

## Funkcionalizált elasztomerek

Az elmúlt évtizedekben az elasztomerek igen nagy számú változatát fejlesztették ki, és a különböző keménységű, könnyen feldolgozható rugalmas anyagok népszerűvé váltak, sokféle területen alkalmazzák őket. Ezek a területek tovább bővíthetnek, ha az elasztomerek eredeti tulajdonságait funkcionálással újabb hasznos tulajdonságokkal egészítik ki. A mágneses vagy elektromos térre méretváltozással reagáló elasztomerek pl. megjelenhetnek a vezérlő- és szabályozórendszerekben, mikrostrukturált elasztomerfelületekkel pedig tökéletesen kiürülő szuperhidrofób tartálybelsőket lehet készíteni.

*Tárgyszavak: elasztomerek; funkcionálás; mágnesség; villamos tér; mikrostruktúra; vezérléstechnika; hidrofobizálás; öntisztulás.*

Az elasztomerek gyengén térhálós polimerek, amelyek rugalmassági modulusa mindössze néhány MPa, több nagyságrenddel kisebb, mint a hőre lágyuló vagy a hőre keményedő műanyagoké. Ezek a nagyon lágy anyagok erősen nyúlnak, nyújtás után pedig eredeti formájukra alakulnak vissza. Szokásos alkalmazásaikban elsősorban rugalmasságukat használják ki. Felruházhatók azonban olyan további tulajdonságokkal, amelyek révén egész különleges feladatok elvégzésére is alkalmassá válnak.

A külső hatások közül az elasztomerek szinte kizárólag a hőre reagálnak, a mágneses tér vagy elektromos feszültség nem befolyásolja viselkedésüket. A legújabb kutatások eredményeképpen azonban léteznek már olyan „intelligens” (angolul smart) elasztomerek, amelyek a mágneses térben vagy elektromos feszültség alatt megnövelik térfogatukat, és ezt a jelenséget fel lehet használni aktuátorok és szenzorok működtetésében.

Hosszabb idő óta dolgoznak a vízlepergető és öntisztuló műanyagfelületek fejlesztésén, amely révén elérhető volna a tartályok maradékmentes kiürítése és pl. a szabadban lévő szigetelőtestek öntisztulása. Ehhez a természetben található mintát, az ún. „lótusz-effektust” próbálják utánozni. Hőre lágyuló anyagok felületére az ehhez szükséges mikrostrukturát csak bonyolult és költséges technikával tudják felvinni. Úgy tűnik, elasztomerekkel ez könnyebben megy.

## Külső hatásra „megelevenedő” elasztomerek

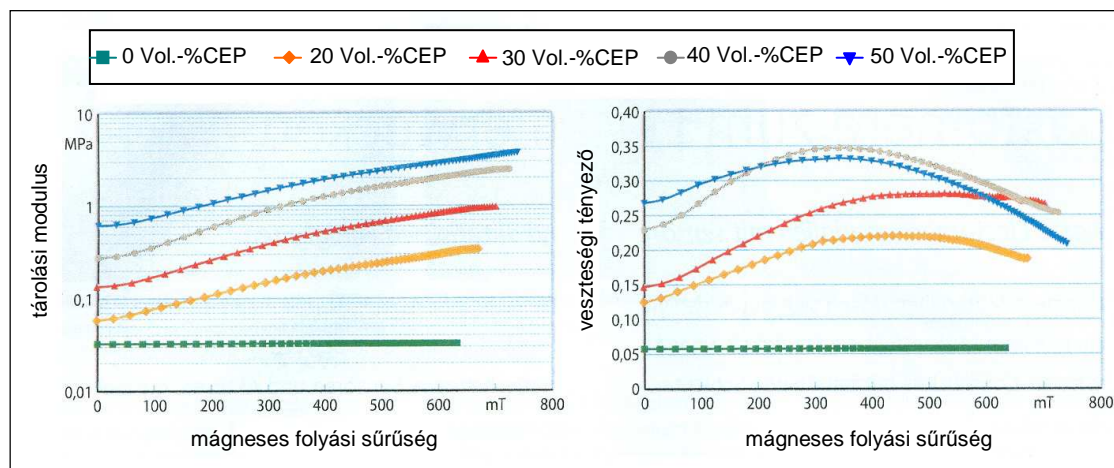
Az elasztomereket hagyományosan „passzív” anyagként használják. Aktuátorokban vagy szenzorokban „intelligens” anyagként eddig szinte kizárólag kemény fémeket vagy kerámiát alkalmaztak, pl. olyan piezoelektromos kerámiát, amely elektro-

mos térben kitágul, nyomás alatt pedig villamos feszültséget gerjeszt, vagy olyan fém-ötvezetet, amely „visszaemlékezik” eredeti alakjára, ha mágneses térbe kerül.

