

Műanyag alkatrészek fáradási vizsgálatai és hibamegelőzés

A motortérben a műanyagokat hosszú idejű ciklikus terhelések érik, ráadásul agresszív közegben. Ez a komplex igénybevétel tette szükségessé egy speciális próbatest kifejlesztését, amellyel a műszaki műanyagok fáradási tulajdonságait lehet vizsgálni és szimulálni. Egy másik törekvés a meghibásodások megelőzésére a tönkrement alkatrészek analízise, az eredmények adatbankba sűrítése.

Tárgyszavak: üvegszálás poliamid; fáradási vizsgálat; ciklikus terhelés; autóipar; adatbank; hibaanalízis.

Fáradási jelenségek és vizsgálatuk

A mai autóipari, motortéri alkalmazásokban a műanyag alkatrészeket nagyon sokféle terhelés éri. A tartós ciklikus terhelésnek kitett műanyag alkatrészek tartósságát (tulajdonképpen speciális gyakorlati körülmények között mutatott szilárdságát) kevesebbet vizsgálták, mint az egyszerű szakítási próbákban vagy akár a tartós állandó terhelés alatt mutatott szilárdságot (kúszás). Az autóipari felhasználók azonban nagy fontosságot tulajdonítanak annak, hogy a motor-alátámasztásokban, olajbeszívó egységekben és más területeken felhasználni kívánt műanyagok fáradási jellemzőit már a kiválasztás fázisában sokoldalúan elemezzék, vagy a pulzáló szivattyúzásnak kitett folyadék-továbbító rendszerek esetében is fontos, hogy ismerjék a hosszú távú viselkedést.

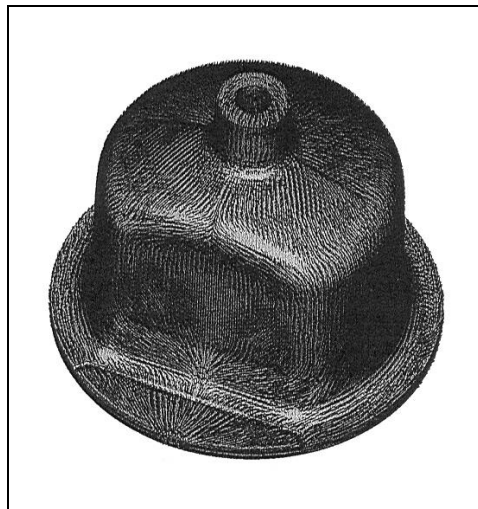
Új vizsgálati módszer

A BASF szakemberei sok éves tapasztalatot gyűjtöttek össze hőre lágyuló műszaki műanyagok viselkedésére és alkalmazhatóságára vonatkozóan, de a pulzáló nyomás hatására mutatott fáradási viselkedés sokoldalú elemzésére úgy tűnt, hogy célszerű egy új próbatestet kifejleszteni. A próbatestnek sokféle kívánalomnak kellett megfelelnie: *nem teljesen forgásszimmetrikus, nyitott üreges testről van szó*, amelynek falvastagsága sehol nem haladja meg a 2,2 mm-t, a közegvizsgálatok miatt lehetőleg nem túl nagy térfogatú, és lehetőleg mind belülről, mind kívülről lehetővé teszi a közeg alkalmazását. Ezen felül ki kell bírnia maximum 30 bar ciklikus nyomást, szerkezetéből adódóan egyféle tönkremeneteli mód szerint hibásodhat meg, tönkremenetele jól meghatározott területen következik be, a kigyengített helyen a száeloszlás repro-

dukálható irányú és egyszerű konstrukciós átalakítással hegesztési helyek vagy összecsapási zónákból származó forradások hozhatók létre benne.

