete (50 N terhelés és $50 \text{ }^\circ\text{C/h}$ fűtési sebesség mellett) $138 \text{ }^\circ\text{C}$ [66]. A fröccsöntött mintákban nikkel habot használtam. A Ni fémhab vastagsága $1,6 \text{ mm}$, névleges pórusmérete $450 \text{ }\mu\text{m}$, és az 1 m^2 felületre vetített tömege 420 g .

3.2. Alkalmazott berendezések és vizsgálati módszerek

3.2.1. Fröccsöntés

A próbatestek gyártásához Arburg Allrounder Advance 270S 400-170 (Arburg GmbH, Németország, Lossburg) típusú fröccsöntőgépet alkalmaztam. A berendezés záróereje 400 kN , a megvalósítható maximális fröccsnyomás 2000 bar , a maximális adagsúly 77 g , a csigájának átmérője 30 mm , oszloptávolsága 270 mm . Az alkalmazott ömledék-hőmérséklet $200 \text{ }^\circ\text{C}$, a szerszám-hőmérséklet $30 \text{ }^\circ\text{C}$ volt.

3.2.2. Szürkeségi fok elemzés

A szürkeségi fok meghatározásához Konica Minolta Universal V4 PCL szkennert használtam és a mintákat 600 dpi felbontással digitalizáltam TIFF formátumban.

A szürkeségi fok elemzése egy digitális képfeldolgozáson alapuló mérési módszer. Színes képekben, például RGB rendszerben a kép leírásához három független kétváltozós függvény szükséges.

$$I_{RGB} = f_R(x, y); f_G(x, y); f_B(x, y) \quad (5)$$

ahol I_{RGB} az adott pontban a kép színe, $f_A(x,y)$ az adott színtkomponens intenzitásfüggvénye, x és y helykoordináták. Ezzel ellentétben szürkeárnyaltos képek leírására egyetlen kétváltozós függvény elegendő.

$$I_{gray} = f_{gray}(x,y) \quad (6)$$

ahol I_{gray} az adott pontban a kép szürkeségi foka, $f_{gray}(x,y)$ a szürkeségi fok intenzitásfüggvénye, x és y helykoordináták.

A mérési módszer alkalmas keverékek minősítésére, fröccsöntött termékek színhomogenitásának és erősítő vagy töltőanyag szegregációjának vizsgálatához is. Automatikusan vagy manuálisan egy intenzitási küszöbértéket meghatározva egy jó felbontású (például mikroszkópi) képből a mérőszoftver képes elkülöníteni a különböző alkotókhoz tartozó térrészeket [67]. A módszer első lépéseként a próbatestek digitalizálása szükséges, amely jelen esetben síkágyas szkennelrel történt.

3.2.3. Nyomóvizsgálat

A mérést egy Zwick-Z005 típusú (Zwick GmbH & Co. Németország, Ulm) szakítógéppel végeztem. A vizsgálat során 5 kN-os erőmérő cellát alkalmaztam, a mérés sebessége 1 mm/perc volt. A nyomóvizsgálathoz egy 8 mm átmérőjű mérőfejet használtam. Az eredmények rögzítéséhez a Zwick TestXpert szoftverét alkalmaztam.

3.2.4. Optikai mikroszkóp

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

3.2.5. Pásztázó elektronmikroszkóp

Az elektronmikroszkópos vizsgálatához JEOL JSM 6380LA (Jeol Ltd., Japán, Tokió) pásztázó elektronmikroszkópot és a hozzá tartozó aranyozó berendezést alkalmaztam. A vizsgálat során több különböző nagyításban (30×, 50×, 65×, 75×, 100×, 200×) készítettem felvételeket a mintákról. Az aranyozást argon gázáramban végeztem.

4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

Munkám során az MTA–BME Lendület Könnyűszerkezetes Polimer Kompozitok Kutatócsoport hidrogéncella fejlesztési projektjének részeként bipoláris lemezek szerkezetének fejlesztésével foglalkozom. Céloom olyan próbatestek gyártása és vizsgálata, amelyek hidrogéncellák bipoláris lemezeinek szerkezeti tesztelésére alkalmazhatók a valós bipoláris lemezek költséges alakítószerszámának legyártása előtt. Előkísérleteim 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.

4.1. Fémhabra fröccsöntött minták gyártása

A próbatestek fröccsöntéséhez $80 \times 10 \times 4$ mm befoglaló méretű próbatestek fröccsöntésére alkalmas négyfészkés fröccsöntő szerszámot használtam. A gyártás első lépéseként a szerszámüreg geometriájának megfelelő, 80×10 mm méretű darabokat munkáltam ki a fémhab lemezből (9. ábra). A darabolás során céloom volt a hab celláinak minél kisebb mértékű roncsolása a gyártás és a további vizsgálatok befolyásolásának elkerülése érdekében.



9. ábra A fémhab lemezből kimunkált darabok geometriája

A kivágást követően a fémhab darabokat a szerszámüregbe helyeztem (10. ábra). Az alkalmazott üvegszállal erősített PP (Tecnoprene) alapanyag mechanikai tulajdonságai jók, a bipoláris lemezekkel szemben felállított elektromos vezetőképességi kritériumnak azonban nem tesz eleget. Viszkozitása nagyságrendileg megegyezik az ideális esetben használt (például szénszál erősített és grafit, korommal töltött) alapanyagével, így az előkísérleteimhez – gazdasági megfontolásokból – ezt az alapanyagot használtam modellanyagként. A polimert $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletre, a fröccsöntő szerszámot $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletre temperáltam. A termékgyártás során a négyből kettő fészkebe elhelyezett nyílt cellás, 420 g/m^2 -es 1,6 mm vastag nikkellal habra fröccsöntöttem az említett üvegszállal erősített PP alapanyagot.

A hidrogéncellák bipoláris lemezeinek funkciója többek között az elektronáramlás biztosítása a lemezek és cellák között (2.2. fejezet). Ennek megfelelően a próbatest gyártás során céltom olyan minták létrehozása, amelyek jó elektromos vezetőképességgel rendelkeznek, miközben hővezető képességük is kiváló.



10. ábra A fémhab darabok behelyezése a szerszámüregbe

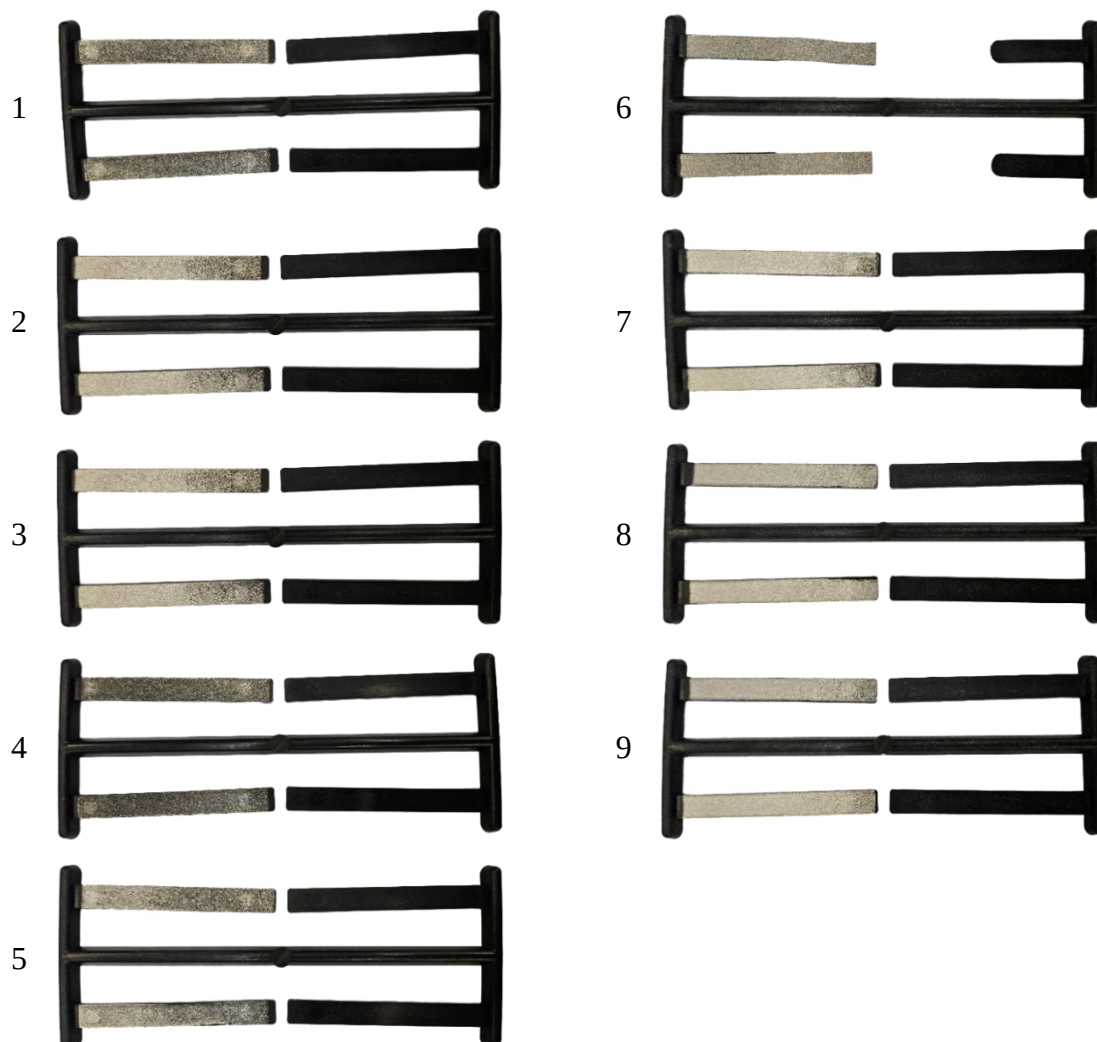
A technológiai paraméterek optimalizálásánál céltom annak elérése, hogy a polimer ömledék csak részlegesen hatoljon be a hab pórusaiba. Ennek megfelelően a gyártás közben különböző paramétereket alkalmaztam a próbatesteknél, a használt beállítások a 6. táblázatban, az ennek megfelelően gyártott próbatestek a 11. ábrán láthatók.