Az elmúlt években fordult az érdeklődés a mágnesesen vagy elektromosan vezérelhető elasztomerek felé. Megfigyelték pl., hogy a magnetoreológiai elasztomerek mágneses mezőben merevebbek lesznek, emellett megnyúlnak, és emiatt előre betervezett elmozdulásra képesek. A dielektromos elasztomerek hasonlóképpen elektromos árammal vezérelhetők, és „megelevenedve” aktív tevékenységre képesek. Külső erők hatására megváltozó villamos kapacitásuk pedig szenzorokban hasznosítható.

### *Mágneses mezőre reagáló elasztomerek*

A magnetoreológiai elasztomerek (MRE) néhány mikrométer nagyságú mágnesezhető vasrészecskéket tartalmazó kompaundok. A vas (pontosabban vas-pentakarbonil) részecskéket (németül Carbonyleisen-Partikeln, CEP) folyékony szilikonnal keverik össze, amely a formaadás alatt térhálósodik. A formázás a töltetlen folyékony szilikonelasztomer feldolgozásához alkalmazott valamennyi technológiával elvégezhető.



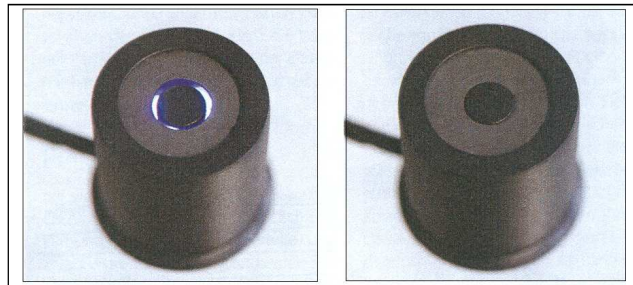
1. ábra Folyékony szilikonelasztomerből és különböző térfogatarányban hozzákevert vas-pentakarbonil részecskékből készített kompaundok tárolási modulusának (bal oldali kép) és veszteségi tényezőjének (jobb oldali kép) változása a mágneses folyássűrűség függvényében

Mágneses mezőben az MRE formadarabok mechanikai tulajdonságai megváltoznak. A mágneses mező erősségének növekedésével folyamatosan nő az anyag rugalmassági és nyírómodulusa. A mágneses tér a töltőanyag-részecskék mágneses kölcsönhatása miatt az anyag csillapítását is változtatja. Az 1. ábrán a különböző térfogatarányban CEP töltőanyagot tartalmazó MRE kompaundok tárolási modulusának és veszteségi tényezőjének változása látható a mágneses folyássűrűség függvényében. [A

mágneses folyássűrűséget (SI rendszerben egysége a Tesla, jelzése T) nevezik mágneses indukciónak is, a mágneses tér erősségét jellemzi.] Megfelelő összetétel mellett mágneses térben a tárolási modulus akár egy nagyságrenddel, vagy annál többel is növekedhet. A tárolási modulus a ciklikus nyíró hatás következtében képződő elasztikus energia tárolását, a veszteségi modulus a csillapítást, azaz a hőenergia eloszlását jellemzi. Mágneses mezővel az MRE anyagok csillapítása széles tartományban reverzibilissé tehető, és ez a tulajdonság a gépek vezérlésében jól hasznosítható.

A magnetoreológiai elasztomereknek az a tulajdonsága, hogy a mágneses mező erővonalainak irányában megnyúlnak, alkalmassá tesz ezeket a polimereket aktuátorok készítésére. A lineáris nyúlás 10% vagy annál több is lehet, azaz két nagyságrenddel nagyobb, mint a piezoelektromos kerámiáké, viszont az elasztomerek formaváltozás révén kifejtett ereje jóval kisebb. A mágneses tér megszüntetése után az elasztomer visszanyeri eredeti formáját.