Az anyag és a szimuláció szerepe

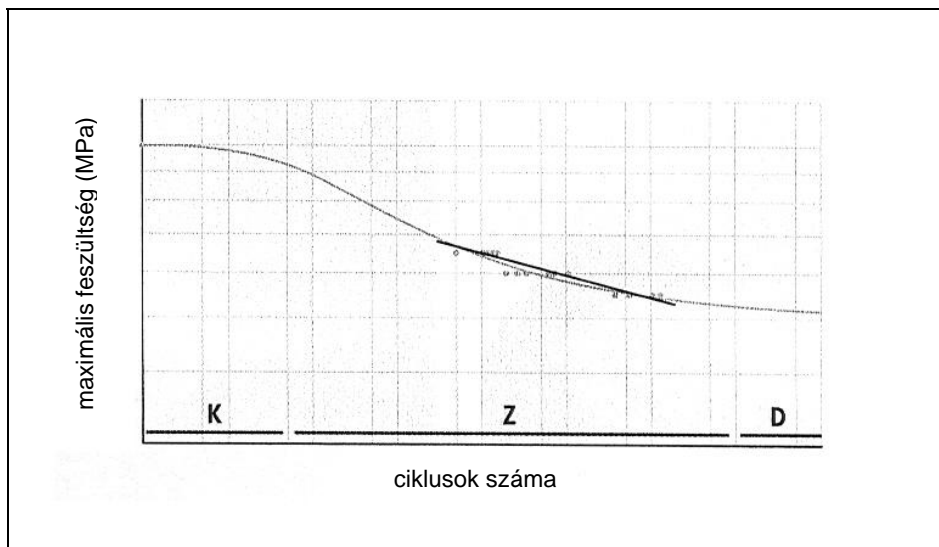
A próbatest fejlesztéséhez a BASF az *Ultramid A3WG7 CR-t* választotta, amely nagy dinamikus terhelések elviselésére készült, *35% üvegszállal erősített PA66 típus*. A kiválasztott próbatest egy alul peremmel, felül hengeres kiálló résszel ellátott, egyik oldalt belapított harang formájú fröccsöntvény, amely minden, az előzőekben felsorolt követelménynek eleget tesz. A próbatestet *Ultrasim-nek* nevezték el, ami egyben arra is utal, hogy a vizsgálatot a méréssel párhuzamosan szimulálják is (*1. ábra*). A kiválasztott alapanyag folytonos dinamikus terhelésnek kitett alkatrészek gyártására alkalmas. A CR sorozatú poliamidok megfelelő szilárdságot és merevséget mutatnak, jó a hőstabilitásuk, nagy az energiafelvételük és viselkedésüket jól lehet a CAE szoftve-
rekkel szimulálni. Rendelkezésre állnak a tönkremenetel szimulációjához szükséges nagy sebességű deformáció mellett felvett anyagjellemzők a szálorientáció függvényében. Az optimalizált receptek lehetővé teszik, hogy az adott alkalmazáshoz a legjobb, speciális tulajdonságokat mutató kompuandokat válasszanak ki. Az úgynevezett *Wöhler-görbét*, amelyek a maximális feszültséget vagy feszültségamplitudót ábrázolják a terhelési ciklusok számának a függvényében kétszeres logaritmikus léptékben, az **Ernst Mach Intézetben** vették fel. A Wöhler görbék fémeknél éppúgy, mint műanyagoknál szigmoid alakúak (*2. ábra*).



1. ábra A fáradást vizsgáló Ultrasim próbatest és a szálorientáció szimulált eloszlása