Minta sorszáma	Technológiai paraméterek		
	v [cm ³ /s]	Pbefröccs [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

6. táblázat A próbatestek gyártásakor alkalmazott paraméterek

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 befröccsöntési 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 csökkentettem, 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 (4. minta) további igazolást adtam a kitöltési sebesség által létrehozott kitöltési nyomás hatásának. A 6. minta esetén részleges kitöltést alkalmaztam, megvizsgálva, hogy atmoszférikus nyomáson haladó ömledékfront mennyire itatja át a fémhabot. A mikroszkópi vizsgálatok során megállapítottam, hogy ebben az esetben sokkal kisebb az ömledék-behatolása a fémhabba. A következő minták esetén (7. és 8. minta) a fröccsöntési sebességet a még megfelelő kitöltést eredményező legkisebb értéken tartva végeztem 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 alkalmaztam, majd a következő esetben (8. minta) 150 bar utónyomást használtam. Már szemmel is látható volt, hogy az eddigiekhez képest ez a változás kisebb hatást gyakorolt az átítatásra.



11. ábra Az eltérő technológiai paraméterekkel gyártott próbatestek

A fröccsöntés közbeni polimerrel való átítatás további vizsgálatához $80 \times 80 \times 1,2$ mm lapka próbatesteket gyártottam. A gyártás során a szerszámüreg közepére folyásirányban (12.a ábra), illetve a folyási út végére az áramlásra merőlegesen (12.b ábra) helyeztem el a $80 \times 10 \times 1,6$ mm méretű kivágott fémhab lemezt.



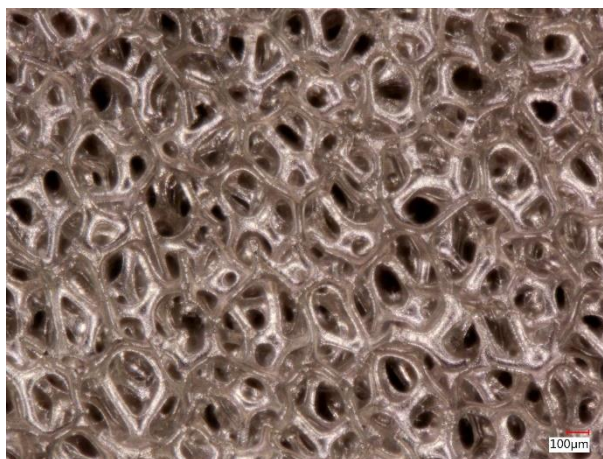
12. ábra A folyásirányban (a) és a folyási út végére (b) helyezett fémhab lemezzel gyártott próbatest

4.2. Minták vizsgálata

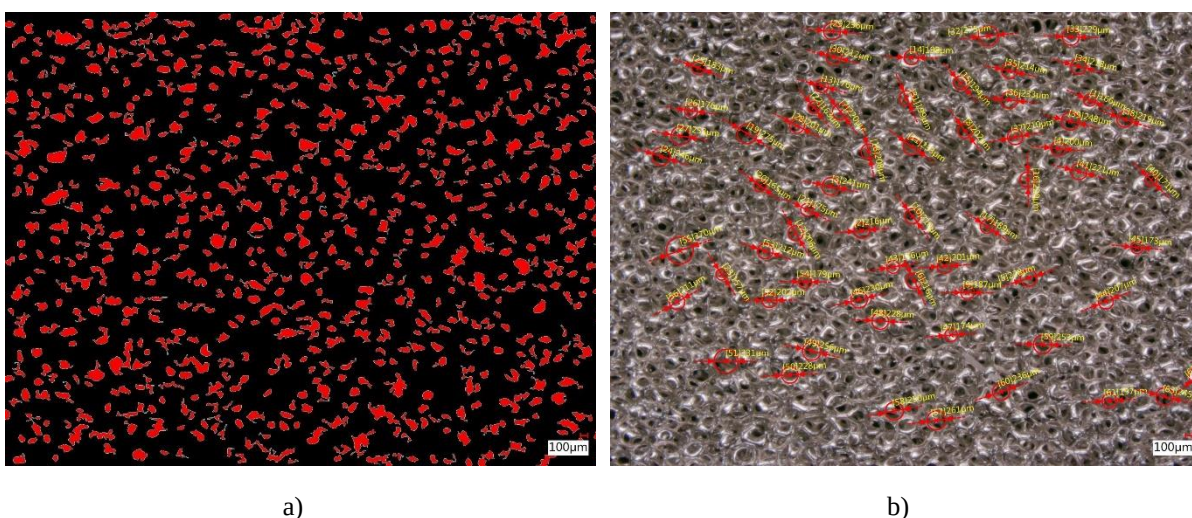
A fémhab-töltött polimer konstrukció bipoláris lemezként történő alkalmazásával elérhetővé válik a kívánt jó elektromos vezetőképesség melletti jelentős hővezető képesség a későbbi gázáramlási zónában. A fémhab lemez a cellában felszabaduló elektronok továbbításához szükségszerűen a minta felületén található.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

4.2.1. Vizsgálat optikai mikroszkóppal

A minták vizsgálatához a Keyence VHX-5000 optikai mikroszkópot használtam. Először az érintetlen fémhab szerkezetét vizsgáltam (13. ábra). Látható, hogy a nikkel hab nyílt cellás, a pórusai épek. Ezt követően a mikroszkóp segítségével a hab látszólagos pórusméretét határoztam meg. Ehhez különböző nagyítások esetén kézi és automatikus mérést alkalmaztam. Automatikus mérés esetén a mérőszoftver – a megfelelő beállítások mellett – kijelölte a pórusok helyét és méretét (14.a ábra). A mérést kézzel végezve a hab egy kiválasztott tartományában manuálisan lemértem a pórusok névleges átmérőit az automata mérés beállításainak ellenőrzésére (14.b ábra).