Az MRE anyagok nagy előnye, hogy szokatlan alakzatokban is alkalmazhatók. A 2. ábra egy külső fémhengerből és egy belső vasmagból álló eszközt mutat, amelyen felül egy elasztomergyűrű látható. Mágnesezés nélkül a gyűrű és a vasmag között rés van. Bekapcsoláskor a mágneses mező sugárirányban, a külső henger és a vasmag között alakul ki. Ennek hatására az elasztomergyűrű sugárirányban megnyúlik, és lezárja a rést. Ilyen radiálaktuátorokat számos helyen lehet alkalmazni. Szelepekben a mágneses térerősséget felhasználva a rést fokozatmentesen lehet nyitni és zárni. Vezérelhető tömítések nyomását mágnesezéssel lehet szabályozni. Befogószerkezetekben nagyon óvatosan lehet a kényes tárgyakkal bánni. Az MRE gyűrűk tulajdonságait a részecskekoncentrációval és az elasztomer keménységével tág határok között lehet változtatni.

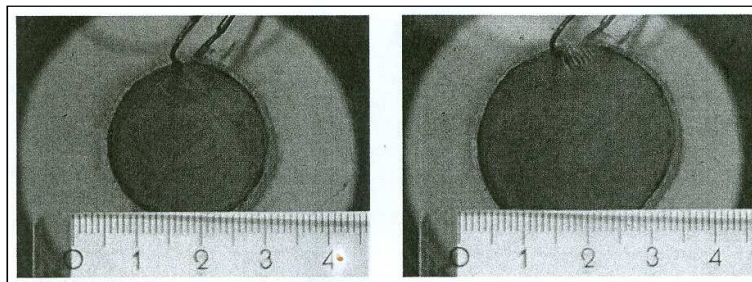


2. ábra Radiálaktuátor MRE gyűrűvel mágneses mező nélkül (bal oldali kép) és mágneses mezőben (jobb oldali kép)

### *Villamos térre reagáló elasztomeraktuátorok és szenzorok*

A dielektromos elasztomeraktuátorok (DEA) egy elasztomerfóliát tartalmaznak, amelyet mindkét oldalán egy-egy elektródaréteg fed. Erős elektromos térben fellépő elektrosztatikus Maxwell erők hatására az elektródarétegek egymás felé elmozdulása nagy nyomást fejt ki az elasztomerfóliára, amely emiatt oldalirányban kitüremkedik, vastagsága csökken, felülete pedig megnövekszik. Mindkét jelenség felhasználható az aktuátor működtetésére.

Az egyik lehetséges aktuátorforma egy kerek, sík fólia, amelyet keretbe foglalnak előfeszített állapotban úgy, hogy az elektródák az elasztomerfólia felületének csak egy részét fedjék le. Az elektromos tér bekapcsolása után a fólia felülete megnövekszik, egyúttal megnövekszik az elektródákkal érintkező felület részaránya is (3. ábra). Az elektródával érintkező felület átmérője 80 kV/mm térerősség hatására akár 25%-kal is nagyobbá válhat, ami más aktuátorokhoz képest igen nagy nyúlást jelent. Az aktuátor energiaigénye a kV nagyságrendű feszültség ellenére csekély, mert az áram csak az aktuátor feltöltéséhez kell, amely elektrotechnikai szempontból kondenzátornak tekinthető. Ha a kondenzátor feltöltődött, a dielektromos elasztomerfólián már csak kevés kúszóáram halad át.



3. ábra DEA fóliareaktor közepén kör alakú elektródával elektromos mező nélkül (bal oldali kép) és elektromos mezőben (jobb oldali kép)

A dielektromos elasztomeraktuátorok nagy előnye a széles körű formaszabadság. A különféle elektródákkal ellátott sík aktuátorok mellett tekercsek, hajlított formák és olyan aktuátorok is készíthetők, amelyekben az aktív elmozdulás a fólia síkjára merőleges irányú. Az aktuátor által kifejtett erő vagy emelési magasság növelésére többféle szerkezeteket készítenek, amelyekben váltakozva követik egymást a dielektromos és az elektródrétegek. Az ilyen aktuátorok nagy méretváltozása mellett további előnye a csekély tömeg, a zajmentesség, és az alacsony gyártási költség.

