

Ipari együttműködés – Bosch - ME, ATI közös járműipari kutatások – a FIEK projekt keretében

Marosné Berkes Mária

egyetemi tanár (Dr. habil.), Miskolci Egyetem, Magyarország
Anyagszerkezetani és Anyagtechnológiai Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, email: maria.maros@uni-miskolc.hu

Szilágyiné Biró Andrea

mérnök-üzletkötő (PhD), Oerlikon Balzers Coating Austria GmbH Magyarországi Fióktelepe,
H-8000 Székesfehérvár, Babér u. 6., email: andrea.biro@oerlikon.com

László Noémi

laborvezető, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., Magyarország
Mérnöki Divízió (BAY-ENG), Ipari Anyagtechnológiai Osztály
3519 Miskolc, Iglói út 2., email: noemi.laszlo@bayzoltan.hu

Fülöp Fruzsina

FIEK kutató, MSc hallgató, Miskolci Egyetem, Magyarország
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, email: fulop.fruzsina@uni-miskolc.hu

Kelemen László Attila

fejlesztő mérnök (PhD), Robert Bosch Energy and Body Systems Kft.,
ED-TS/EHV2-Mc, Magyarország,
3526 Miskolc, Robert Bosch park 3., email: LaszloAttila.Kelemen@hu.bosch.com

Absztrakt

A Miskolci Egyetem egyik nagyszabású projektje számos lehetőséget kínál az egyetemi és ipari partnerek együttműködésére az anyagtudományok legkülönbözőbb területein. Ebben a cikkben a Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Anyagszerkezetani és Anyagtechnológiai Intézete és a Robert Bosch Energy and Body Systems Kft. szakembereinek együttműködésében megvalósított három kutatási témában eddig elért eredményekről számolunk be. A bemutatott témakörök – Anyagkiválasztás ventilátor kerék fröccsönthetőségének javítása céljából; Vezetőképes kenőanyagok fejlesztése gördülő csapágyakhoz; Polimer alkatrészek kopásállóságának növelése aktív ernyős plazmanitridálással – ún. alapkutatásokhoz kapcsolódó témakörök. Az elért eredmények hozzájárulhatnak az autóiipari fejlesztések során olyan új konstrukciók, termékek kidolgozásához és újszerű technológiák bevezetéséhez, amelyek révén az ipari partner versenyképes piaci termékekkel bővítheti választékát az autóiipari alkatrészekkel szemben támasztott egyre magasabb követelmények kielégítése, az élettartam és a megbízhatóság növelése mellett.

Kulcsszavak: járműipar, tribológia, anyagválasztás, plazmanitridálás, kopás

Abstract

University of Miskolc coordinates several large projects providing cooperation between the university and industry in various fields of materials sciences. The current paper introduces the latest results obtained in three subprojects realized in cooperation between the experts of the Institute of Materials Science and Technology and the Robert Bosch Energy and Body Systems Ltd. (Miskolc, Hungary). The presented topics – Materials selection for improving the injection mouldability of fan wheel; Development of electrically conductive lubricants for rolling bearings; Improving the wear resistance of polymer components by active screen plasma nitriding – both represent basic research issues. The obtained results can contribute to work out new products and technologies, based on which the industrial partner can expand its portfolio with competitive market products to meet the ever-increasing demands on automotive components, while increasing durability and reliability, as well.

Keywords: automotive industry, tribology, materials selection, plasma nitriding, wear

1. Bevezetés

A Miskolci Egyetem egyik nagyszabású projektje a „Korszerű anyagok és intelligens technológiák FIEK létrehozása a Miskolci Egyetemen” c. GINOP-2.3.4-15-2016-00004 azonosító számú, 4 éves (2016-2020 közötti) futamidejű kutatási program, amely az egyetem és 4 ipari partner együttműködésével valósul meg. Ennek a mintegy száz, rendkívül sokféle kutatási résztémát érintő programnak a keretében intézetünk, az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet (továbbiakban ATI) a BOSCH szakembereivel közösen több olyan kutatási program megvalósításában vett részt, amely a különféle autóiipari alkatrészek anyag- és technológia fejlesztésére irányuló feladatok megoldását tűzte ki célul.

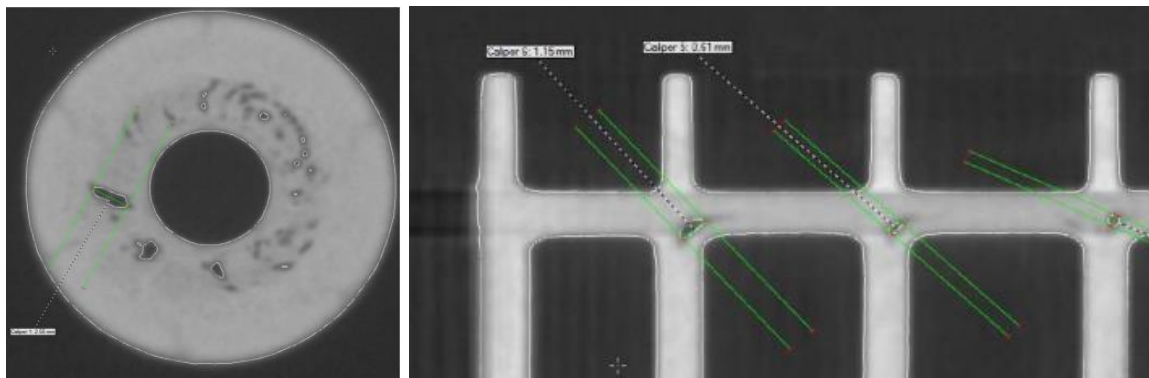
Ennek a cikknek a keretében néhány olyan kutatásról és azok eredményeiről szeretnénk röviden áttekintést adni, amely a fentnevezett kutatási projekt *RP-2: Modern anyagtechnológiák* c. alprogramja keretében az anyagválasztás és a tribológia témaköreiben folyt az ME, ATI és a BOSCH együttműködésében. A projekt futamideje még tart, egyes témakörök még nem zárultak le, így a cikk három témakörben az eddig elért eredményekről számol be, emellett utal folyamatban lévő kutatási programok biztató eredményeire is.

Cikkünk a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának 70 éves fennállása alkalmából rendezett Jubileumi Tudományos Konferencián, az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet Szekciójában elhangzott azonos című előadás keretében bemutatott szakmai eredmények összefoglalása.

2. Járókerék számítógépes anyagválasztása

A “Ventilátor kerék alapanyag fejlesztése a gyárthatóság és szilárdság javítása érdekében” kutatási program keretében az egyik megoldandó ipari probléma az alábbi volt.

Gépkocsi légbefúvó motorjának járókerékében, amely jelenleg üvegszál erősítésű polipropilén (PPGF30) kompozitból készül, a fröccsöntés során anyaghibák keletkeznek, például légzárványok az agyrészben és a lapátokban, illetve az anyag gyengül az összecsapásvonalakban (1. ábra). Emiatt fenáll a veszélye a nyomtatékátviteli képesség csökkenésének, illetve az alkatrész az üzemi fordulatszámot jóval meghaladó teszteknek során szétrobbanhat.



1. ábra. Anyaghibák a fröccsöntött járókerékben (Forrás: Robert Bosch, 2017)

Feladatunk a technológiai probléma megoldása volt, amelyre több megoldási irányt kínált a projekt. Az egyik a technológia fejlesztése, a másik alternatív anyagok keresése. Ez utóbbi megvalósítására az ATI számítógéppel segített alternatív anyagválasztást végeztünk. Az alkalmazott módszer az Ashby féle anyagkiválasztási koncepció, amelyhez a Cambridge Engineering Selector c. számítógépes anyagkiválasztási szoftvert használtuk [1, 2, 3].

Az anyagok „megfelelt/nem felelt meg” típusú szűrését egy 15 elemű tulajdonságkritériumrendszer alapján végeztük, amely a műszaki-felhasználói (szilárdság, merevség, szívósság stb.) és technológiai szempontok (zsugorodás, önthetőség stb.) mellett gazdasági (ár, tömeg) és környezetvédelmi (CO₂ lábnyom) szempontokat is figyelembe vett. Ezek alapján 17 potenciálisan szóba jöhető anyagot kaptunk. Ezen kívül, bevontuk az anyagok választékába az autóiparban elterjedten használt üvegszál (GF) és karbonszál (CF) erősítésű PBT kompozitokat, valamint a jelenlegi alapanyag és annak kissé módosított alternatívájaként két PP alapú üvegszál erősítésű kompozitot (PP GF30 és PPGF20). Így összesen 24 féle szóba jöhető anyagminőséget határoztunk meg [4].

Az egyes anyagtulajdonságokat – annak érdekében, hogy numerikus értéküktől és mértékegységüktől függetlenül össze tudjuk őket hasonlítani – egy 5 fokozatú skálán kategóriákba soroltuk és dimenziótlan pontértékkel jellemeztük (1. táblázat.)