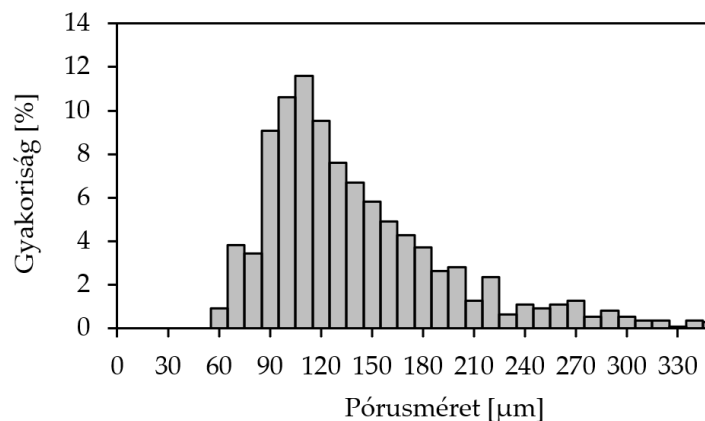


13. ábra A nyílt cellás nikkelfab szerkezete (nagyítás 100×)



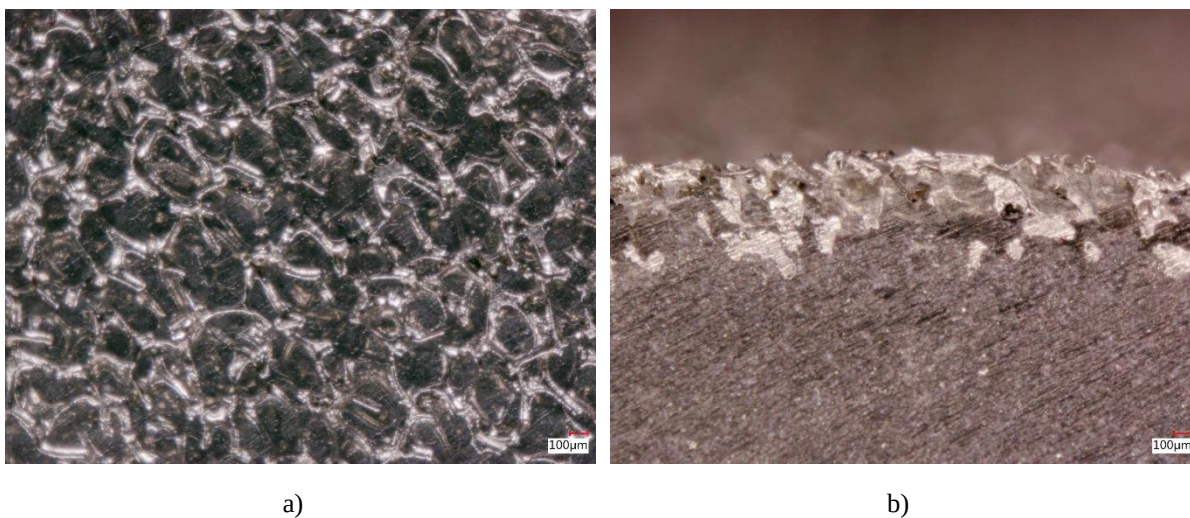
14. ábra Az automatikusan (a) és manuálisan (b) kijelölt pórusok (nagyítás 40×)

Az automatikus méréssel meghatározott pórusméret értékek eloszlását ábrázoltam (15. ábra). Automatikus méréssel 203-228 μm közötti, a kézi mérés eredményeként 216 μm átlagos pórusméret adódott. A gyártói névleges adattól az eltérés egyik oka, hogy a nyílt cellás szerkezet miatt a hab mélyebb rétegei is láthatók, a mérőszoftver pedig a mélyebben fekvő pórusokat egy síkban lévőként kezeli és a nagyobb felületi pórusokat kisebb pórusokként érzékeli. Tökéletes mérést CT felvételek kiértékelése alapján lehetne végezni.



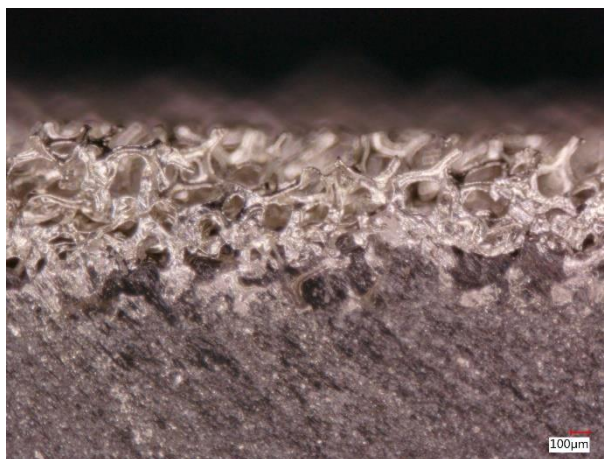
15. ábra Az automatikus mérés pórusméreteloszlása (nagyítás 40×)

A próbatestek optikai mikroszkópos vizsgálatához a polimerrel legjobban és a legkevésbé átitatott $80 \times 10 \times 4$ mm-es fröccsöntött fémhabos mintákból 5 mm széles mintákat munkáltam ki. A 3. minta esetén a felületen jelentős mennyiségű polimer látható (**16.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 (**16.b ábra**) látható, hogy a hab pórusai közé nagy mennyiségű polimer behatolt, a hab felületén a pórusok jelentős deformációt szenvedtek a gyártás során.



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

A 6. minta keresztmetszeti mikroszkópi képen (**17. ábra**) látható, hogy a fémhab felületi pórusai kevésbé deformálódtak a szerszámban, a habszerkezet sértetlenebb maradt. Látható, hogy a polimer 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.

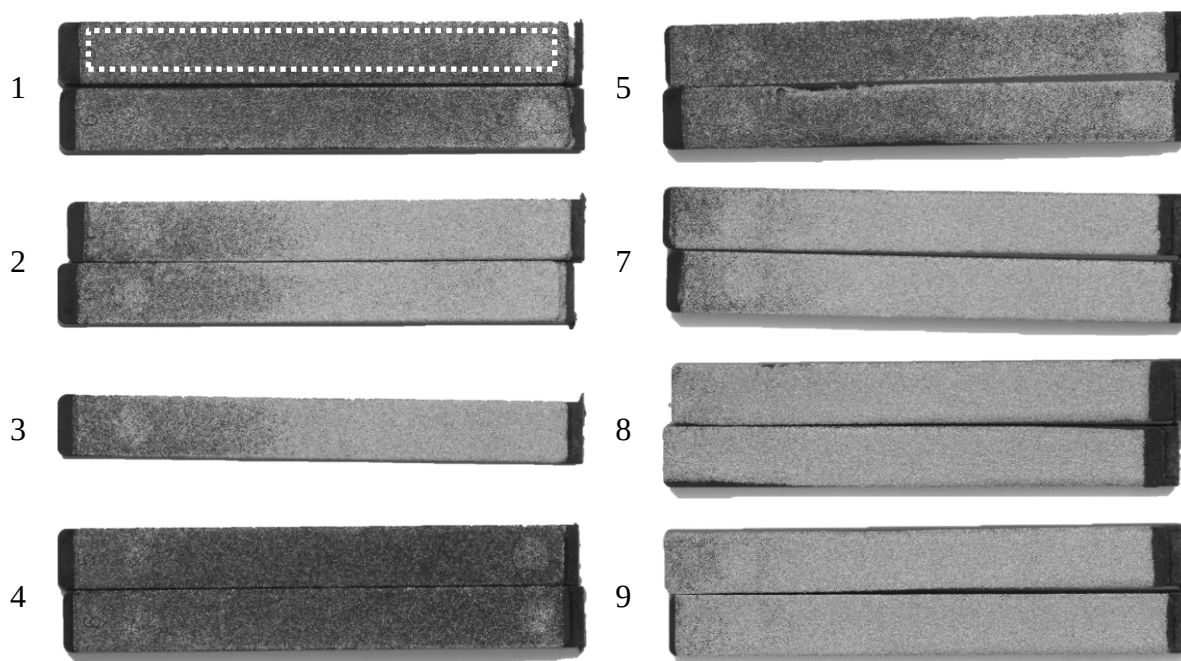


17. ábra A 6. minta keresztmetszete (nagyítás 100×)

4.2.2. *Vizsgálat szürkeségi fok elemzéssel*

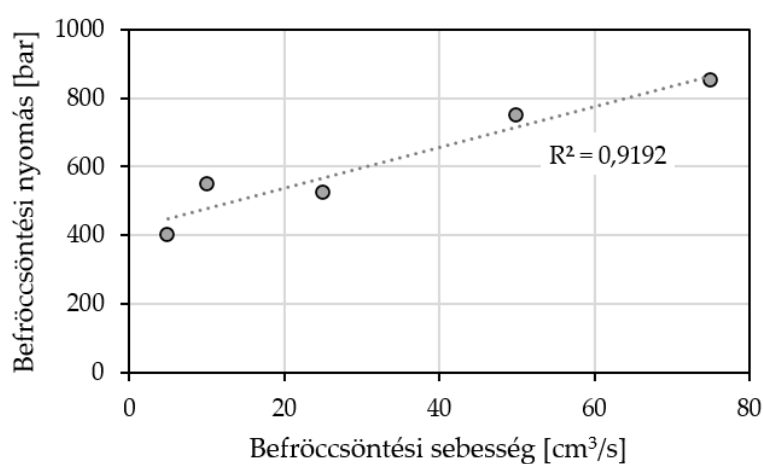
Mivel a minták vizsgálatára nem elegendő az egyéni szubjektivitását is tartalmazó szemrevételezés vagy optikai mikroszkópos vizsgálat, ezért egy olyan módszert alkalmaztam, amivel a minták közti átítási különbség számszerűsíthető. A különböző technológia paraméterekkel fröccsöntött minták összehasonlításához optikai vizsgálatot fejlesztettem, amiben a minták felületének szürkeségi fokán keresztül elemzem az átítás mértékét. Célom a minták esetén a polimer ömledék pórusokba történő behatolásának elemzése. Az optikai módszer lényege, hogy a polimer ömledék fekete, amíg a fémhab világosszürke. A fémhabon áthatoló ömledék megváltoztatja annak színárnyalatát. A próbatest színének elemzésével így megállapítható, hogy a polimer ömledék milyen mértékben itatta át a fémhabot.