A kiválasztott próbatest-geometria nagy követelményeket támaszt a szimulációval szemben is. Egyes területek nagy igénybevételnek vannak kitéve, ami elvben különböző anyaggal vagy feldolgozással kapcsolatos hibahelyek létrejöttét eredményez-

heti – ezek pedig eltérő mechanizmussal mennek tönkre. A szálerősítésű anyagoknál tovább bonyolítja a helyzetet az, hogy a szálorientáció miatt az anyagtulajdonságok helyről helyre változnak. A terhelés belső nyomás, amelynek max. 40 barnál meghibásodáshoz kell vezetnie. A kívánt helyen történő tönkremenetelt úgy állították elő, hogy a harang alakú próbatestet egyik oldalon belapították. A belapított felület peremén nagy terhelés, a síkfelületen hajlító igénybevétel lép fel. A lokális szálorientáció és az összezsapási vonalak nagy hatással lehetnek a helyi szilárdságra. A további összezsapási zónák elkerülése érdekében a próbatestet középpontosan, felülről, a csavarozási hely felől fröccsöntik. A feltöltési szimuláció szerint a lapos felület töltődik fel utoljára, ami összezsapási zónát és ennek megfelelő, ék alakú szálorientáció-eloszlást okoz a síkfelület alján. A kritikus terhelési helyeket (amelyek a síkfelületen és a sík- valamint a hengeres felület határán helyezkednek el) ugyancsak szimulációval lehet meghatározni. A szimulációt megerősítik a tönkremenetelt filmező nagy sebességű felvételek is: *a repedés a síkfelület szélein indul el, mind statikus, mind dinamikus terhelések esetében.* A falvastagságot úgy állították be kísérletileg és szimulációval, hogy a másodlagos tönkremeneteli helyek kiküszöbölhetőek legyenek.



2. ábra A Wöhler görbe megközelítése a közepes logaritmikus tartományban egy negatív meredekségű egyenessel (ez az ún. Wöhler-egyenes).

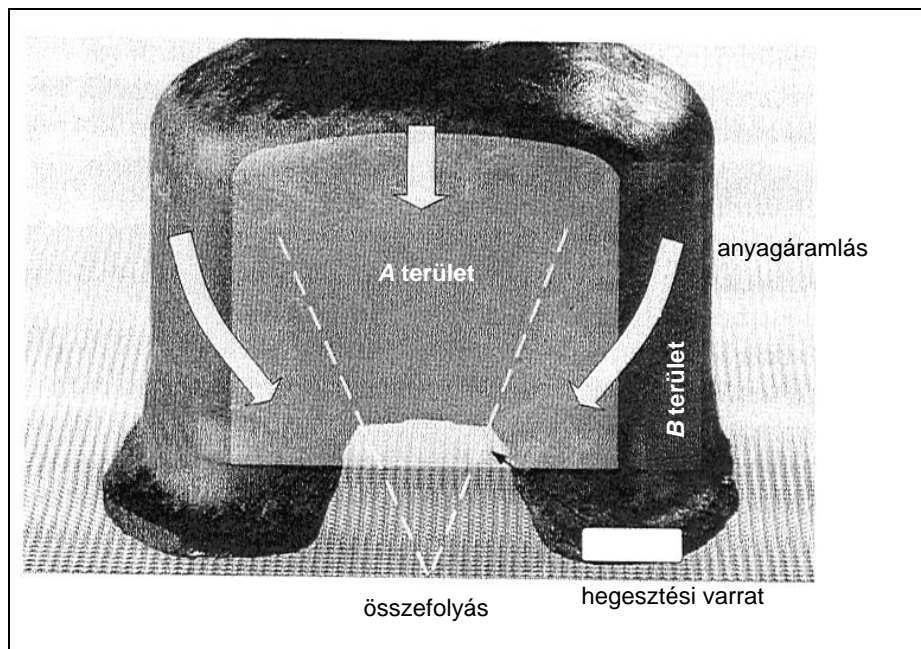
Ezen a szakaszon (Z) a szilárdság időfüggő, azaz a feszültség és a ciklusszám ismeretében ki lehet számítani, hogy mikor megy tönkre a tárgy.