Ezek alapján az anyagok között rangsorolást végeztünk, majd a ventilátorkerék szempontjából releváns tulajdonságok fontosságát kifejező súlyfaktorokat definiáltunk, amelyek segítségével az egyes anyagminőségeket tovább rangsoroltuk.

A súlyozás során a következő súlyfaktorokat (SF) alkalmaztuk: Az anyagválasztás során a legfontosabb tulajdonság az alapanyag ára (SF=3), ezt követi a sűrűség, valamint a technológiai jellemzők közül a fröccsönthetőség, a lineáris zsugorodás (SF=2), majd a mechanikai tulajdonságok közül a fáradási szilárdság, a termikus tulajdonságok esetében az üvegesedési hőmérséklet, továbbá a környezeti hatások közül a sós vízzel szembeni ellenállás és vízfelvevő képesség (SF=1,5). Legkisebb (SF=1) súlyfaktort vettük figyelembe a következő tulajdonságokat: megengedett üzemi hőmérséklet, rugalmassági modulus, törési szívósság, vegyszer- és zsírállóság, valamint éghetőség.

Elvégezve a tulajdonságonkénti rangsorolást és meghatározva az anyagok súlyozott, összegzett rangsorát, megállapítottuk, hogy a megadott szempontrendszer szerint található a jelenlegi PPGF30 anyagot, vagy annak kisebb üvegszáltartalmú – PP GF20 homopolimer és kopolimer – változatait megelőző alternatívák (2. táblázat).

1. táblázat. Az anyagtulajdonságok 5 osztályos kategorizálásának pontrendszere

Tulajdonság	Az értékelésnél alkalmazott minőségi kategóriák és pontértékek				
	Nagyon rossz	Rossz	Elfogadható	Jó	Nagyon jó
	1	2	3	4	5
Ár (Á), HUF/kg	>900	750-900	600-750	500-600	<500
Sűrűség (ρ), kg/m ³	>1800	1400-1800	1200-1400	1100-1200	<1100
Fáradási szilárdság (σ_D), MPa	<30		3 pont, ha 30-35		>35
Törési szívósság, (K_{Ic}), MPa m ^{1/2}	<3,5		3 pont, ha 3,5-4		>4
Max. üzemi hőmérséklet ($T_{ü,max}$) °C	<110		3 pont, ha 110-130		>130
Önthetőség (Ö)	alkalmatlan	rossz	korlátozott	jó	kiváló
Vegyszerállóság (R_k)	korlátozott		3 pont, ha jó		kiváló
Vízállóság (sós) ($R_{v,s}$)	rossz		3 pont, ha jó		kiváló
Zsírállóság, (R_{zs})	rossz		3 pont, ha jó		kiváló
Rugalmassági modulus (E), GPa	<4,5		3 pont, ha 4,5-6		>6
Lineáris zsugorodás (ϵ_l)%	2 pont, ha <0,1 vagy >0,4			4 pont, ha 0,2-0,4	
Éghetőség (ÉG)	erősen ég		3 pont, ha gyengén ég		önoltó
Vízfelvevő képesség (VF)	nagy >0,08		3 pont, közepes 0,01-0,08		kicsi <0,01
Üvegesedési hőmérséklet (T_g) °C	>40	+25...+40 között	<25	<0	-40...+85 kívül

A 2. táblázatból elhagytuk a legrosszabban teljesítő utolsó 7 anyagminőséget (PBTCF30, PPA 40%, DAP, Epoxi kompozit (65% GF), PBT GF 30, PBT GF25; PF Novolac 20+20% MF+GF), továbbá helytakarékosság céljából kihagytuk a víz- és vegyszerállósági jellemzőket, amelyek 99%-ban kiváló minősítésűek voltak. A táblázatban pirossal jelöltük a jelenlegi alapanyagénál gyengébb, zölddel a jobb tulajdonságokat. A súlyfaktorok szerinti elemzés legfontosabb megállapításai az alábbiak voltak:

- A jelenlegi PP GF30 alapanyaggal az ár (SF=3) tekintetében csak két anyag, az első és a hatodik helyen álló PF kompozit vetekszik. Emellett a PP alapú további vizsgált kompozitok is hasonló, azaz kedvező árfekvésűek.
- A sűrűség (SF=2) vonatkozásában kizárólag akkor találunk a jelenleginél kedvezőbb anyagot, ha a mátrix továbbra is PP marad, és az üvegszál tartalmat csökkentjük.

- Az öntheticéget (SF=2) vizsgálva – amelynek javítása az anyagválasztási feladat elsődlegesen definiált célja, ezért meghatározó szerepű tulajdonság – már több előnyösebb anyag is található. Egyrészt megtartva a PP mátrix-anyagot, az üvegszál tartalom csökkentésével egyértelműen javul a fröccöntheticé, bár változatlan alpmátrix esetén ez a javulás csak a mechanikai tulajdonságok rovására érhető el. A nem PP alapú alternatív anyagokat is tekintve pedig csupán egy olyan további polimer típus van, amelynek változatai (az üvegszál tartalomtól függetlenül) a jelenlegi PP GF30-nál kedvezőbben öntheticék: ezek a folyadék-kristályos LCP-k.

2. táblázat. Az alternatív anyagok súlyozott rangsor szerinti első 10 eleme és azok tulajdonságai

ΣSúlyozott rangsor	Súly-faktor	3	2	1,5	1	1	2	1	1	2	1	1,5	1,5
	Anyag	Á, HUF/kg	ρ, kg/m ³	σ _D , MPa	K _{IC} , MPa·m ^{1/2}	T _{ü,max} , °C	Ö, –	R _{zs} , –	E, GPa	ε ₁ , %	ÉG, –	T _g , °C	VF, 10 ⁻² %
1	PF nagyszil. 30-60% GF	550-606	1,69e3-2e3	24-48	3,41-10,2	200-220	Jó	Kiváló	13,1-22,8	0,10-0,40	Önoltó	170-270	3,0-120
2	LCP 40%	1,57e3-2,22e3	1,7e3-1,71e3	60-66,4	5,59-5,82	162-211	Kiváló	Jó	18,3-19,8	0,31-0,47	Önoltó	116-124	0,48-0,52
	LCP 50%	1,38e3-1,93e3	1,75e3-1,78e3	59,3-65,5	4,32-4,5	171-215	Kiváló	Jó	22-22,4	0,17-0,26	Önoltó	116-124	0,25-0,27
3	PP GF30 Hom.	536-561	1,12e3-1,14e3	31,5-33,1	3,77-3,96	118-137	Jó	Kiváló	5,67-6,78	0,25-0,53	Erős	-14-6	1,18-5,40
4	PEKK 30%	1,81e4-2,02e4	1,49e3-1,53e3	69,4-76,7	2,5	233-288	Jó	Kiváló	11,8-12,6	0,25-0,35	Önoltó	159-163	6,3-7,7
5	LCP 45%	1,48e3-2,07e3	1,75e3-1,78e3	59,7-65,9	3,4-3,53	211-241	Kiváló	Jó	18,2-18,6	0,27-0,33	Önoltó	116-124	0,34-0,38
6	PF 40%	508-586	1,44e3-1,84e3	16,6-27,6	13,4-34,7	196-215	Jó	Kiváló	16,1-17	0,20-0,60	Önoltó	170-270	2,0-30
7	PP GF20 Kop.	606-634	1,020e3-1,06e3	17,6-18,5	2,42-2,54	103-122	Kiváló	Kiváló	2,58-3,36	0,22-0,52	Erős	-24-16	2,9-3,1
8	Epxi SMC 65%	826-938	1,82e3-1,85e3	87,1-102	6,66-8,5	177	Jó	Kiváló	21,3-22,4	0,05-0,1	Gyenge	182-201	0,07-0,08
9	PCT 40%	1,8e3-1,93e3	1,53e3-1,57e3	41,2-53,6	4,59-5,82	250-270	Kiváló	Kiváló	10,4-10,9	0,20-0,50	Önoltó	62-77	4,0-5,0
10	PP GF20 Hom.	547-569	1,01e3-1,08e3	23,6-24,8	3,03-3,18	106-125	Kiváló	Kiváló	3,9-5,2	0,28-0,77	Erős	-14-6	1,1-3,9

Mivel az osztályba sorolás és a súlyozás során elhanyagolásra kerülhetnek az alkalmazást kizáró okokat képviselő sajátosságok, ezért az egyes tulajdonságok tekintetében részletes egyedi elemzéseket is végeztünk a [4] tanulmányban arra vonatkozóan, hogy a rangsor élén álló, szóba jöhető anyagoknak az egyes tulajdonságok tekintetében mely korlátait, előnyeit kell figyelembe venni, amelyek alapján megtartjuk, vagy kizárjuk őket a végső döntés során a javasolt anyagok köréből. Az erős kizáró tényező nélküli anyagok sajátosságait összegezve az alábbiakat érdemes kiemelni:

- A PP mátrixú, kisebb üvegszál tartalmú kompozitok hasonlóan olcsók, kicsi a sűrűségük, és a csökkentett üvegszál tartalom következtében javul az önthetőségük. Amennyiben ezen alternatívára esik a választás, fontos az alábbiakra figyelmet fordítani:
 - A kisebb erősítőfázis tartalommal járó mechanikai tulajdonság-romlást valamilyen módon (pl. a mátrix adalékolása, módosítása, vagy egyéb, az önthetőséget nem rontó II. fázisok révén stb.) kompenzálni kell;
 - A zsugorodást a megengedett határok között kell tartani;
 - Figyelembe kell venni és esetleg javítani a csökkent hőtűrést;
 - A PP anyagok gyengeségeként említhető erős éghetőséget adalékokkal célszerű módosítani.
- A PF 40% erősítőszál tartalmú hőre keményedő kompozit egy lehetséges alternatíva a rendkívül kedvező ára miatt, de az önthetőség tekintetében nincsenek számszerű adataink, és a polimer hőre keményedő jellegéből adódó sajátosságokat és költségvonzatukat, amelyeket jelen kritériumrendszer nem vett figyelembe, számításba kell venni.
- Műszaki szempontból a legjobb alternatívát a folyadékkristályos polimerek csoportja képviseli. Megfontolandó, hogy a kizáró tényezőként említett rendkívül magas alapanyagár milyen módon befolyásolná az egész termékre vetített összköltségek alakulását, figyelembe véve a jelenlegi termékkel kapcsolatos gyártási és üzemeltetési problémákat és azok költségét.