A vizsgálat első lépéseként a fröccsöntött mintákról síkgyas szkennert alkalmazva digitális képet készítettem (18. ábra). A mérés során a minták felületén kijelöltem az azonos méretű (körülbelül 350 000 pixelt tartalmazó) vizsgálandó tartományokat (téglalap szaggatott vonallal), amelyben a szürkeségi fokot mérem. A vizsgálatához egy kereskedelmi forgalomban kapható képelemző programot használtam, amely elemzi a kijelölt térrész pixeleinek mennyiségét, meghatározza a szürkeségi fok kijelölt térrészre vonatkozó átlagát, mediánját és hisztogramot készít a meghatározott szürkeségi fok értékekből.



18. ábra A síkágyas szkennelrel digitalizált minták

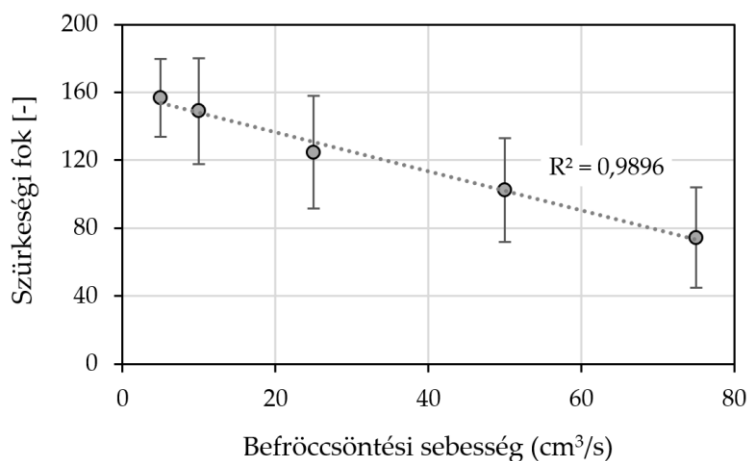
A próbatestekre vonatkozó szürkeségi fok értékeket ezután összevettem a gyártási paraméterekkel, a kapott tendenciákat diagramokon ábrázoltam. Az alkalmazott fröccsöntőgépen a fröccsöntési sebesség beállítására van lehetőség, a befroccsöntési nyomás ennek függvényében változik. A szürkeségi fok befroccsöntési nyomás függvényében történő vizsgálatához megvizsgáltam, hogy a befroccsöntési sebesség és nyomás hogyan viszonyul egymáshoz (19. ábra). Látható, hogy a befroccsöntési sebesség és nyomás közti kapcsolat lineáris.



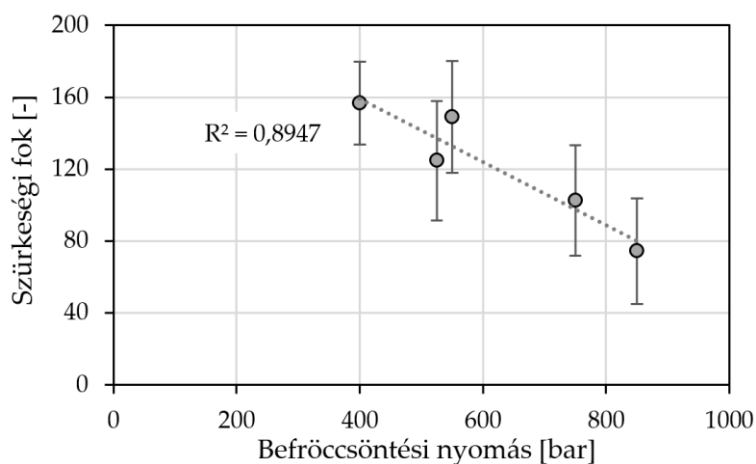
19. ábra Az alkalmazott befroccsöntési sebesség és befroccsöntési nyomás kapcsolata

A próbatestek esetén megvizsgáltam a befroccsöntési sebesség (20. ábra) és befroccsöntési nyomás (21. ábra) hatására bekövetkező szürkeségi fok változásokat. A diagramok alapján

látható, hogy a befroccsöntési sebesség és a befroccsöntési nyomás növelésével a szűrkeségi fok csökken. A szűrkeség csökkenése jelen esetben a fémhab nagyobb átítatását jelenti. Ekkor a nagyobb nyomás hatására a polimer ömledék nagy mértékben kitölti a fémhab pórusait, jelentős mennyiségben kijuthat a próbatest felületére is. Nagy szűrkeségi 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.

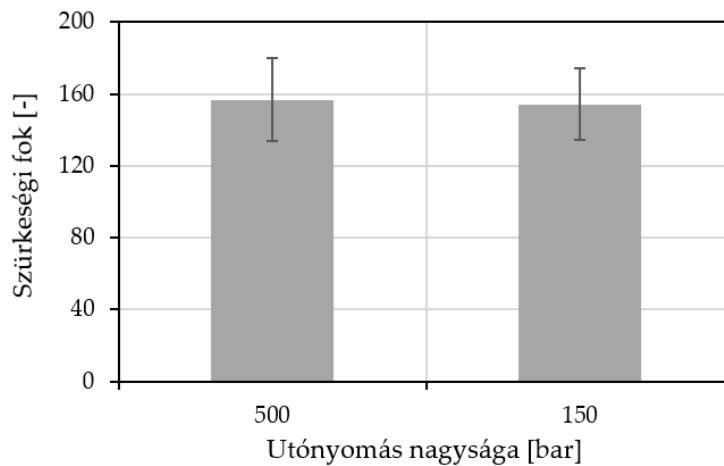


20. ábra A minták szűrkeségi foka a befroccsöntési sebesség függvényében



21. ábra A minták szűrkeségi foka a befroccsöntési nyomás függvényében

Az utónyomás hatásának vizsgálatához összehasonlítottam az azonos fröccsnyomással (befroccsöntési sebességgel), de eltérő utónyomással gyártott minták szűrkeségi fokait (22. ábra). Kétmintás t-próbát végeztem, és 95%-os szignifikancia szintet figyelembe véve igazoltam, hogy az utónyomás értékében bekövetkező jelentős változás nem okozott szignifikáns eltérést a minták szűrkeségi fokaiban.

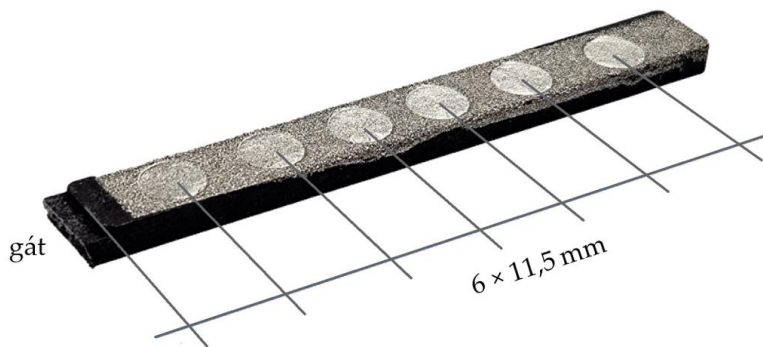


22. ábra Az utónyomás hatása a minták szürkeségi fokára

A fröccsöntési sebesség (nyomás) szerepe jelentős a fémhabra fröccsöntött próbatestek szürkeségi foka, vagyis polimerrel történő átitatása tekintetében. Az utónyomás nagyságának hatása elhanyagolható a kitöltési nyomással szemben. Az utónyomás a próbatestek fajtérfogatát és tömegét jelentősen befolyásolja, a fémhab átitatására azonban nincs szignifikáns hatással. Ennek oka az lehet, hogy a fémhab jó hővezetőképessége miatt helyileg nagy 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 átitatni a fémhab pórusait.