A Wöhler egyenes előtti szakaszon (K) az eredeti, rövid idejű szilárdság jellemző, és utána – néhány millió terhelési ciklus után – a görbe (D) ismét ellaposodik

A feldolgozási paraméterek szerepe

A szimuláció mellett arra is szükség volt, hogy a feldolgozási paramétereket is optimalizálják annak érdekében, hogy a próbatestek jellemzői reprodukálhatóan

egyenletesek legyenek egy sorozatgyártás során, mert csak így biztosítható az egyenletes repesztési nyomásérték. Ha ez az érték akár csak néhány barral eltolódik, a Wöhler vizsgálat során vagy egyáltalán nem éri el a tervezett időn belül a tönkremenetelt, vagy az a tervezettnél jóval hamarabb következik be. A helyzetet mutatja a 3. ábra: az ömledék a vastagabb falú „B” zónában előresiet a vékonyabb falú „A” zónához képest, ezért egy ék alakú hegedési varrat alakul ki. Ez akkor jön létre, ha a hőmérséklet és a nyírósebesség megfelelően vannak beállítva, hiszen ezek határozzák meg az ömledék viszkozitását. Az ehhez szükséges optimális feldolgozási paramétereket kísérlettervezéssel, egy teljes 2^3 kísérletterv szerint határozták meg. Az ömledék-hőmérsékletet, a szerszámhőmérsékletet és a befroccsöntés sebességét változtatták. (A többi paraméter az előzetes vizsgálatok szerint nem befolyásolta lényegesen a repesztési nyomást). A paraméterek gondos beállítása mellett folyamatos felügyeletre van szükség a gyártás során is. A befroccsöntési fázisról az utónyomási fázisra történő átállást pl. egy szerszámnyomásmérő egység valósítja meg, mert ezzel észlelni lehet, ha a torlószelep kezd elkopni, és ezt a hatást kompenzálni lehet.



3. ábra Az ömledék áramlása a próbatest előállításánál

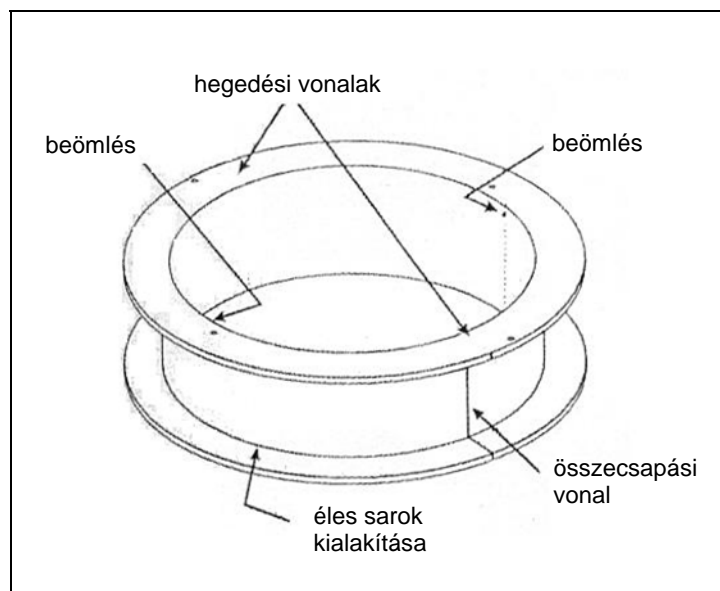
Tönkrement alkatrészek „hasznosítása”

Lehet, hogy furcsán hangzik, de egy tönkrement alkatrészből sokat lehet tanulni, igaz csak akkor, ha gondosan tanulmányozzák a tönkremenetel okait, és a vizsgálat eredményeit a gyártás módosításakor figyelembe veszik. A **Society of Plastics Engineers** (Műanyag Mérnökök Szövetsége) európai tagozata ebből a célból a tönkrement termékekről egy adatbázist hozott létre. Az adatbázisban részt vevők dokumen-