Az elasztomerfólia alapanyagaként a szilikon vált be a legjobban, mert ez előformájában folyékony, könnyen lehet belőle nagyon lágy (ezért aktuátorként erős alakváltozást felmutató) fóliát készíteni. Az elektródarétegek alapanyaga ugyancsak szilikonelasztomer, amelybe kormot, grafitot, szénnanocsöveket vagy rézlemezkeket kevernek. Nagyon fontos, hogy ezek az elektródarétegek vezetőképességüket a szilikonfólia megnyúlásakor is megőrizzék, és hogy az aktuátor működése közben semmilyen zavaró mechanikai hatást ne fejtsenek ki.

Ezeknek az aktuátoroknak az alkalmazását olyan feladatok elvégzésére ajánlják, ahol néhány mm-es elmozdulást kell viszonylag csekély erővel elérni; pl. szelepek, szivattyúk, tükrök és más optikai berendezések vezérlésére. A működtetés frekvenciája akár kHz nagyságrendű is lehet, mint pl. a hangszórókban, amelyek mechanikusan előfeszített DEA fóliát tartalmaznak.

A dielektromos elasztomerszenzorok (DES) felépítése hasonló a DEA-éhoz. Szenzorként azt használják ki, hogy ezek kondenzátorként működnek, és az elektromos

térben bekövetkező nyúlás hatására megváltozik a kapacitásuk. A kapacitásváltozás jelzi a nyúlás mértékét. Az ilyen szenzorok egyszerű és olcsó nyúlásmérőként alkalmazhatók a mérés technikában. Alkalmazhatók erőmérőként is, ilyenkor a fóliára ható húzóerőt határozzák meg. Az érzékelők fő alapanyaga ugyancsak a szilikonelasztomer, amelynek térhálósági foka, azaz merevsége széles határok között változtatható. Ezáltal ugyancsak széles határok között változtatható a szenzorok mechanikai érzékenysége.

A bemutatott érzékelőkkel nyomóerőt nem lehet mérni. Ilyen feladathoz speciális felépítésű kapacitív szenzorokat terveztek. Ebben az elasztomerfóliát két profilírozott felületű fólia közé helyezik. Összenyomáskor a két profilírozott fólia profilelemei egymásba hatolnak, és a köztük lévő elasztomerfóliát alakváltozásra, nyúlásra kényszerítik. Ez erős kapacitásváltozást okoz, amely arányos a nyomóerővel.

A kapacitív nyomásérzékelők is számos területen alkalmazhatók. Nagy hajlékonyságuk miatt akár textilre is felvihetők. Egy kesztyű mutatóujjára felerősített fél ujjnyi érzékelővel pl. nagyon érzékenyen meg lehet mérni, mekkora erővel fogtak meg egy poharat. Hasonló módon azt is meg lehet mérni (majd be lehet állítani), hogy egy robot mekkora erővel foghatja meg a kezelendő tárgyat, hogy azt le ne ejtse, de meg se sértse.

Kapacitív nyomásmérőkkel fel lehet mérni a rugalmas alátétekre ható erőeloszlást. Pl. azt, hogy hogyan helyezkedik el egy ember az autóülésben, és ennek megfelelően hogyan kell irányítani szükséges esetben az életmentő légzőszákot. Ágyban tartósan fekvő betegek védelme érdekében ugyancsak meghatározható a test nyomáseloszlása, hogy ennek ismeretében elkerüljék a veszedelmes felfekvéseket. A kapacitív nyomásérzékelők nyomóerejük vezérlése révén a járművek számos funkció elemében is szerepet kaphatnak.