Az elvégzett elemzés legfőbb következtetése, hogy a műszakilag jobban teljesítő anyagok az ár tekintetében nem versenyképesek. Ennek hátterében az újrahaznosíthatóság globális problémájának egyik megoldásaként született azon kollektív autógyártói megállapodás áll, amelynek értelmében néhány éve az autóiipari műanyag felhasználást a PP alapú műanyagok és kompozitjaik uralják, ezért az ár tekintetében nincs versenytársuk.

Az elemzések alapján nyitott kérdéseket és javaslatokat fogalmaztunk meg, amelyek a kutatás további irányát is kijelölhetik:

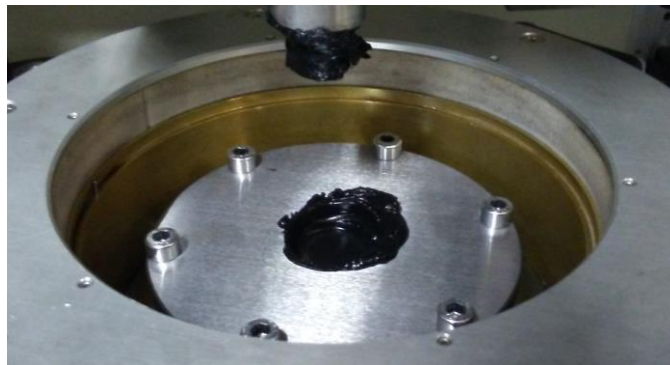
- A javasolt osztályozási és súlyozási rendszert valóban elfogadjuk-e, vagy módosítanunk kell? Például az ár tekintetében a súlyfaktor értékének növelése lehet indokolt a gyártó számára is elfogadhatóbb alternatív anyag megtalálása érdekében.
- Milyen költségek árán valósítható meg a jobban önthető, olcsóbb anyagok műszaki megfelelése? Valóban indokolt-e a jelenlegi műszaki előírások (mechanikai tulajdonságok), szintje? Azokat ésszerű határon belül csökkentve ugyanis, további, olcsóbb alternatív anyagok is bekerülhetnek a szóba jöhető anyagok választékába.
- A gazdasági szempontok figyelembevétele során megfontolásra javasolható a költségek globálisabb szemléletű átgondolása az anyagválasztás által érintett teljes gyártási vertikumban. Ennek során elsődleges kérdés, hogy a drágább alapanyag révén elérhető teljesítőképesség növekedés, valamint a gyártási selejt csökkenése milyen módon befolyásolja a teljes gyártási,

szerelési, minőségellenőrzési, valamint üzemeltetési (karbantartási) folyamatok végső pénzügyi egyenlegét.

A kutatómunka a projektben tervezetteknek megfelelően az MF2 mérföldkő időszakokkal együtt 2019-ben lezárult, de a Miskolci Egyetem továbbra is szeretné fenntartani az ipari partnerrel kialakított jó kapcsolatot, és szükség esetén folytatni a munkát a nyitott kérdések megoldására, illetve a későbbiekben felmerülő újabb szakmai szempontok alapján.

3. Szén nanocsővel (CNT-vel) adalékolt csapágy kenőanyagok tribológiai vizsgálata

Az ME és a BOSCH közötti ipari együttműködés második bemutatandó témaköre a „Csapágy kenőanyagának fejlesztése az elektromágneses zavarcsökkentés érdekében” c. kutatási témához kapcsolódik. Ugyancsak a projekt első mérföldkő időszakában az ME Kémiai Intézete 100 féle különböző összetételű, elektromosan vezető csapágy-kenőanyagot fejlesztett ki, amelyek közül 7 ígéretes kenőanyag pin-on-disc vizsgálatát és tribológiai összehasonlító elemzését végeztük el a kopási viselkedésre gyakorolt hatásuk alapján. A vonatkozó kutatási program keretében a kenőanyagok súrlódási-kopási viselkedésének tesztelésére a Gép- és Terméktervezési, valamint az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet közös tribológiai kísérleteket hajtott végre (2. ábra) annak érdekében, hogy összehasonlítsuk őket a kopási viselkedésre gyakorolt hatásuk alapján. Az alkalmazott berendezés az ME, ATI UNMT-1 univerzális felületvizsgáló berendezésének tribológiai modulja volt.

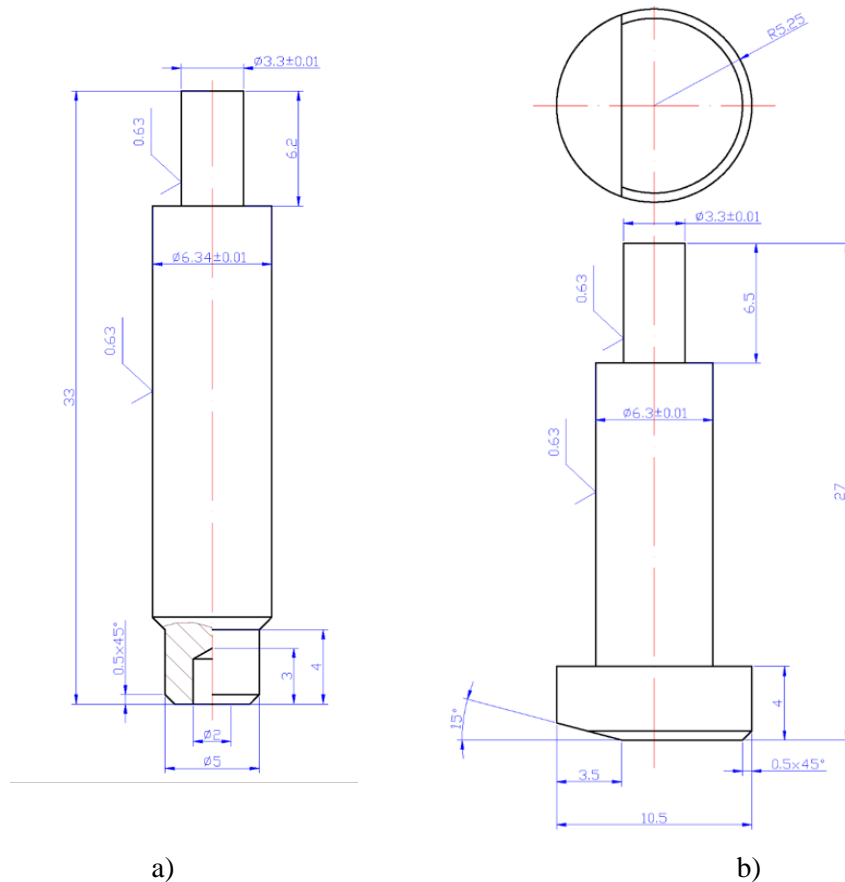


2. ábra. CNT tartalmú kenőanyag vizsgálata acéltárcsán UNMT-1 kopásvizsgáló berendezésben

A kísérleti körülményeket és az elvégzett vizsgálatok elemzését részletesen a projekt keretében készült tanulmány ismerteti [5]. A vizsgálatokat háromféle terhelőerővel ($F= 2, 5$ és 50 N), kétféle fordulatszámmal ($n= 100$ és 200 1/min) 42CrMo4 gyengén ötvözött acél tárcsákon hajtottuk végre $\phi 6$ mm, acélgolyóval szabványos ball-on-disc, valamint kétféle egyedi tervezésű (3. ábra) acél súrlódópárral pin-on-disc elrendezésben.

Ez utóbbi mérési megoldást az indokolta, hogy a rendkívül eltérő konzisztenciájú kenőanyagok vizsgálata során a folyamatos kenés állapotának fenntartása érdekében speciális súrlódópárra volt szükség, kissé megnövelt hőmérsékleten (55 °C) végrehajtva a vizsgálatokat.