tálják saját tönkremeneteli vizsgálataik eredményeit (rajzokat, fényképeket), mert az remélik, hogy így mindnyájan képesek tanulni saját hibáikból éppúgy, mint másoké-
ból, és el tudják kerülni a későbbi tervezési vagy feldolgozási hibákat. Elkülönítve ke-
zelik a tönkremeneteli okokat és mechanizmusokat. Az okok között szerepelnek a kö-
vetkezők: feszültségkoncentráció, kis tömeg és/vagy szerszámhőmérséklet, feszült
összezsapási zónák, hibás bordázás, túl merevre tervezett alkatrész, nem megfelelő
kötések, nem megfelelő anyagválasztás. A tönkremeneteli mechanizmusok között sze-
repel: kúszás és feszültségrelaxáció, kopás, fáradás, UV degradáció, vegyi behatás,
környezeti feszültségrepedezés. A következőkben általánosságban néhány példáról
lesz szó, noha az adatbázis hátránya annak titkossága. Sok cég nem engedi meg a ké-
pek közzétételét.

Feszültségkoncentráció

A műanyagok egyik előnye az, hogy bonyolult alakú tárgyak készíthetők belő-
lük. Éppen a bonyolult, változó alak miatt (falvastagság-változások, hirtelen irányvál-
tások, csavarmenetek helye stb.) helyi feszültségek alakulhatnak ki a termékben. A 4.
ábra egy üvegszálal polikarbonátból készült csévét mutat, amelyre wolframszálat
szoktak tekerceselni. A hegedési vonalak és az osztósík mentén az éles sarok miatt
meghibásodás alakul ki, aminek oka a kis görbületi sugár. Lekerekítéssel a probléma
megoldható. A fröccsöntés korábbi időszakában (egészen a 90-es évekig) a belső fe-
szültséget csak bonyolult analitikai és kísérleti módszerekkel lehetett meghatározni.
Manapság ezt a műveletet jelentősen megkönnyítik a végeelem (FEM) szimulációs
programok.

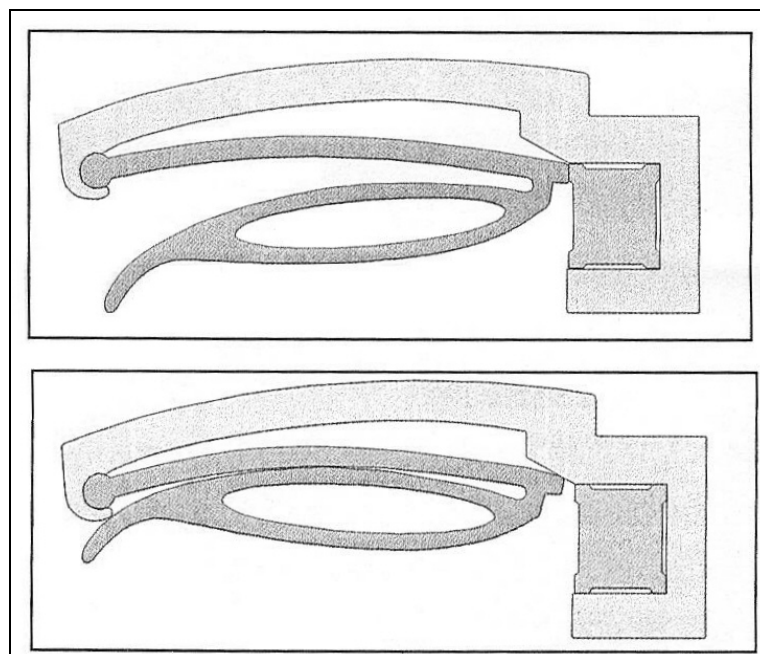


4. ábra Üvegszálal polikarbonátból készült cséve rajza és a tipikus meghibásodási helyek