## **Vízlepergető és öntisztuló elasztomerfelületek**

A természetben – a növényi és az állatvilágban is – számos olyan szellemes működési mechanizmust és célszerű szerkezetet figyeltek meg, amelyek megkönnyítik vagy egyáltalán lehetővé teszik az élőlények létezését és életben maradását. Ma már tudatosan kutatják ezeket a természetes struktúrákat, és a mai technikai szinten próbálják meg ezeket a műszaki megoldásokban felhasználni. A kutatások jelentős része a felületek mikroszerkezetének és tulajdonságainak felismerésére irányul. A mikroszerkezetek geometriájától és méreteitől függően azok nagyon különböző fizikai tulajdonságokat kölcsönöznek a felületeknek, pl. víztaszítást, öntisztulást, a kopásállóság növekedését vagy csökkentését, a törésmutató csökkenését, hőszabályozást vagy hőszigetelést, UV-állóságot, tapadást stb.

Egyik legalaposabban tanulmányozott természetes felület a lótuszvirág levele, amelynek vízlepergető mikrostruktúrája a hidrofób felülettel együtt produkálja az ún. lótuszeffektust. Ennek lényege, hogy a felületre került vízcseppek a mikroszerkezet kúpos elemeinek csúcsát érintik, ezért az érintkezési szög a felülettel igen nagy, és a cseppek a legkisebb dőlésszög esetén legördülnek a felületről. Útközben felveszik a

felületen előforduló szennyeződések. Ennek következtében a lótoszlevél mindig tiszta.

Az öntisztuló felület számos helyen volna kívánatos a mai technikában. Ilyennek kellene lennie mindenekelőtt a fogkrémtubustól az óriás tartályokig valamennyi tárolóeszköz belső felületének, hogy tartalma hiánytalanul kinyerhető legyen. Erre meg is van a szándék, a műanyag- és kaucsukfeldolgozó ipar már eddig is számos felületi struktúrát próbált ki, amelyek egy részében ezt adalékokkal, az alappolimer módosításával vagy a felület megmunkálásával alakították ki.

A műanyagok felületi struktúráját a fröccsöntő szerszám felületének leképezésével lehet automatizáltan és reprodukálhatóan létrehozni. Hőre anyagokkal végzett kísérletekben bizonyították, hogy fröccsöntött termékek felületén megvalósítható a kúpos mikrostruktúra, amelyen a vízcseppek érintkezési szöge  $>150^\circ$ -nál. Ehhez azonban egyrészt nagyon igényes varioterm szerszámtemperálás szükséges, másrészt a merev hőre lágyuló és nem elég kopásálló műanyagok felületén ez a finom struktúra hamar megkopik.

Tartósabb felülethez a mechanikai hatásoknak jobban ellenálló anyagra van szükség, amelynek felülete nem megy tönkre a terhelés alatt, és amely plasztikusan sem deformálódik. A termoplasztikus elasztomerek rugalmasságuk révén ezeket az igényeket kielégítik, de a finom szerkezetet eddig ugyancsak varioterm szerszámtemperálással tudták kialakítani. Az elasztomerek fröccsöntésekor különben előnyt jelent az, hogy az alacsonyabb (20–100 °C-os) elasztomert meleg (140–200 °C-os) szerszámba fröccsentik, ahol a elasztomer a hőtágulás miatt a legkisebb részbe is behatol, ezért a fészek struktúráját tökéletesen leképezi.

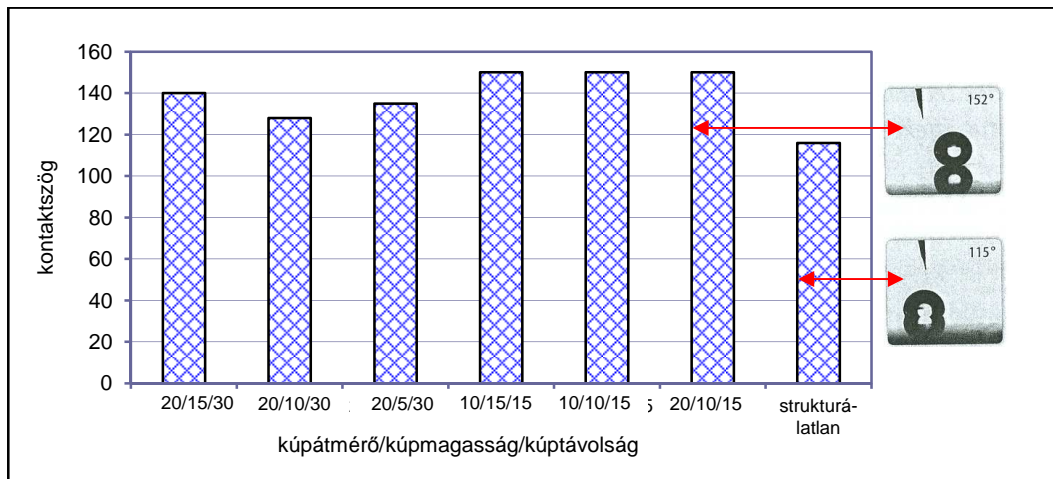
#### *A folyékony szilikonkaucsuk ideális alapanyag*