A kenőanyagok alapvetően az adalék mennyisége és a konzisztenciát befolyásoló egyéb adalékok tekintetében tértek el. A vizsgálatra kiválasztott kenőanyagokat számjellel azonosította, amelyek a következők voltak: 68, 80, 81, 82, 84, 88, 89.



3. ábra. Tüske fejű (a) és korong fejű (b) egyedi fejlesztésű súrlódópár


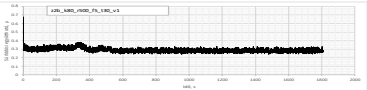

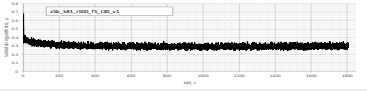

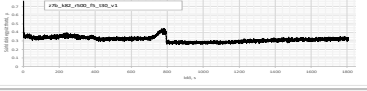

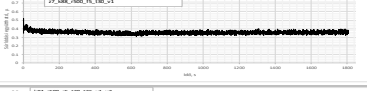

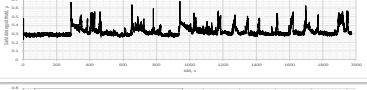

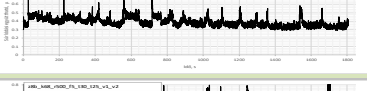


A rendkívül eltérő konzisztenciájú kenőanyagokkal folyó kísérletekhez speciális, egyedi tervezésű szerszámot kellett kifejleszteni, továbbá növelt hőmérsékleten kellett végrehajtani a vizsgálatokat a folyamatos kenési állapot fenntartása érdekében.

A vizsgálatok során meghatároztuk a súrlódási együttható-kopási úthossz diagramokat, az állandósult állapotbeli súrlódási együtthatók (μ_{SS}) értékét, továbbá a kopásnyomok optikai mikroszkópos morfológiai vizsgálatával elemeztük a kopási viselkedés jellegét és a kopási károsodás mértékét. A kenőanyagokat különféle szempontok – súrlódási együttható, kopás mértéke, folyamatos automatikus kenés kialakulása – alapján rangsoroltuk (4. ábra) és jellemeztük az alábbiak szerint:

Az összesített rangsorban a legígéretesebb kenőanyagok a megadott feltételek esetén az alábbiak voltak:

- Hevítés nélküli ($T=20\text{ °C}$) esetben a 80-as jelű kenőanyag;
- Növelt hőmérsékleten ($T=60\text{ °C}$) a 81, 82, és 88 jelű kenőanyagok, amelyeknél többnyire kialakult az automatikus és tartós kenés állapota és kb. 0,3 körüli súrlódási együttható volt jellemző.

- A többi kenőanyag a modellkísérlet során alkalmazott vizsgálati körülmények esetén nem biztosított megfelelő kenési állapotot, túlzottan hígfolyós (89), vagy túlzottan sűrű (68) volt, és a koptatás során a fém/fém párok érintkezésénél gyakori nagyobb súrlódási együttható vagy erős kopás volt jellemző.

Kenőanyag	Sorrend			μ_{ss}	mértéke	nyoma	A kopás súrlódási együttható diagramja	Megfigyelés
	μ alapján	kopás alapján	Összeg- zett					
80	1	1	2	0,283	legeny- hébb			automatikus kenés, de csak hevítés nélkül!
81	3	3	6	0,297	enyhe/ közepes			automatikus kenés hevítéssel
82	4	4	8	0,303	enyhe/ közepes			automatikus kenés hevítéssel
88	7	2	9	0,352	enyhe/ közepes			automatikus kenés
84	2	7	9	0,295	erős kopás			hevítés nélkül: erős kopás, hevítéssel: automatikus kenés
89	5	5	10	0,332	erős kopás			hígfolyós, hevítés nélkül is csak átmeneti a kenés, kisebb T-n kedvező
68	6	6	12	0,349	erős kopás			túl sűrű, kisodródik, hevítéssel is korlátozott a kenőképesség

4. ábra. A vizsgált kenőanyagok rangsorolása a kopásvizsgálatok eredménye alapján

Fontos megjegyezni, hogy a kísérleti munka során megvalósított pin-on-disc vizsgálati módszerrel nem volt biztosítható olyan kenési állapot, amely üzemszerű működés közben a csapágyakban jellemzően fennáll, a vizsgálatok elsősorban összehasonlításra alkalmas modellkísérletek voltak.

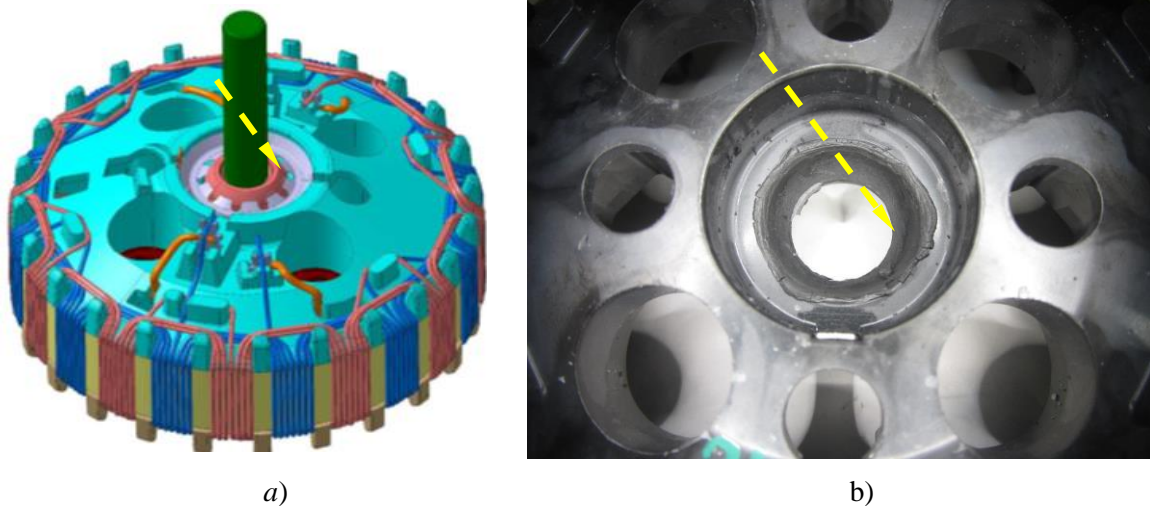
A kísérleti munka legfőbb eredménye, hogy az elvégzett kopásvizsgálatok egy olyan előzetes tájékozódásra adtak lehetőséget, amely alapján a további anyagfejlesztésre kijelölt kenőanyagok választéka célszerűen szűkíthető volt.

Emellett a tribológiai kísérletek tapasztalatai felhívták a figyelmet arra, hogy a kenőanyagok tervezése során feltétlenül figyelembe kell venni az üzemi hőmérséklet jellemző tartományát, és biztosítani kell, hogy ebben a tartományban a viszkozitás a kenés szempontjából elfogadható határok között változzon. Feltehetően az anyagfejlesztés szempontjából ez az egyik legnagyobb kihívás, mivel az üzemi hőmérséklet tartománya igen széles, a gyakorlatban -40 és $+80$ °C között változik.

4. Hőre keményedő és hőre lágyuló polimerek aktív ernyős plazmanitridálása

A FIEK projekt RP-02 alprogramjának egyik ígéretes kutatási irányát az „Új generációs klíma befűvő modul kulcs komponenseinek kifejlesztése: alapanyag fejlesztések” témakörben, a polimerek aktív ernyős plazmanitridálása (Active Screen Plasma Nitriding, ASPN) témakörben folytatott technológiafejlesztési kutatásaink képviselik.

A BOSCH Kft. által a gépkocsikhoz gyártott új generációs légbefűvő motorokban használt tekercestestek csapágyfészke egy olyan kritikus terhelésű hely, ahol nagy hőterhelés és koptató igénybevétel lép fel (5. ábra). Annak érdekében, hogy a tekercestest ne károsodjon, speciális hőre keményedő alkatrészeket kell alkalmazni. A projekt keretében ennek a feladatnak is többirányú megoldási módszereit vizsgáltuk, ezek egyike a csapágyfészkek kopásállóságának növelése, ezáltal a fellépő károsodások csökkentése volt.



5. ábra. Légbefűvő motor tekercestest felépítése (a) és károsodott csapágyfészke (b) (Forrás: Robert Bosch, 2018)

A kutatómunkánk során egy tipikusan fémekre alkalmazott technológia alkalmazási potenciálját bővítettük oly módon, hogy eredményesen hoztunk létre rétegeket olyan polimer alkatrészek felületén, amelyre eddig még nem volt alkalmazási példa.