Hibás anyagválasztás

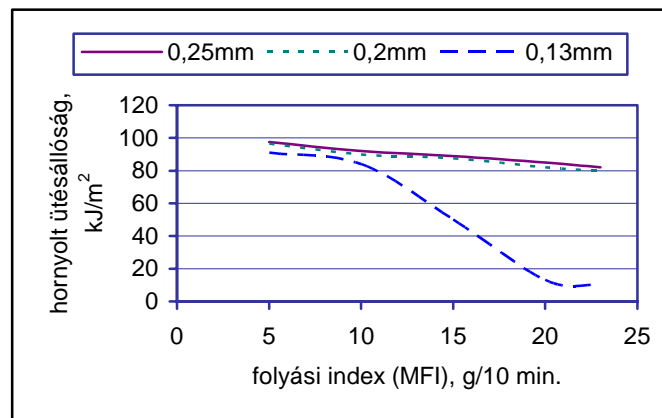
A műanyagok viselkedése meglehetősen bonyolult, és sok tervező nem rendelkezik megfelelő ismeretekkel a polimerekről. Ennek okai részben az oktatás hiányosságaiiban keresendők, részben pedig abban, hogy a tervezők sokszor csak a fröccsöntők tapasztalataira támaszkodnak, holott a fröccsöntők legfőbb szempontja csupán egy a sok közül: a minimális ciklusidő. Célszerű anyag kiválasztás előtt konzultálni az alapanyag-gyártókkal, bár azok többnyire csak akkor nyújtanak alapos segítséget, ha tudják, hogy nagyobb mennyiségű anyag vásárlása van kilátásban. Az anyag kiválasztásakor többféle hibát is elkövethetnek: rossz polimerfajtát, nem megfelelő keveréket vagy nem megfelelő típust választanak. A rossz anyag kiválasztásra példa egy olyan vízben úszó, hajózásnál használt eszköz, amelyet PA6-ból terveztek, de annak száraz állapotára, holott az már 50% relatív páratartalom mellett is több százaléknyi vizet vesz fel, és változnak mechanikai tulajdonságai és méretei. Ennek eredményeként a belőle tervezett bepattanó kötést csak nagyobb erővel lehet kinyitni, és ez csökkenti a termék megbízhatóságát. Ha az anyagot PA6 helyett PP-re cserélik, amelynek elhanyagolható a vízfelvétele, a probléma megszűnik. *Poliamidot – a vízfelvételeből eredő dimenzióváltozások miatt – általában nem érdemes választani, ha nagyon pontos méretekre van szükség.*

Rossz keveréket, egy 40% butadién tartalmú ABS-t választottak pl. egy nagyméretű extrudált bordás panel gyártásához. A nagy butadiéntartalomra a rugalmasság miatt volt szükség, de ezzel nem lehetett teljesíteni az előírt felületi érdességet. Ha viszont kisebb butadiéntartalmú típust választottak, a rendszer túl merev lett és nem ment át a fárasztási vizsgálaton. A megoldás végül az volt, hogy nagyobb butadiéntartalmú ABS típussal dolgoztak, de javítottak a hőformázás feltételein is.



5. ábra Egy polikarbonátból készült rugó nyitott és zárt állapotban

A helyes anyagfajta, de helytelen típus kiválasztására mutat példát az 5. ábra, amely egy nyomtatóban használt pozicionáló eszközt mutat be polikarbonátrugóval. Rögzített állapotban folyamatosan deformált állapotban van, nyitáskor pedig visszazugózik. Ez ismételt záraskor és nyitáskor fáradási igénybevételt jelent. Amorf polimert választottak, hogy a feszültségrelaxáció kicsi legyen, azon belül is polikarbonátot, amely viszonylag elfogadható áron elérhető. A prototípust extrudált PC lemezekből készítették, és nem is volt probléma. Amikor azonban áttértek a tömeggyártásra, olcsóbb, nagyobb folyóképességű (MFI) PC fröccstípust használtak, de ennek fáradásállósága nem volt kielégítő, az eszközök hamar meghibásodtak. Voltak középen meghibásodott rugók – ezek a statikus terhelést nem bírták, és voltak a végén meghibásodott alkatrészek, amelyek fáradási jelenségeket mutattak. A megoldást az jelentette, hogy kisebb folyóképességű PC típust választottak, amely tulajdonságaiban közelebb állt az extrúziós típusokhoz. A folyóképesség hatását az ütészállóságra (ami bizonyos fokú rokonságot mutat a fáradásállósággal) a 6. ábra mutatja.