Németországban az aacheni Műanyag-feldolgozási Kutatóintézet (IKV) arra gondolt, hogy talán a szilikonkaucsuk volna az ideális anyag a vízlepergető, öntisztuló felületek gyártásához. Kísérleteikben a Momentive Performance Materials GmbH (Leverkusen) 2330 típusú szilikongumijából fröccsöntöttek 80 mm átmérőjű, 3 mm vastag korongokat, amelyek felületén hat mikrostrukturált mező volt. Valamennyit kúpos mikroelemek képezték, de a kúpok átmérője, magassága és távolsága különböző egymástól. A kísérletek fő célja az volt, hogy megfigyeljék a szuperhidrofób felületen a mikroelemek méreteinek hatását a vízcseppek kontaktszögére.

A strukturálatlan felületen a kontaktszög  $115^\circ$  volt, a strukturált felületeken jóval nagyobb (4. ábra). Az eredmények arra utalnak, hogy a kúpmagasságnak csekély szerepe van, jelentős tényező azonban a kúpok távolsága; a legkisebb, 15  $\mu\text{m}$  távolságban elhelyezett kúpokat tartalmazó felületek kontaktszöge egységesen  $150^\circ$ -os szuperhidrofób felületnek bizonyult.

A továbbiakban azt vizsgálták, hogy mennyire befolyásolják a felület hibrofób jellegét a feldolgozási paraméterek. A viszonyítási alapként szolgáló kísérletben az ömledék hőmérséklete 25 °C, a szerszámhőmérséklet 140 °C, a befröccsentési sebesség 12,5  $\text{cm}^3/\text{s}$  volt. Az összehasonlító kísérletekben kisebb (20 °C/140 °C/5 $\text{cm}^3/\text{s}$ ) és

nagyobb ( $30\text{ °C}/180\text{ °C}/20\text{cm}^3/\text{s}$ ) paraméterekkel végezték a fröccsöntést. Az eltérő paraméterek ellenére valamennyi próbatest 4. ábra szerinti 5. típusú felületén  $148\text{--}151^\circ$  közötti kontaktszöget mértek. Ez a különbség beleesik a mérések szórási tartományába.



4. ábra A strukturálatlan és a különböző méretű és távolságú mikroelemekből felépülő strukturált felületen mért kontaktszögek

A felsorolt kísérletek bebizonyították, hogy a feldolgozási paraméterektől szinte függetlenül szilikonelasztomerből lehetséges  $145^\circ$  kontaktszög feletti superhidrofób felületet előállítani. Ezt a felületet szokásos fröccsöntéssel, varioterm temperálás nélkül alakították ki. A sikerhez talán az is hozzájárult, hogy a folyékony szilikonelasztomer feldolgozási viszkozitása kisebb, mint a szerves elasztomereké, és könnyebben képezi le a finom struktúrájú szerszámfelületet. Ezért úgy döntöttek, hogy egy koromtartalmú EPDM-mel (etilén/propilén/dién kaucsukkal) is végeznek hasonló kísérleteket.

#### *Vízlepergető felület EPDM-ből*

EPDM-ből a szokásos receptúra szerint készítettek 100 rész elasztomerből és 20, 40, ill. 60 rész koromból álló keverékeket. A magasabb koromtartalmú keverékeknek értelemszerűen nagyobb volt a viszkozitása és a hővezető képessége is, emiatt az ilyen keverék feldolgozási ablaka szűkült. A fröccsöntött korongok strukturálatlan felületén  $100^\circ$  körüli, az 5. típusú strukturált felületen  $140^\circ$  körüli kontaktszöget mértek, a koromtartalomtól függetlenül.