A plazmanitridálás mintegy száz éve ismert ún. zöld – környezetbarát – felülettechnológia, amelynek egyik legfontosabb célja a felület mechanikai, vagy tribológiai teljesítőképességének növelése. Hátránya, hogy csak fémekre alkalmazható, mivel a megvalósítás elve alapján, a kemencetérben létrehozott N ionok becsapódása, azaz a kisülés a katódként funkcionáló munkadarabon történik, tehát a munkadarabnak vezetőnek kell lennie. Mindössze két évtizede jelent meg az a változata, amelyben a kisülés (részben vagy teljesen) egy fémből készült aktív ernyőn valósul meg, így a nemfémes anyagok nitridálása is lehetővé vált, emellett egyenletesebb a rétegszerkezet, jobb minőségű nitridált kéreg alakítható ki [6]. Ennek a technológiaváltozatnak a neve az aktív ernyős plazmanitridálás, amellyel azonban a polimerek felületkezelése terén még nagyon kevés tapasztalattal rendelkezünk és rendkívül korlátozott a fellelhető szakirodalma.

A projekt keretében célul tűztük ki a tekercstest jelenlegi hőre keményedő poliészter alapanyagán, továbbá a plazmanitridálás szempontjából ígéretes hőre lágyuló polimereken, elsősorban PBT mátrixú kompozitokon – a technológia kipróbálását és paramétereinek kidolgozását.

A kutatómunka részletesebb ismertetése meghaladná a cikk kereteit, azt később, egy másik közleményben tesszük meg.

Ugyanakkor, tekintettel az elért eredményekre és az azok által biztosítható előnyökre, érdeklődésre tarthatnak számot az aktív ernyős plazmanitridálással felületkezelt polimereken végzett különféle vizsgálatok eredményei és az azokból levonható következtetések, még ha a cikk keretében erre csak korlátozottan van is lehetőségünk.

A továbbiakban az eddig elért eredményeket ismertetjük röviden, emellett a szerzők szívesen állnak az érdeklődő szakemberek rendelkezésére az eddigi tapasztalatok részleteinek megosztása céljából is.

4.1. Technológiai kísérletek

A technológia alkalmazása polimerekre azért jelentett nehézséget és számos technológiai kihívást a kutatásaink során, mert a berendezésünk – egy Nitrión típusú plazmanitridáló – fémekre optimalizált berendezés, amely az általános ipari és kutatási trendekhez igazodva elsősorban fémes anyagok kezelésére alkalmas, az azok által elviselt nagyobb technológiai hőmérsékletek (400-500 °C) megvalósításával, amelyet a műanyagok nem viselnek el. A tervezett technológia fejlesztés legnagyobb kihívása ezért a berendezés polimer anyagokra való alkalmasságának kipróbálása és a vizsgált anyagok plazmanitridálására alkalmas technológiai paraméterek – hőmérséklet, főfeszültség, nyomás, gázösszetétel, ernyő geometria – megválasztása volt.

Iparjogvédelmi oltalmi bejelentés céljából a technológiai paraméterek konkrét értékeit itt mellőzzük, de kijelenthetjük, hogy mindkét polimer típus esetén sikerült a paramétereket meghatározni, és a polimer minták felületén új nitridált réteget kialakítani.

A továbbiakban a technológia eredményének minősítésére elvégzett vizsgálatokat ismertetjük.

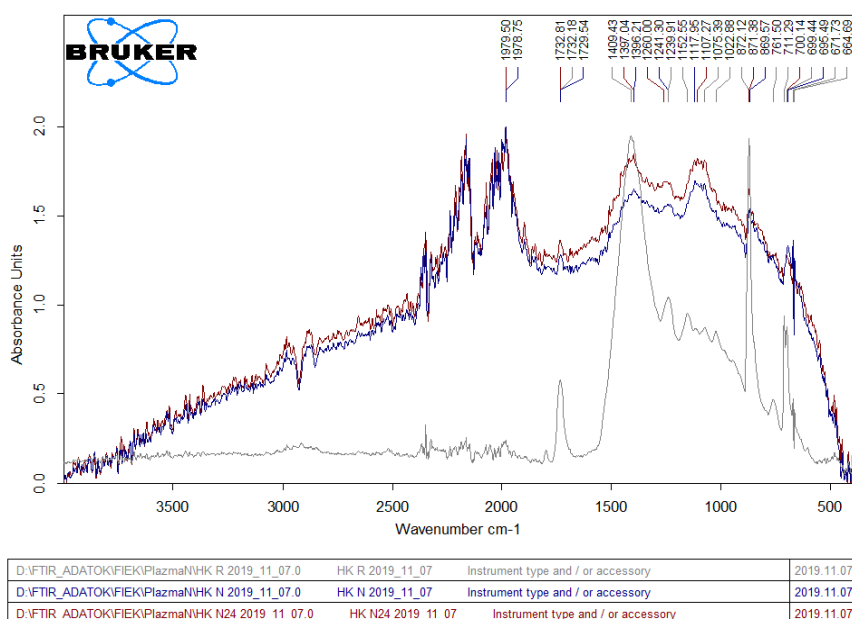
4.2. Aktív ernyős plazmanitridálás eredményessége hőre keményedő poliészteren

A vizsgált polimer egy Tetra-Dur márkanévű, kereskedelemben kapható hőre keményedő, 20% üvegszál tartalmú poliészter volt. A szakirodalomban nem találunk térhálós polimerek plazmanitridálásával kapcsolatos kísérletekről szóló közleményeket, mivel az erősen kereszt kötött molekulaszervezet módosulásának valószínűsége ilyen felületkezelés hatására igen csekély.

4.2.1. FTIR vizsgálatok

A Fourier transzformációs infravörös spektroszkópiai (FTIR) vizsgálatok során felvett spektrumok (6. ábra) alapján megállapítottuk, hogy a térhálós anyagnál nem történt szerkezet módosulás.

Az energia bevitel hatására legfeljebb degradáció valószínűsíthető, amit azonban az FTIR módszer nem tud kimutatni. A nitridált mintákon felvett, szűrt spektrumok eltérései, azaz a színes görbék esetén látható megnövekedett zajszint a referencia anyag szürke spektrumához képest, a felületre felrakódott szennyeződésekre, illetve a nitridálási technológia során használt acélernyőből származó Fe és O jelenlétére utalnak.



6. ábra. Hőre keményedő 20% üvegszál tartalmú poliészter FTIR spektrumai kezeletlen (R) és nitridált (N) mintán

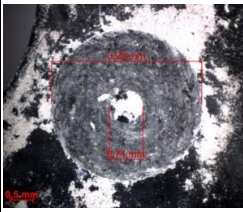
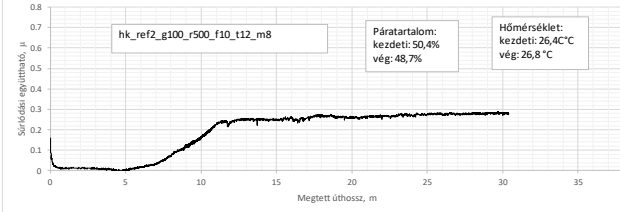
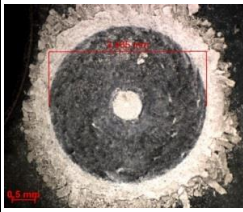
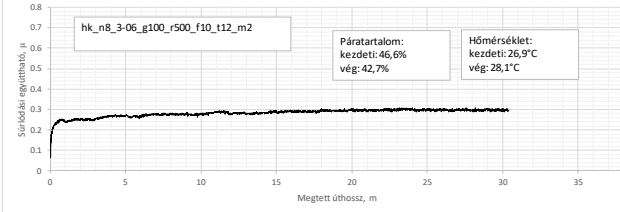
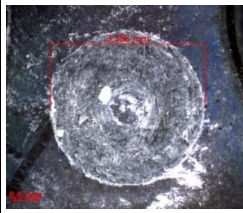
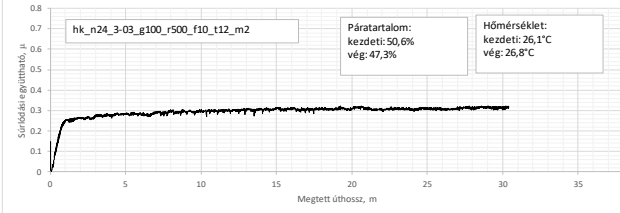
4.2.2. Kopásvizsgálatok

A kopásvizsgálatokat $F=10$ N terheléssel, $n=500$ 1/min fordulatszámmal, $L=30$ m csúszási úthosszon, $\phi 6$ mm-es acélgolyóval végeztük. A súrlódási együttható diagramok alapján (7. ábra) megállapítottuk, hogy a referencia anyag kopásakor adódott a legkisebb súrlódási együttható ($\mu_{REF,L30}=0,28$). A különböző (8 és 24 óra) ideig nitridált minták viselkedése között a kopás állandósult szakaszán nem látható lényegi különbség, a súrlódási együtthatók értéke közel azonos volt, 0,30 és 0,32, de mindkét esetben észrevehetően nagyobb, mint a kezeletlen referencia anyag esetében.