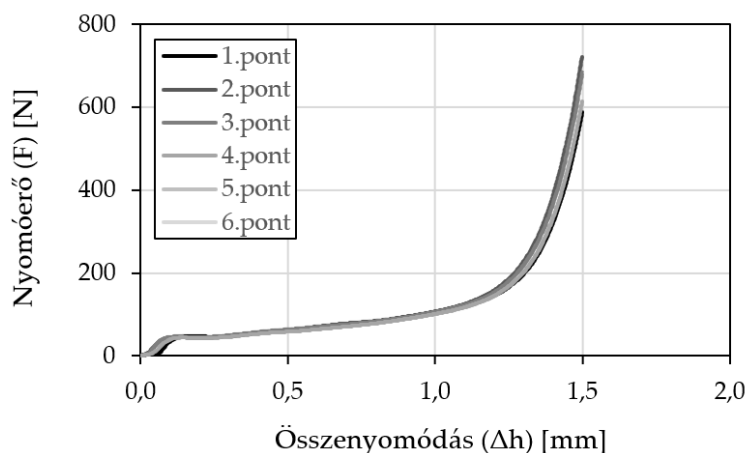
4.2.3. Nyomóvizsgálat

A fémhabra fröccsöntött bipoláris lemezek egyik legjelentősebb terhelése járművek hidrogéncelláiban történő alkalmazáskor a cellát érő nyomó igénybevétel. A minták nyomó igénybevétellel szembeni viselkedésének elemzése céljából nyomóvizsgálatot végeztem. A próbatestek vizuális vizsgálata során egyes minták esetén jelentős különbség mutatkozott az átitatásban a folyási út elején és végén. A próbatestek nyomó igénybevétellel szembeni ellenállásának elemzéséhez minden próbatesten 6 nyomásmérést végeztem (23. ábra).



23. ábra A nyomóvizsgálat pozíciói egy próbatesten

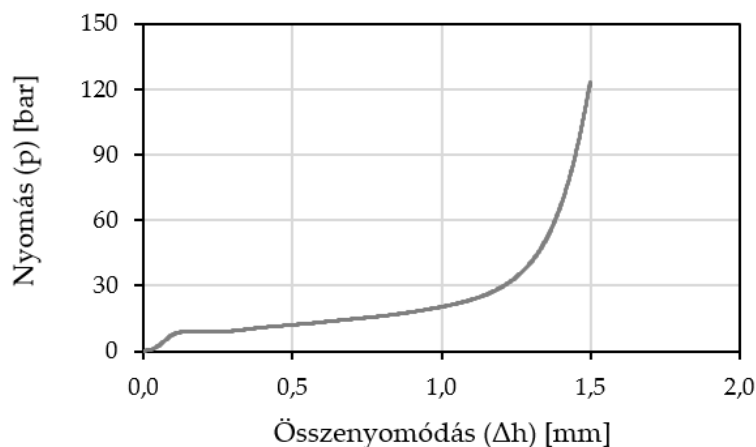
A nyomásmérést a fröccsöntött és a fémhabra fröccsöntött $80 \times 10 \times 4$ mm-es próbatesteken, illetve a fémhab lemezen is elvégeztem. A fémhab lemez nyomóvizsgálata során a mért erő – összenyomódás diagram (24. ábra) kezdeti szakaszán a fémhab celláinak összeroppanása történik, majd a roncsolt szerkezet tömörödése megy végbe. A fémhab pórusos szerkezetének kedvező tulajdonságainak, például gázáteresztőképességének kihasználásához a fémhabra eső terhelés nem lehet nagyobb a habra jellemző kritikus erőértéknél. A mért görbék láthatóan egybeesnek, fröccsöntés előtt a fémhab lemez mérési pontjaiban nem mutatkoztak jelentős eltérések.



24. ábra A nyomóvizsgálat eredménye a fémhab lemez mérési pontjaiban

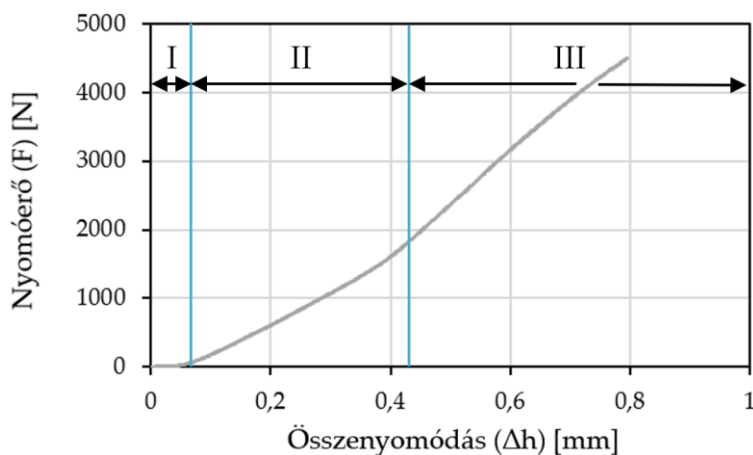
A fémhab esetén a kritikus terhelőerőből meghatároztam azt a nyomásértéket, amelynél a használt nikkel hab cellái feltehetően összeroppannak (25. ábra). Jelen esetben a habszerkezet körülbelül 1 MPa (10 bar) nyomás hatására erősen deformálódhat, fröccsöntési alkalmazáshoz, a szerszámüregben uralkodó nagy nyomásoknak való ellenálláshoz nagyobb merevségű hablemez szükséges. A gyártási folyamaton kívül az alkalmazás során is folyamatos nyomó igénybevétel terheli a bipoláris lemezeket az összeszerelés, a stack-ben történő összeszorítás

hatására. A bipoláris lemez és a használt fémhab szerkezetének az összeszorító erővel szemben is ellenállónak kell lennie. 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.



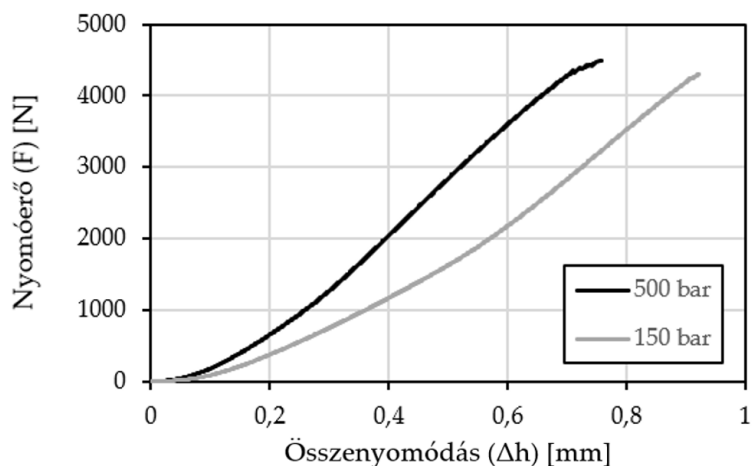
25. ábra A fémhab lemez összenyomódása nyomás hatására

A fémhabra fröccsöntött minták gyártásakor négyfészkés szerszámot alkalmaztam, az egy ciklusban gyártott négy próbatest közül kettőt hab nélkül fröccsöntöttem. Ennek köszönhetően a fémhabra fröccsöntött próbatestek benyomódása mellett vizsgáltam a megegyező gyártási paraméterekkel rendelkező hab nélküli fröccsöntött próbatesteket is. A görbék alapján a benyomódás három szakaszát különböztetem meg (26. ábra). Először a beállított előterhelés hatása érzékelhető (I.), ez a szakasz elhanyagolható. Ezt követően (II.) a benyomódás során a beszívódások „kompenzálása” történik, tekinthető „kilapulási” szakasznak. Az utolsó (III.) szakaszban a beszívódások kompenzálása már megtörtént, már az anyag összenyomódása és a valós merevség megállapítása lehetséges.