6. ábra Különböző görbületi sugárral hornyolt PC minták ütészállóságának függése a folyóképességtől. Az MFI-t 300 °C-on 1,2 kg terheléssel mérték

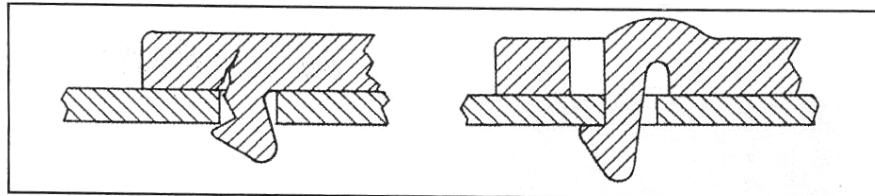
A fröccsöntés minősége

A fröccsöntés jósága is alapvetően befolyásolja a termék minőségét, meghibásodását. Erre példaként az adatbázisban egy vízvezetékben alkalmazott PPSU [poli(fenilén-szulfon)] nyomócsőfitting szerepelt. Ez az anyag rendkívül szívós, feszültségrepedezésnek jól ellenálló amorf polimer. Ennek ellenére a gyártótól kis repedéssel került vissza egy termék. A gyanú szerint a meghibásodás túl nagy feszültség következtében alakult ki. Szabad szemmel is láthatók voltak felületi egyenetlenségek a repedés közelében, habár a görbületi sugár miatt nem kellett volna a repedésnek kialakulnia. A sorja alapjánál azonban éles sarkok alakultak ki. A repedés közelebbi vizsgálatából az derült ki, hogy a repedés a felszínen alakult ki és befelé haladt, mint egy fáradási repedés. Amikor a behatolás elég mély volt, a szerkezet szilárdsága annyira

lecsökkent, hogy a repedés gyorsan végighaladt az egész fal vastagságán. A repedés terjedését eleinte olyan fáradási jelenségek okozhatták, mint a melegedés-hűlési ciklusokból származó ismétlődő termomechanikai feszültség. Végző soron a jelenség oka a sorjaképződés és az ebből adódó rossz minőség volt.

Nagy merevség

A 7. ábrán egy olyan bepattanó kötés látható, amely a túl nagy merevség miatt ment tönkre. A problémát itt a bepattanó elemek letörése és a nyitás/záráshoz szükséges erők rendkívül nagy szórása jelentette. A törések arra utalnak, hogy a bepattanó elemek túl ridegek, és nem bírják a tervezéskor előírt deformációt. A kép jobb oldalán levő hosszabb, hajlított bepattanó elemek kiküszöbölték a problémát. A bepattanó elemek esetében különösen nagy jelentősége van a nyitáshoz szükséges erőnek. Ha túl merev a konstrukció, akkor igen kis elmozduláskülönbség nagy erőeltérést okozhat, azaz a tolerancián belüli megengedett geometriai eltérések is nagy szórást okoznak a nyitóerőben.



7. ábra Az eredeti törékeny (bal oldalon) és a hosszabb, rugalmasabb (jobb oldalon) konstrukciójú bepattanó elemek

A fenti példák is bizonyítják, hogy a hibák katalogizálása és tanulmányozása nagy segítséget jelenthet a későbbi hibák kiküszöbölésében és megelőzésében.

Összeállította: Dr. Bánhegyi György
www.polygon-consulting.ini.hu

Kraft, W. W.: Auch Bauteile ermüden = Kunststoffe, 99. k. 11. sz. 2009. p. 108–111.
Spormaker, J., Bogelund, J.: Failure analysis and prevention = Plastics Engineering, 63. k. 9. sz. 2007. p. 48–52.