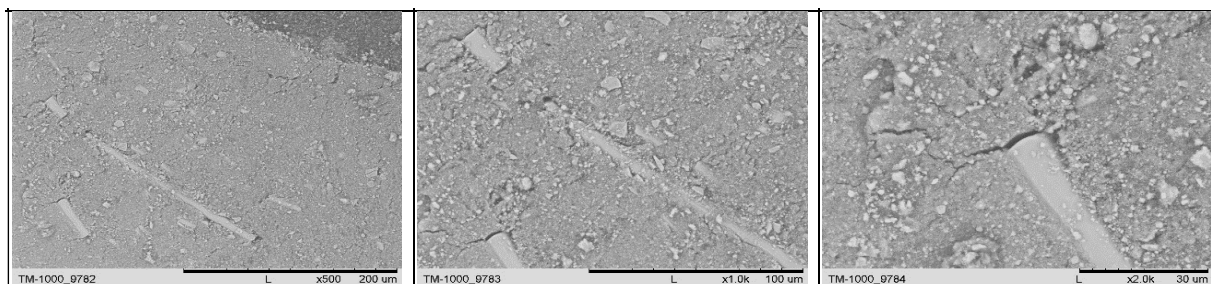
Ha megfigyeljük a 7. ábrán bemutatott súrlódási együttható diagramokat, akkor az is látható, hogy a kopás kezdeti szakaszán a nitridált minták esetében a bekopási úthossz jelentősen lerövidült. A vizsgálatokat többféle paraméter kombinációval – kisebb fordulatszámmal, nagyobb terheléssel és SiC golyóval is elvégezve – több esetben tapasztaltunk hasonló jelenséget, de acélgolyó használatakor ez a jelenség sokkal kifejezettebb volt.

A koptatás, különösen a nitridált minták esetében nagy mennyiségű törmelékkepződéssel járt, amelynek hátterében az állhat, hogy a nitridálás a térhálós szerkezetet tovább ridegítette, amely ennek következtében könnyebben sérült. Emellett, a kopásnyomok pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata (8. ábra) fényt derített arra, hogy az alapanyag számottevő mennyiségű üvegszálát tartalmaz. A rideg szálak, a megsérült felületből kiszakadva és a folyamatos terhelés hatására feldarabolódva igen jelentősen megnövelték az abrazív kopás mértékét. Ennek tulajdoníthatók a hőkezelt mintákon mért nagyobb súrlódási együttható értékek is.

Ezek az eredmények összhangban vannak a várakozásainkkal, hiszen a térhálós szerkezet kedvező módosulása a plazmanitridálás hatására nem várható, ugyanakkor a jelentős hőbevitel hatására egyértelműen ridegedett a felületi réteg. A mérések elvégzésének alapvető célja referencia adatok nyerése volt a jelenleg használatos alapanyagon.

Állapot	Kopásnyom	Súrlódási együttható diagram	μ_f	r, mm	L, m
REF			0,28	0,8	30
N8			0,30	0,8	30
N24			0,32	0,8	30

7. ábra. Hőre keményedő, 20% üvegszál tartalmú, poliészter kezeletlen és nitridált mintáin végzett kopásvizsgálatok eredményei; Acélgolyó ($\phi 6$ mm), $F=10$ N, $n=500$ 1/min, $L=30$ m



8. ábra. Hőre keményedő poliészter üvegszál törmelékeket tartalmazó kopásnyomának SEM felvétele

4.3. Aktív ernyős plazmanitridálás eredményessége hőre lágyuló polimereken

Az alkalmazott plazmanitridálási technológia hatását és eredményességét különféle anyagvizsgálati módszerekkel ellenőriztük, amelyek alapján a technológiát a vizsgált 7 féle hőre lágyuló polimer típus közül többségében eredményesnek találtuk a felületet érintő mechanikai hatásokkal – karcollással, koptatással, szűrőtest behatolásával – szembeni ellenállást. A projekt keretében elvégzett vizsgálatok – FTIR, tribológiai, SEM és optikai mikroszkópos (OM) vizsgálatok, Shore D

keménységmérés, műszerezett karcvizsgálatok és profilometriai vizsgálatok – eredményei közül összefoglalás jelleggel ismertetjük a legfontosabbakat.

4.3.1. FTIR vizsgálatok

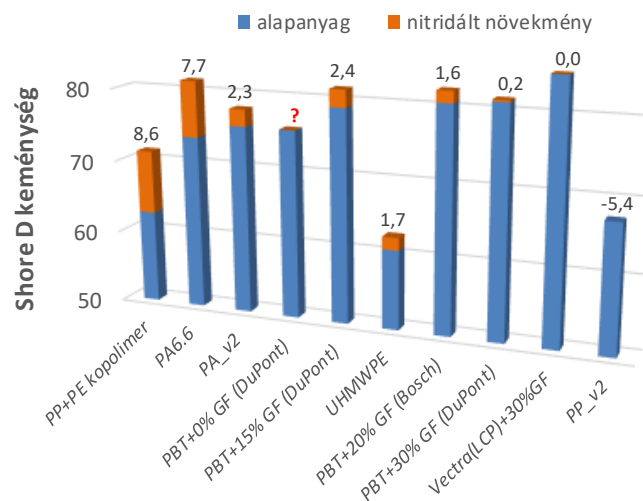
A vizsgálatba bevont polimerek monolitikus, vagy üvegszállal erősített hőre lágyuló minták voltak, amelyek alapanyaga PBT, UHMWPE, kétféle PA, PP, PP+PE kopolimer, illetve Vectra márkannevű folyadékkristályos polimer (a továbbiakban LCP) volt.

Az aktív ernyőből származó elemeket és nitrogént tartalmazó bevonati réteg jelenlétét minden nitridált minta esetében megfigyeltük. A N beépülése a polimer szerkezetébe kimutatható mértékben két anyag esetén történt meg: a PP és az UHMWPE polimereknél. A tapasztalt szerkezetváltozás tartósnak tekinthető, mivel az FTIR vizsgálatok a plazmanitridálást követően több, mint fél évvel történtek. Az UHMWPE esetén az eredmények a N ion-bombázással és plazmanitridálással végzett hasonló kísérletekre vonatkozó szakirodalommal [7, 8] összhangban vannak, azaz N beépülés a felületi rétegbe, új típusú kötések kialakulása stb. megfigyelhető volt. A PP minták plazmanitridálásra való alkalmasságát ugyancsak számos kutató bizonyította már [9], de a N szerkezetbe épülésének igazolása kevésbé ismert, ebben a tekintetben a vizsgálatok eredményei újszerűnek mondhatók.

A stabil molekulaszervezetű polimerek (LCP, PA, hőre keményedő poliészter) esetén az alkalmazott ASPN nem módosította a polimer szerkezetét, de egyes esetekben (PA) csökkentette a vízfelvételi képességet.

4.3.2. Shore D keménységmérés

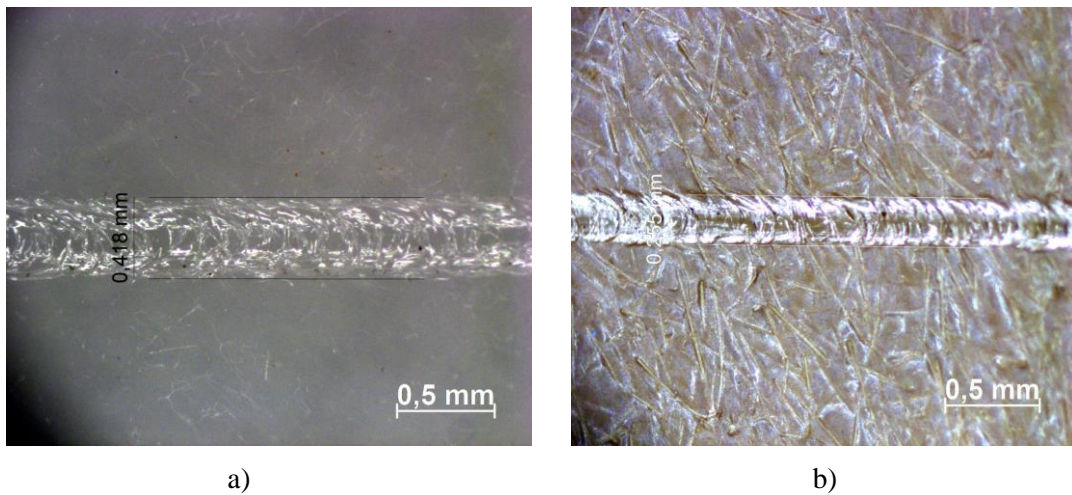
A plazmanitridálást követően a hőre lágyuló polimerek szerkezetében bekövetkező változások hatására általában megnőtt a felületi keménység (9. ábra), legjelentősebb mértékben (közel 14%-kal a PP+PE kopolimer esetében. A PP_v2 jelű polimer esetén tapasztalt látszólagos keménység csökkenés oka a plazmanitridálás hatására bekövetkező buborékképződés formájában jelentkező szerkezeti degradáció, amely az anyag szűrőtest behatolásával szembeni ellenállását csökkentette.