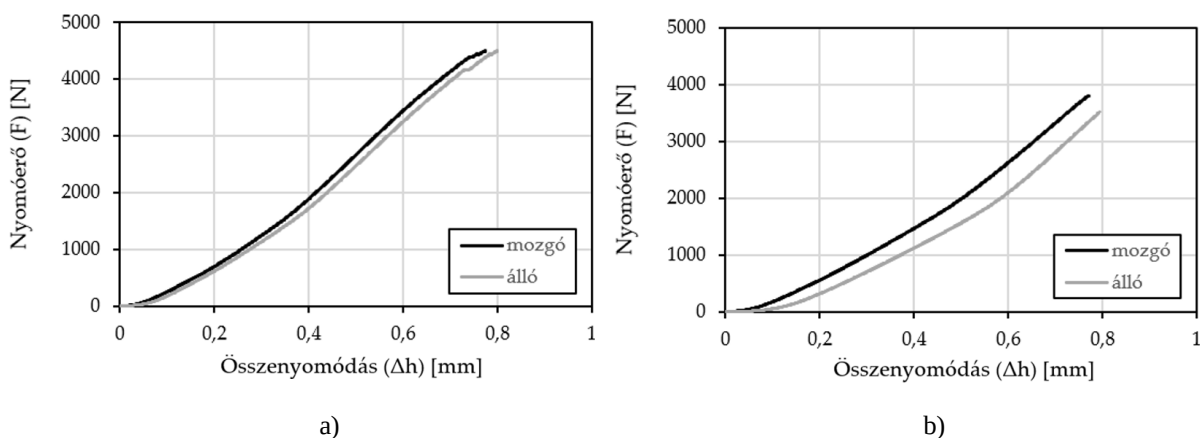
26. ábra A 4. hab nélküli minta összenyomódása

Az utónyomás benyomódásra gyakorolt hatásának elemzéséhez ábrázoltam két megegyező befroccsöntési sebességgel ($25 \text{ cm}^3/\text{s}$), de eltérő utónyomással gyártott próbatest mért eredményeit (27. ábra). Látható, hogy túl kicsi utónyomás esetén a próbatest összenyomódása nagyobb ugyanakkora terhelőerő hatására. Ennek okát az elégtelen utónyomás következtében kialakuló beszívódások jelenthetik. Nagyobb utónyomás alkalmazásával ez a jelenség mérsékelhető lehet. Ugyanakkor a hab átítatására és összenyomódására a kisebb nyomás jobb a megfelelő funkcionalitású szerkezet elérésére.



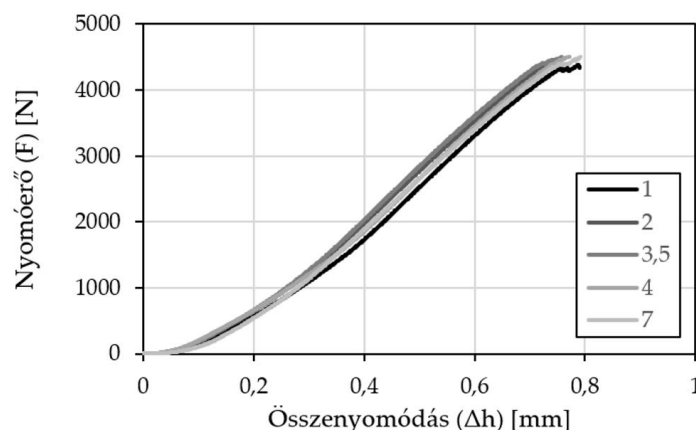
27. ábra Az utónyomás hatása a benyomódás mértékére

A legnagyobb befroccsöntési és utónyomással (4. minta, 28.a ábra), illetve a kis befroccsöntési és utónyomással (8. minta, 28.b ábra) gyártott próbatestek eredményeit hasonlítottam össze. A próbatestek esetén a gát nem szimmetrikusan helyezkedik el a falvastagság mentén, ennek megfelelően az utónyomás hatására létrehozott kompenzálás sem egyezik meg teljesen a két oldalon, mivel eltérő a két oldalon kialakuló beszívódás jellege.



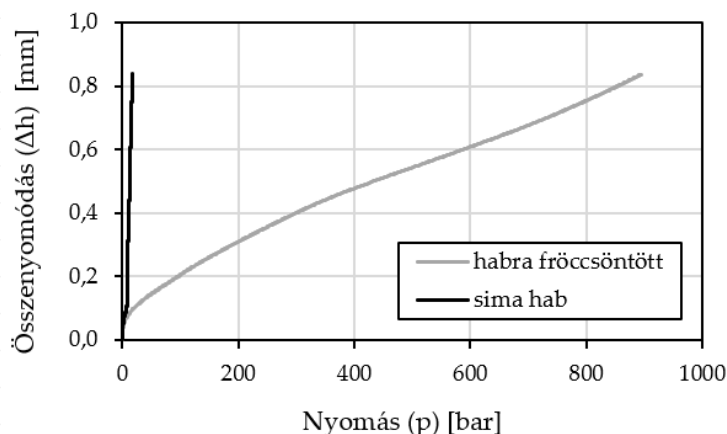
28. ábra A 4. (a) és a 8. (b) hab nélküli minta benyomódása

A megegyező (500 bar) utónyomással gyártott próbatestek nyomóerő – összenyomódás görbéi közelítőleg egybeesnek (29. ábra). Ennek megfelelően a gyártási paraméterek közül az utónyomás gyakorolhat nagyobb hatást a benyomódásra a beszívódásképződés miatt.



29. ábra A gyártási paraméterek hatása a fémhabra fröccsöntött minták benyomódására

A sima fémhab lemez és a fémhabra fröccsöntött próbatestek nyomás – összenyomódás görbéjéből (30. ábra) látható, hogy az átítatott fémhab teherbírása nagyságrendekkel nagyobb a fémhabhoz képest.



30. ábra A fémhab lemez és a habra fröccsöntött próbatest összenyomódása a nyomás függvényében

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 során kellően nagy nyomások alkalmazása szükséges a beszívódások elkerüléséhez, de szükségszerűen kicsi a hab pórusainak kis mértékű kitöltéséhez. Ennek az ellentmondásnak a feloldására a technológia, vagy a szerkezet megváltoztatása szükséges, például többkomponensű fröccsöntés, vagy utólagos szerelési technológia alkalmazása.

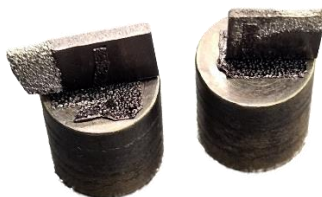
4.2.4. Vizsgálat pásztázó elektronmikroszkóppal

Az optikai mikroszkópos vizsgálat során a mintákban megtalálható sötét polimer és világos fémhab térrészek megnehezítették a jó minőségű, kontrasztos képek készítését. A megvilágítás beállításakor a polimer és fémhab részek egyszerre történő élesítését a jelentős színeltérés akadályozta. A lapka próbatestekben a fémhab és a polimer kapcsolatának vizsgálata céljából pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket készítettem. Az eltérő irányban elhelyezett fémhab lemezekkel gyártott lapka próbatestekből mintákat munkáltam ki (31. ábra).

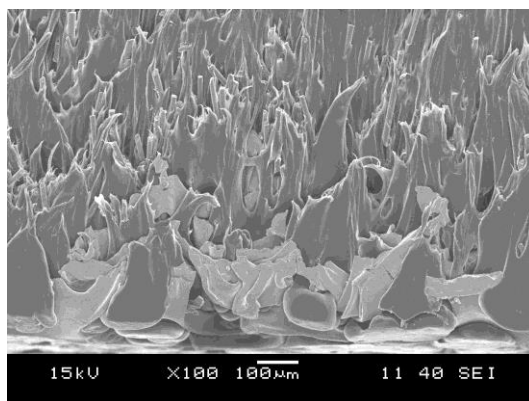


31. ábra A SEM minta kimunkálásának pozíciói a lapka próbatest esetén

A kivágott mintákat a mikroszkóp mintatartóira ragasztottam (32. ábra), majd az aranyozást követően a mikroszkóp mérőterébe helyeztem. A minták kivágásához ollót használtam, ami a vágási felület képlékeny deformációját eredményezte (33. ábra).