Bebizonyosodott, hogy mind a folyékony szilikonkaucsuk, mind pedig az EPDM sokkal alkalmasabb mikrostrukturált felületek kialakítására, mint a hőre lágyuló műanyagok, és feldolgozásuk is egyszerűbb, nem igényelnek varioterm szerszámtemperálást. Mindkét elasztomeren kb.  $40^\circ$ -kal nőtt a kontaktszög az 5. típusú strukturált

mikroszerkezet hatására. A kontaktszög abszolút értéke természetesen függ a kiválasztott mikroszerkezettől és az alapanyagtól.

#### *A mikrostruktúra tartósságának vizsgálata*

Az elasztomerek további előnye, hogy felületük mikrostruktúrája tartósabb, mint a hőre lágyuló anyagoké. Ezt a kúpos mikroelemek mechanikai terhelés előtt és után konfokális mikroszkóppal mért magasságával igazolták.

Ehhez egy vízszintes szakítógépet úgy módosítottak, hogy az a szilikon-elasztomerből fröccsöntött próbatestek 5. típusú strukturált felületén vízszintesen egy acélból készített téglatestet szánként végig tudjon húzni. Az acéltest tömege 1,4 kg, felfekvési felülete 12x4,4 cm, sebessége 200 mm/min volt. A kúpok magasságának változását 5 ilyen koptató művelet után végezték el. A mikroelemeken nem észleltek sem jelentősebb plasztikus deformációt, sem törést. A különböző paraméterekkel fröccsöntött próbatesteken a kúpok eredeti átlagos magassága 11–14  $\mu\text{m}$  között volt, a kezelés után magasságuk 1–3  $\mu\text{m}$ -rel csökkent, ami kisebb érték, mint a struktúrán belüli kúpok magasságának a szórása. A koptatás előtti felületen mért kontaktszög 149,8°, a koptatás utáni kontaktszög 147,7° volt.

#### *Gyakorlati próba*

A kutatók kipróbálták, hogy kétkomponensű fröccsöntéssel felvihető-e egy funkcionális mikrofelületű szilikonelasztomer réteg egy hőre lágyuló műanyagból készített formadarabra. A kísérleti tárgy 30% üvegszállal erősített poli(butilén-tereftalát)-ból (PBT) készített kanál volt, a szár végén lévő kanálfejre második anyagként 0,7 mm vastag szilikonelasztomer réteget fröccsöntöttek úgy, hogy a bemélyedő belső felület víztaszító mikrostruktúrát hordozzon. A mikrostruktúra kúpjainak átmérője 20  $\mu\text{m}$ , a kúpok közötti bemélyedés kb. 15  $\mu\text{m}$  volt. A kanálfej kétszeres görbülete miatt a korábbi kísérletekben bevált 5. típusú struktúrát nem tudták tökéletesen megvalósítani a szerszám felületén. A legfontosabb az volt, hogy a két polimer erősen kötődjön egymáshoz, és hogy a nagyon vékony rétegen pontosan le tudják képezni a szerszám mikroszerkezetét.

A jobb tapadás érdekében egy ilyen irányban módosított szilikonelasztomert használtak, és a felvitt réteg formáját is úgy választották meg, hogy az zárt alakot képezzen. A csatornákat kétféle paraméteregyüttessel fröccsöntötték, majd mérték a kúpok magasságát a beömlőnyílás közelében, a csatorna közepén és a csúcsonál. Sem az eltérő paraméterek, sem a mérés helye nem befolyásolta a kúpok magasságát, az eltérések 1  $\mu\text{m}$ -en belül voltak. A csatorna funkcionálizása sikeres volt.

Összeállította: Pál Károlyné

Böse, H.: Elastomere zum Leben erwecken = Kunststoffe, 106. k. 5. sz. 2016. p. 77–80.

Hopmann, Ch.; Recht, U.: Fertigung widerstandsfähiger hydrophober Oberflächen = Kunststoffe, 106. k. 2. sz. 2016. p. 45–49.