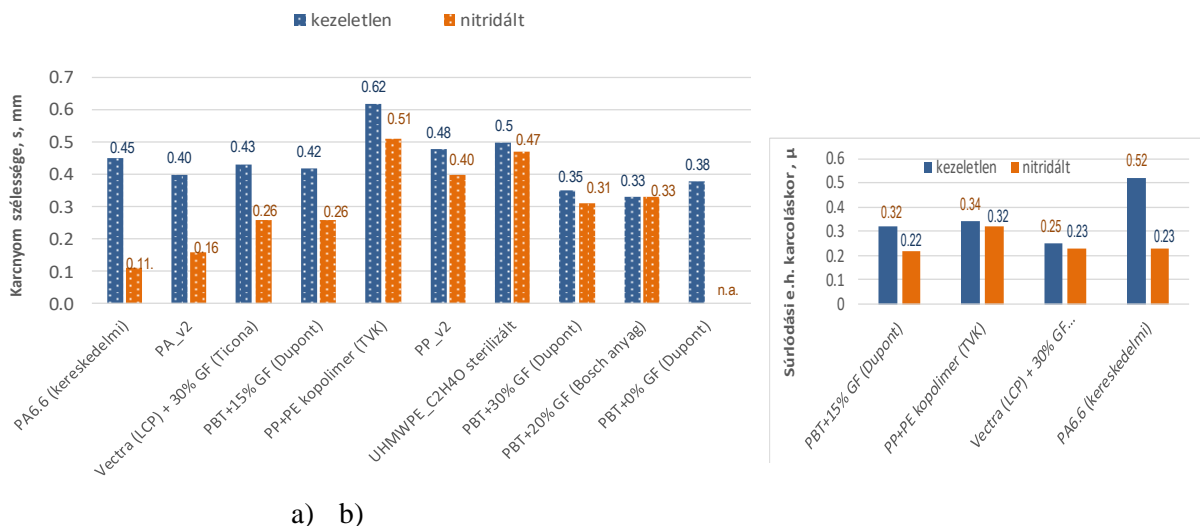
9. ábra. Kezeletlen és plazmanitridált hőre lágyuló polimereken mért Shore D keménységértékek

4.3.3. Műszerezett karcvizsgálatok

Az ASPN kezelés hatására számos polimer esetében javult a karcállóság. Kedvezőbb viselkedést, azaz a karcnyom szélességének csökkenését figyeltünk meg (10. és 11/a. ábra) a vizsgált 10 esetből 8 esetben, míg a csökkenő súrlódási együtthatót karcolás közben (11/b. ábra) 10-ből 4 esetben mértünk.



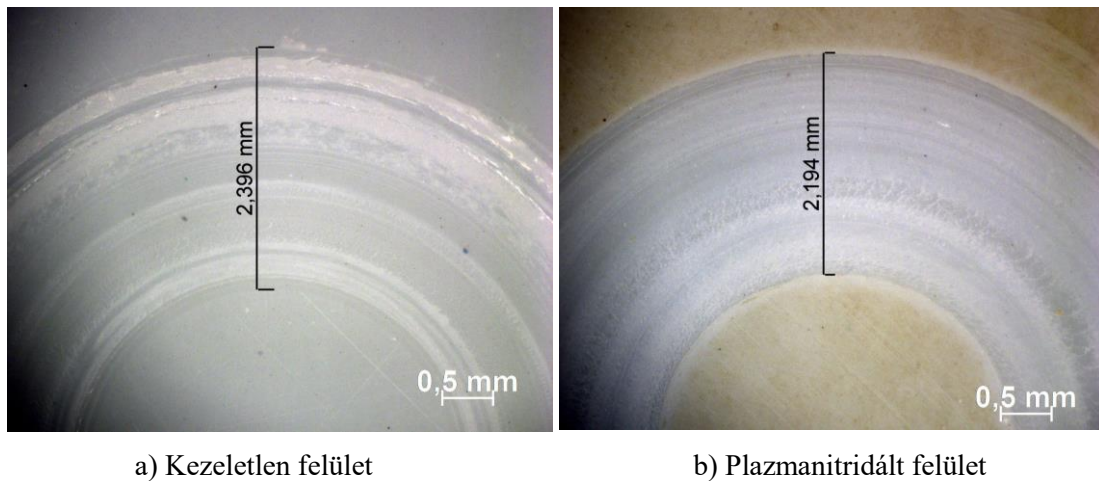
10. ábra. PBT+15% üvegszál tartalmú minta kezeletlen felületén létrehozott (a) és nitridált felületén létrehozott (b) karcnyomok állandó terhelőerővel ($F=10\text{ N}$) végzett karcvizsgálat során



11. ábra. Kezeletlen és nitridált hőre lágyuló polimereken $F=10\text{ N}$, terhelőerővel végzett karcvizsgálat során mért karcnyom szélesség (a) és súrlódási együttható (b) értékek

4.3.4. Ball-on-disc kopásvizsgálatok

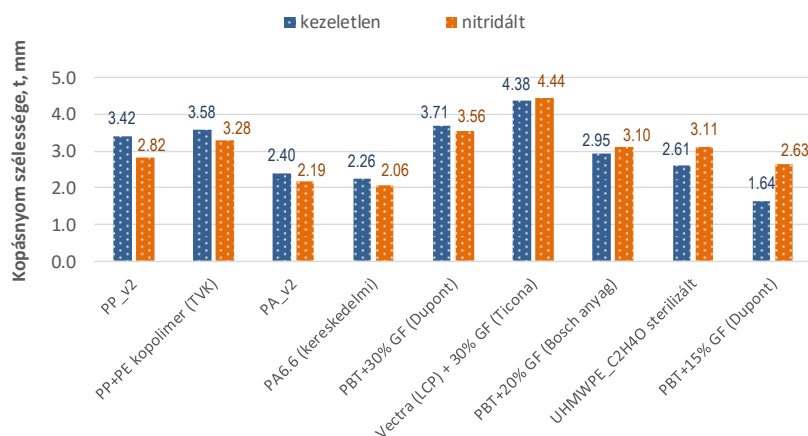
A kopásvizsgálatokat többféle terhelőerővel ($F=20$; 100 N) és $n=100$ mm/s csúszási sebességgel végeztük, kerámia ellentesttel, kenésmentes állapotban. A vizsgálat során rögzítettük a súrlódási együttható, úthossz diagramokat, majd a kopásnyomok optikai mikroszkópos és profilometriai vizsgálatával meghatároztuk a kopásnyom szélesség (12. ábra) és a kikopott térfogat értékeit.



12. ábra. PP minta kezeletlen (a) és plazmanitridált (b) felületén végrehajtott kopásvizsgálatok során kialakult kopásnyomok mikroszkópi felvétele ($F = 100$ N; $v = 100$ mm/s)

Műanyagok esetén a súrlódási együttható nem hozható egyértelmű kapcsolatba a kopási károsodással, mert az elsősorban a terhelés mértékének függvényében jelentkező adhéziós vagy deformációs kopási mechanizmus dominanciájától függ. Ezért a vonatkozó projektjelentésben [10] részletesen elemzett súrlódási együttható eredmények bemutatásától itt eltekintünk.

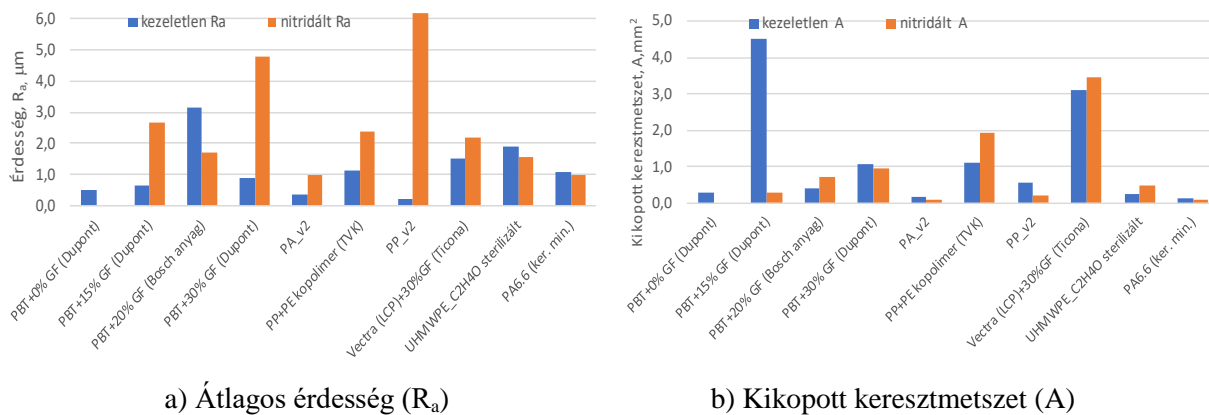
A kopásnyom szélesség értékek az esetek döntő többségében kisebbek voltak az ASPN kezeléssel felületeken (13. ábra), ami alapján a kopással szembeni ellenállás növekedésére következtethetünk.