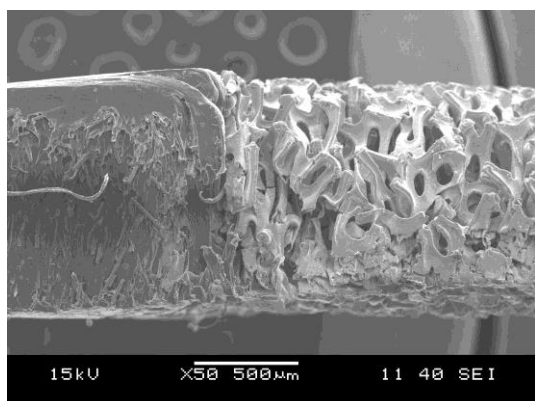


32. ábra A mintatartóra ragasztott, learanyozott minták

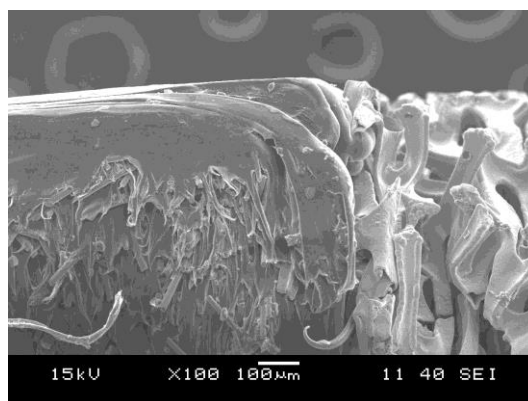


33. ábra A vágási felületen kialakult deformált réteg

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 (34.a ábra). Látható, hogy az ömledékfront a fémhabhoz érve megállt, a két alkotó élesen elkülönül egymástól (34.b ábra).



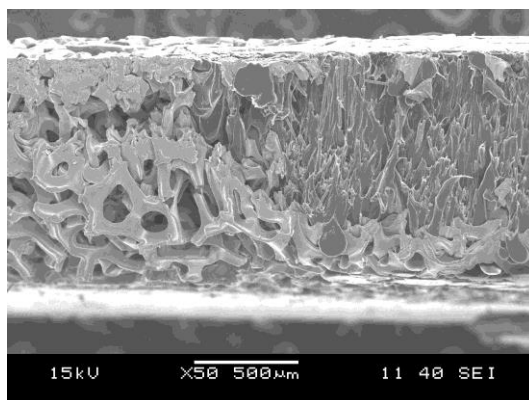
a)



b)

34. ábra Az ömledékfront és a fémhab találkozása részleges kitöltéssel gyártott próbatestnél 50× (a) és 100× (b) nagyításban

Az áramlási irányban elhelyezett fémhab lemezt tartalmazó lapka próbatestből kivágott minta esetén látható, hogy a polimer jelentősen behatolt a fémhab pórusaiba. Jól láthatók a polimer ömledékben található erősítőszálak, azonban az üvegszálak jelentős része a fémhab celláin kívül helyezkedik el, azok nem hatoltak be nagy mértékben a pórusokba (35. ábra).



35. ábra Az ömledékfront és az áramlás irányában elhelyezett fémhab találkozása

5. ÖSSZEFOGLALÁS

5.1. Magyar nyelvű összefoglaló

Dolgozatomban hidrogéncellák bipoláris lemezeként alkalmazható próbatestek hibrid gyártásának előkísérletét végeztem el. Fémhabra fröccsöntött próbatesteket gyártottam és tulajdonságaikat vizsgáltam. A fröccsöntéshez nikkel fémhabot és üvegszál erősítésű PP alapanyagot alkalmaztam, amelynek viszkozitása nagyságrendileg megegyezik a bipoláris lemezek esetén a hővezetés megvalósítására alkalmazható szénszál erősített polimer viszkozitásával. A gyártási paraméterek optimalizálása érdekében a próbatesteket eltérő fröccsöntési sebességgel és utónyomással gyártottam. A bipoláris lemezekben a fémhab célszerűen a felületen fekszik, így a felületi elektronfelvétel és gázáteresztés megvalósulhat. Ennek megfelelően célom olyan gyártástechnológia megalkotása, amellyel a kívánt kis mértékű átítatás megvalósítható.

Munkám során optikai és pásztázó elektronmikroszkóppal felvételeket készítettem a próbatestekről és ezeket elemeztem. A számszerű összehasonlíthatóság érdekében optikai vizsgálatot fejlesztettem, amely a fémhab és a polimer eltérő színét használja ki. A módszer segítségével a minták digitalizálása után az átítatás (szürkeség) mértékéről számszerű adatot kaphatunk, amely alapján a minták és az alkalmazott gyártástechnológia összehasonlíthatóvá válik. A vizsgálat segítségével megállapítottam, hogy az utónyomás hatása elhanyagolható a próbatestek átítatására (szürkeségi fokára) vonatkozóan, a fröccsöntési sebesség hatása ezzel ellentétben azonban jelentős. Megállapítottam, hogy a fröccsöntési sebesség (nyomás) növelésével a szürkeségi fok csökken, vagyis az átítatás mértéke nő. Ekkor a mikroszkópi felvételekkel igazolhatóan nagyobb mértékű ömledék behatolás történik a fémhab pórusaiba.

A bipoláris lemezek egyik legjellemzőbb terhelés járművekben történő alkalmazás esetén a nyomó igénybevétel. Ennek ellenőrzéséhez nyomóvizsgálatot végeztem a próbatesteken. A mérés során vizsgáltam a fémhab, a fröccsöntött próbatest és a fémhabra fröccsöntött próbatest nyomó teherbírását. Megállapítottam, hogy az utónyomás mértéke jelentős hatással van a lemez benyomódására a gyártáskor létrejövő beszívódások miatt.

A gyártástechnológia optimalizálása során a fröccsöntési nyomás megfelelő beállítása nélkülözhetetlen. Kis nyomások esetén beszívódások jelenhetnek meg, nagy nyomások esetén a hab pórusainak átítatása jelentős lehet. Az ellentmondás feloldására a többkomponensű fröccsöntés vagy a gyártás utáni összeszerelés megoldást nyújthat.

5.2. További megoldásra váró feladatok

Fontos kitűzött célom a technológia további fejlesztése. Jelen dolgozatban előkísérletet végeztem annak érdekében, hogy a fémhabra fröccsöntés technológiáját vizsgálhassam. Az alkalmazott üvegszál erősítésű polimer kompozit kiválóan fröccsönthető alapanyag és viszkozitása hasonló egy ideális esetben alkalmazott (például szénszál) alapanyaghoz, a megfelelő alapanyag felhasználásával történő kísérleti gyártás jövőbeli célom. A technológia további elemzéséhez célom egy nagyobb merevséggel rendelkező fémhab alkalmazása a technológiában.

Célom ezen kívül a fémhab szénszövetre cserélése és a gyártás, illetve a próbatestek vizsgálata a bipoláris lemezként történő alkalmazhatóság szempontjából. Ekkor olyan bipoláris lemez gyártására kerülne sor, amely szénszál erősítésű polimer kompozitot és szénszövetet tartalmaz, így életciklusa végén a bipoláris lemez anyagában újrahasznosíthatóvá válik.

A technológia további vizsgálatában segítséget nyújthat belső nyomásmérő szenzorok alkalmazása a fröccsöntő szerszámban. A szenzorokkal pontosan meghatározhatóvá válhat, hogy a szerszámüregben mekkora nyomás hatott a fémhabra. A szerszámüregben több nyomásmérő szenzor elhelyezésével a próbatesteken kialakuló változó átítatottság elemezhetővé válna az adott pozícióban mért nyomások felhasználásával.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. Sopian K., Daud W. R. W.: Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells. *Renewable Energy*, 31, 719-727 (2006).
2. Daud W. R. W., Rosli R. E., Majlan E. H., Hamid S. A. A., Mohamed R., Husaini T.: PEM fuel cell system control: A review. *Renewable Energy*, 113, 620-638 (2017).
3. 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).
4. Sharma S., Ghoshal S. K.: Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1151-1158 (2015).
5. 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).
6. 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).
7. 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).
8. Awin Y., Dukhan N.: Metal-Foam Bipolar Plate for PEM Fuel Cells: Simulations and Preliminary Results. *Materials Science Forum*, 933, 342-350 (2018).
9. Neef H. J.: International overview of hydrogen and fuel cell research. *Energy*, 34, 327-333 (2009).
10. Fan L., Tu Z., Chan S. H.: Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. *Energy Reports*, 7, 8421-8446 (2021).
11. Töpler J., Lehmann J.: *Hydrogen and Fuel Cell, technologies and market perspective*. Springer, Berlin (2016).
12. Nishimura C., Wu T. H., Iso E., Fujimoto A., Chapon P., Hirose J.: Proton Exchange Membrane Fuel Cell Bipolar Plate Analysis by GD-OES and Raman. Horiba Scientific.
<https://static.horiba.com/fileadmin/Horiba/Application/Energy/Hydrogen/Documents/Scientific/GD-RA-01-Proton-Exchange-Membrane-Fuel-Cell-Bipolar-Plate-Analyses-by-GD-OES-and-Raman.pdf> (2023.10.28)
13. Yumiya H.: Toyota Fuel Cell System (TFCS). *World Electric Vehicle Journal*, 7, 1-8 (2015).

14. Beckhaus P., Dokupil M., Heinzl A., Souzani S., Spitta C.: On-board fuel cell power supply for sailing yachts. *Journal of Power Sources*, 145, 639-643 (2005).
15. Mamaghani A. H., Najafi B., Casalegno A., Rinaldi F.: Optimization of an HT-PEM fuel cell based residential micro combined heat and power system: A multi-objective approach. *Journal of Cleaner Production*, 180, 126-138 (2018).
16. Mori D., Hirose K.: Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 4569-4574 (2009).
17. Hwang H. T., Varma A.: Hydrogen storage for fuel cell vehicles. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 5, 24-48 (2014).
18. Li M., Bai Y., Zhang C., Song Y., Jiang S., Grouset D., Zhang M.: Review on the research of hydrogen storage system fast refueling in fuel cell vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 10677-10693 (2019).
19. 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).
20. Kovac A., Paranos M., Marcius D.: Hydrogen in energy transition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 10016-10035 (2021).
21. Awin Y., Dukhan N.: Experimental performance assessment of metal-foam flow fields for proton exchange membrane fuel cells. *Applied Energy*, 252, 113458 (2019).
22. 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).
23. Mori K., Matsuda Y.: Graphitization furnace and method for producing graphite. US 9,139,438 B2, United States (2015).
24. Lei X., Wang L., Shen B., Sun F., Zhang Z.: Comparison of chemical vapor deposition diamond-, diamond-like carbon- and TiAlN-coated microdrills in graphite machining. *Journal of Engineering Manufacture*, 227, 1299-1309 (2013).
25. Joseph S., McClure J. C., Sebastian P. J., Moreira J., Valenzuela E.: Polyaniline and polypyrrole coatings on aluminum for PEM fuel cell bipolar plates. *Journal of Power Sources*, 177, 161-166 (2008).
26. Wang S. H., Peng J., Lui W. B.: Surface modification and development of titanium bipolar plates for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 160, 485-489 (2006).
27. Bi F., Yi P., Zhou T., Peng L., Lai X.: Effects of Al incorporation on the interfacial conductivity and corrosion resistance of CrN film on SS316L as

- bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 9790-9802 (2015).
28. Feng K., Cai X., Sun H., Li Z., Chu P. K.: Carbon coated stainless steel bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Diamond & Related Materials*, 19, 1354-1361 (2010).
 29. Hermann A., Chaudhuri T., Spagnol P.: Bipolar plates for PEM fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 1297-1302 (2005).
 30. Kumagai M., Myung S. T., Asaishi R., Sun Y. K., Yashiro H.: Nanosized TiN-SBR hybrid coating of stainless steel as bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Electrochimica Acta*, 54, 574-581 (2008).
 31. 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).
 32. Kumar A., Reddy R. G.: Materials and design development for bipolar/end plates in fuel cells. *Journal of Power Sources*, 129, 62-67 (2004).
 33. 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).
 34. 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).
 35. Lefebvre L. P., Banhart J., Dunand D. C.: Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments. *Advanced Engineering Materials*, 10, 775-787 (2008).
 36. Zitha P., Banhart J., Verbist G.: Metallic foams: challenges and opportunities. *MIT-Verlag, Bremen*, 13-20 (2000).
 37. Ashby M. F., Tianjian L.: Metal foams: A survey. *Science in China (Series B)*, 46, 521-532 (2003).
 38. Arjuan A., Baroutaji A., Praveen A. S., Olabi A. G., Wang C. J.: Acoustic Performance of Metallic Foams. *Reference Module in Material Science and Materials Engineering*, doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11561-9, 1-25 (2019).
 39. García-Monero F.: Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production. *Materials*, 85, 1-27 (2016).
 40. Sharma S. S., Yadav S., Joshi A., Goyal A., Khatri R.: Application of metallic foam in vehicle structure: A review. *Materials Today: Proceedings*, 63, 347-353 (2022).
 41. Banhart J.: Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46, 559-632 (2001).

42. Kulshreshtha A., Dhakad S. K.: Preparation of metal foam by different methods: A review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1784-1790 (2020).
43. Schwartz D. S., Shih D. S., Evans A. G., Wadley H. N. G.: Porous and Cellular Materials for Structural Applications. *Materials Research Society, Symposium Proceedings*, 521, 1-324 (1998).
44. Kondoh K.: Powder Metallurgy. InTech, Rijeka (2012).
45. Xu Y., Wang X., Hao Q.: A mini review on thermally conductive polymers and polymer-based composites. *Composites Communications*, 24, 1-11, 100617 (2021).
46. 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).
47. 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).
48. Watari K., Shinde S. L.: High Thermal Conductivity Materials. *Materials Research Society Bulletin*, 26, 440-444 (2001).
49. Kidalov S. V., Shakhov F. M.: Thermal Conductivity of Diamond Composites. *Materials*, 2, 2467-2495 (2009).
50. Abyzov A. M., Goryunov A. V., Shakhov F. M.: Effective thermal conductivity of disperse materials. I. Compliance of common models with experimental data. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 67, 752-767 (2013).
51. He X., Wang Y.: Recent Advances in the Rational Design of Thermal Conductive Polymer Composites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60, 1137-1154 (2021).
52. Zhang H., Zhang X., Fang Z., Huang Y., Xu H., Liu Y., Wu D., Zhang J., Sun J.: Recent Advances in Preparation, Mechanisms, and Applications of Thermally Conductive Polymer Composites: A Review. *Journal of Composites Science*, 180, 1-46, doi: 10.3390 (2020).
53. Awuzie C. I.: Conducting Polymers. *Materials Today: Proceedings*, 4, 5721-5726 (2017).
54. Folorunso O., Hamam Y., Sadiku R., Ray S. S., Joseph A. G.: Parametric Analysis of Electrical Conductivity of Polymer-Composites. *Polymers*, 11, 1-20, (2019).
55. Meaden G. T.: Electrical Resistance of Metals. Springer Science + Business Media (1965).
56. Kaur G., Adhikari R., Cass P., Bown M., Gunatillake P.: Electrically conductive polymers and composites for biomedical applications. *Royal Society of Chemistry*, 5, 37553-37567 (2015).

57. Das T. K., Prusty S.: Review on Conducting Polymers and Their Applications. *Polymer-Plastic Technology and Engineering*, 51, 1487-1500 (2012).
58. Balint R., Cassidy N. J., Cartmell S. H.: Conductive polymers: Towards a smart biomaterial for tissue engineering. *Acta Biomaterialia*, 10, 2341-2353 (2014).
59. Jacobs I. E., Wang F., Hafezi N., Medina-Plaza C., Harrelson T. F., Li J., Augustine M. P., Mascal M., Moulé A. J.: Quantitative Dedoping of Conductive Polymers. *Chemistry of Materials*, 29, 832-841 (2017).
60. Chiang C. K., Fincher C. R. Jr., Park Y. W., Heeger A. J., Shirakawa H., Louis E. J., Gau S. C., MacDiarmid A. G.: Electrical Conductivity of Doped Polyacetylene. *Physical Review Letters*, 39, 1098-1101 (1977).
61. Luo T., Wang Q.: Effects of Graphite on Electrically Conductive Cementitious Composite Properties: A Review. *Materials*, 14, 1-26 (2021).
62. Radzuan N. A. M., Sulong A. B., Sahari J.: A review of electrical conductivity models for conductive polymer composite. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 9262-9273 (2017).
63. Taherian R., Hadianfard M. J., Golikand A. N.: A New Equation for Predicting Electrical Conductivity of Carbon-Filled Polymer Composites Used for Bipolar Plates of Fuel Cells. *Journal of Applied Polymer Science*, 128, 1497-1509 (2013).
64. Liu H., Li Q., Zhang S., Yin R., Liu X., He Y., Dai K., Shan C., Guo J., Liu C., Shen C., Wang X., Wang N., Wang Z., Wei R., Guo Z.: Electrically conductive polymer composites for smart flexible strain sensors: a critical review. *Journal of Materials Chemistry*, 6, 12121-12141 (2018).
65. https://plastore.it/cgi2018/file818/7511_pp%20omo%20tecnoprene%20ak6hi.pdf (2023.10.29).
66. https://milimex.com.pl/do_pobrania/tworzywa_konstrukcyjne.pdf (2023.10.29).
67. Török D.: Fröccsöntő csigacsúcsok hatása a színkeveredésre és a technológiai paraméterekre. PhD értekezés. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék (2019).