13. ábra. A kopásnyomok szélességének összehasonlítása a nitridált és kezeletlen felületeken

4.3.5. Profilometriai vizsgálatok

Szakirodalmi adatok egyértelműen igazolják, hogy nitrogénnel történő felületkezelések után – ahogyan azt az előző fejezetben láttuk – a kopásállóság javul, ugyanakkor a felületi érdesség jellemzően nő [7, 11]. A profilometriai vizsgálatok során meghatározott érdességi jellemzők (14/a. ábra) és a kikopott térfogat értékek (14/b. ábra) egyértelműen alátámasztják ezeket a tapasztalatokat az általunk vizsgált hőre lágyuló polimerek esetében is.



14. ábra. A nitridálás hatása az átlagos érdesség és a kikopott keresztmetszet értékre

Itt kell megjegyeznünk, hogy a kopásnyomok optikai mikroszkóppal meghatározott kopásnyom szélesség értékei és a profilometriai vizsgálatokkal kapott kikopott keresztmetszet értékek egyetlen eset kivételével megegyező változást (csökkenés/növekedés) mutattak a nitridált mintákon a kezeletlen alapanyagban mért értékekhez képest. Ezek alapján javasolható, hogy a költséges és időigényes profilometriai vizsgálatok helyett a nitridálás kopásállóságra gyakorolt hatását egyszerű optikai mikroszkópos vizsgálattal megoldható kopásnyom szélesség mérés alapján végezzük.

4.4. Az ASPN kezelés tapasztalatainak összegzése

Az aktív ernyős plazmanitridálási technológia a polimerek esetében még nem elterjedt, nem kidolgozott felületkezelési módszer. A FIEK projekt keretében hőre keményedő és lágyuló polimerekre kidolgoztuk az eredményes ASPN technológia paramétereit – U: főfeszültség, p: nyomás, ernyőgeometria, T: hőmérséklet, és t: idő.

Az alkalmazott felületkezelés minden esetben kimutatható rétegfelépülést eredményezett a különböző polimer mintákon, de nem módosította a hőre keményedő és egyéb stabil molekulaszervezetű anyagok felületi rétegének anyagszerkezetét és mechanikai viselkedését. A vizsgált minták 80%-ánál keménység- és karcállóság növekedést, több, mint 50%-ánál pedig kopásállóság javulást tapasztaltunk, annak ellenére, hogy egyértelmű N beépülést csak az UHMWPE és a PP polimereknél tudtunk kimutatni. Tekintettel a technológiai kísérletek során felmerült műszaki nehézségekre, és az egyes minták esetén elérhető gyengébb nitridálódásra, úgy gondoljuk, hogy ismétlődő kísérletekkel ez utóbbi hatás is meggyőzőbben igazolható, azaz a beépülés mértéke kimutathatóan javítható az összes olyan polimernél, amelynél a tulajdonságok javulását tapasztaltuk.

Összességében, az elvégzett szisztematikus mérések és a különféle típusú vizsgálatok eredményeinek koherenciája azt igazolja, hogy a vizsgált hőre lágyuló polimerek között található olyanok, amelyeken a plazmanitridálás hatékonyan elvégezhető, és amelyek a különféle terhelések (karcolás, koptatás) okozta károsodásokkal szemben ellenállóbbá tehetők.

5. Összefoglalás

A cikkben bemutatott anyagtudományi fejlesztések, és azok eredményeinek áttekintésével szerettünk volna képet adni arról, hogy a BOSCH és az ME, ATI közötti közös ipari kutatások számos területen már eddig is gyümölcsözőek voltak. Ugyanakkor, az itt közölt eredmények csak egy kicsiny szeletét képviselik annak a nagyszabású közös munkának, amelyek a „Korszerű anyagok és intelligens technológiák FIEK létrehozása a Miskolci Egyetemen” c. jelenleg is futó projekt keretében eddig születtek. A kutatások a FIEK program keretében számos új tématerületen folytatódnak.

Az elért, gyakorlatban is hasznosítható, illetve a hosszútávú fejlesztéseket megalapozó eredmények mellett az együttműködés legnagyobb értéke, hogy stabil, a partnerek tudásbázisát közösen kamatoztató, sikeres szakmai kooperációt tudunk megvalósítani, amely a jövőbeni együttműködéseinket is megalapozza.

6. Köszönetnyilvánítás

„A kutató munka az Európai Unió és a magyar állam támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával, a GINOP-2.3.4-15-2016-00004 projekt keretében valósult meg, a felsőoktatás és az ipar együttműködésének elősegítése céljából.”

Ugyancsak ezúton mondunk köszönetet a bemutatott témakörökhöz kapcsolódó anyagvizsgálati feladatok megoldásában való hatékony közreműködésért és szakmai segítségért a Miskolci Egyetem alábbi intézeteinek:

- A Kémiai Intézet, valamint a Gép- és Terméktervező Intézet munkatársainak a vezetőképes kenőanyagokkal kapcsolatos kutatásokhoz nyújtott szakmai támogatásért;
- A Gyártástudományi Intézetnek a plazmanitridált polimerek profilometriai vizsgálatainak elvégzéséért;
- A Kerámia és Polimermérnöki Intézetnek az FTIR vizsgálatok elvégzéséért és a vonatkozó eredmények kiértékelésében nyújtott segítségért.

Irodalom

- [1] Marosné Berkes, M., László, N. (2017) A Cambridge Engineering Selector (CES) anyag-és eljárásválasztó szoftver funkciói és felhasználása, Tanulmány. Készült a „Korszerű anyagok és intelligens technológiák FIEK létrehozása a Miskolci Egyetemen” c. GINOP-2.3.4-15-2016-00004 sz. projekt keretében pp. 1-41.
- [2] Marosné B., M., László, N. (2017) Segédlet légbefűvómotor járókerék anyagválasztásához a CES anyagválasztási szoftver segítségével, Anyagválasztási segédlet. Készült a „Korszerű anyagok és intelligens technológiák FIEK létrehozása a Miskolci Egyetemen” című GINOP-2.3.4-15-2016-00004 sz. projekt keretében pp. 1-6.

- [3] László, N., Maros B., M. (2018) Applying the Cambridge Engineering Selector (CES) Software during alternative materials selection for an impeller of a car air blowing engine, In: Tamás, Mankovits (szerk.) Proceedings of the 6th International Scientific Conference Tamás Gépészeti tudományok) (szerk.) Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2018): Book of extended abstracts, pp. 99-100.
- [4] Marosné Berkes, M., László, N.: Gépkocsi légbefúvó motor járókerék anyagválasztása súlyozott rangsorok segítségével, 3. sz. Segédlet”, Korszerű anyagok és intelligens technológiák FIEK létrehozása a Miskolci Egyetemen, GINOP-2.3.4-15-2016-00004 sz. projekt, Miskolc (2018) p. 34.
- [5] Marosné Berkes, M., Szilágyiné Biró, A., Németh, A., Fülöp, F. (2017) Tribológiai vizsgálatok CNT-vel adalékolt SOB kenőanyagokkal a FIEK projekt keretében, Tanulmány, Korszerű anyagok és intelligens technológiák FIEK létrehozása a Miskolci Egyetemen, GINOP-2.3.4-15-2016-00004 sz. projekt, Miskolc pp. 1-21.
- [6] Kocsisné Baán, M., Marosné Berkes, M., Szilágyiné Biró, A. (szerk.) (2015) Nitridálás – korszerű eljárások és vizsgálati módszerek, Miskolc: Miskolci Egyetem, ISBN 978-963-358-080-6, pp. 296.
- [7] Tóth, A., Bertóti, I., Mohai, M., Ujvári, T. (2007). Surface Modification of Polyethylene by Nitrogen PIII: Surface Chemical and Nanomechanical Properties. Materials Science Forum, 537-538, pp. 255–262. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.537-538.255>
- [8] Teoduru, S., Kesano, Y., Rozlosnik, N., Michelsen, P. K. (2009) Continuous plasma treatment of ultra-high-molecularweight polyethylene (UHMWPE) fibres for adhesion improvement Plasma Processes and Polymers, 6 pp. 375–381. <https://doi.org/10.1002/ppap.200930906>
- [9] Kauling, A. P., Soares, G. V., Figueroa, C. A., de Oliveira, R. V. B., Baumvol, I. J. R., Giacomelli, C., Miotti, L. (2009). Polypropylene surface modification by active screen plasma nitriding. Materials Science and Engineering: C, 29(2) pp. 363–366. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2008.07.002>
- [10] Marosné Berkes, M., Fülöp, F. (2019) Új generációs klíma befúvó modul kulcs komponenseinek kifejlesztése: gyártástechnológia fejlesztések. Új gyártástechnológiával kialakított alkatrészek összehasonlító (szerkezeti elem) vizsgálata (ME10-92), Kutatási jelentés a „Korszerű anyagok és intelligens technológiák FIEK létrehozása a Miskolci Egyetemen című GINOP-2.3.4-15-2016-00004 sz. projekt keretében november, pp. 1-49.
- [11] Kereszturi, K., Tóth, A., Mohai, M., Bertóti, I., Szépvölgyi, J. (2010) Nitrogen plasma-based ion implantation of poly(tetrafluoroethylene): Effect of the main parameters on the surface properties. Applied Surface Science, 256(21) pp. 6385–6389. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.04.021>