

Műanyag termékek hibaelemzése és a hiba alapvető okának meghatározása

Ha egy műanyag termék idő előtt felmondja a szolgálatot, és főképpen, ha azt egy sorozatban gyártott termék teszi, a lehető leggyorsabban meg kell vizsgálni, hogyan ment tönkre és mi volt a tönkremenetel oka, hogy minél előbb ki lehessen védeni a hibát. Nem érdemes ötletelni, megfelelő módszerekkel és célszerűen megtervezett munkatervvel időt és költséget lehet megtakarítani.

Tárgyszavak: műanyag termék; meghibásodás; hibaelemzés; degradáció; RCA technika (a hiba gyökerének meghatározása).

A műanyag termék alkalmazása során előfordul, hogy az a vártnál hamarabb meghibásodik, esetleg olyan mértékben, hogy használhatatlanná válik (pl. eltörik). Ha a hiba csekély mértékű, egyesek azt gondolják, hogy majd elmúlik, és nem tesznek semmit. Néha előfordul, hogy átmenetileg tényleg nem jelentkezik, de később többnyire újra felbukkan, már súlyosabb formában.

Felmerül a kérdés, hogy mi is tekinthető meghibásodásnak. A terméknek nem kell feltétlenül használhatatlanná válnia vagy pláne katasztrófát okoznia. *Meghibásodásról beszélnek akkor, ha a termék megváltozott tulajdonságai révén már nem tud eleget tenni az elvárásoknak.* Meghibásodás lehet a deformálódás, az elszíneződés, elhomályosodás, a korábban nem tapasztalt kellemetlen szag, a nagymértékű kopás, a repedezés, a törés. Meghibásodás bekövetkezhet a termék teljes élettartama folyamán bármikor: a gyártás után azonnal, beépítés közben vagy a használat alatt.

Egy filléres termék meghibásodásakor legegyszerűbb azt eldobni és újjal pótolni, ha az lehetséges. De ha egy adott helyen ugyanaz a termék ismételten meghibásodik, vagy ha egy sorozatban gyártott termék számos darabján lép fel ugyanaz a hiba, feltétlenül fel kell deríteni, hogy hogyan következett be és mi ennek az alapvető oka.

A meghibásodás egyik oka lehet a műanyagok polimerkomponensének degradációja, ennek tulajdonítják a tönkremenetelek 17%-át.

Mi is az a degradáció?

A degradáció a polimerek molekulaszervezetének kisebb-nagyobb mértékű leépülése, amikor az egymásba gabalyodott hosszú molekulaláncok rövidebb láncokra tördelődnek. Ennek következtében csökken a polimer átlagos molekulatömege, megváltozik molekulatömeg-eloszlása, az összegabalyodott láncok könnyebben szétválnak.

A degradáció többféle mechanizmus révén következhet be, ezek a

- termikus oxidáció,
- fotooxidáció,
- láncszakadás,
- hidrolízis.

A molekulák degradációja megváltoztatja a polimer tulajdonságait:

- romlanak a mechanikai tulajdonságok:
 - csökken a szilárdság,
 - törékennyé válik az anyag,
 - repedések képződnek benne,
 - végül eltörik, ami akár katasztrófát is okozhat;
- csökken a vegyszerállóság;
- megváltozik a küllem:
 - elszíneződik,
 - krétásodik a felület,
 - csökken a fénye,
 - csökken az átlátszósága;
- illékony vegyületek képződnek (amelyeknek kellemetlen szaga lehet);
- a molekulaláncokon karbonilcsoportok képződnek (amelyek gyengítik a dielektromos tulajdonságokat).

A molekulaszakadás degradálódása a műanyag termék élettartamának bármelyik szakaszában bekövetkezhet (1. táblázat). Bárhol és bármikor következhet is be, ez a termék idő előtt meghibásodását okozhatja.

1. táblázat

Egy műanyag termék élettartamának különböző szakaszaiban idő előtt bekövetkező degradáció lehetséges formái

Életszakasz	Lehetséges károsító hatások	A hatások következményei
Kompaundálás	nyírásból eredő magas hőmérséklet, adalékok bekeverése	láncszakadás
Szárítás	viszonylag hosszú időtartamú hőmérséklet a szárítóban	termikus oxidáció
Feldolgozás	nem kielégítő szárítás fröccsöntés előtt, vízfelszabadulás a fröccsgépben magas hőmérsékleten	hidrolízis
	a polimer hosszabb ideig tartózkodik a fröccsgép hengerében a javallottnál magasabb hőmérsékleten	láncszakadás
Tárolás	stabilizálatlan polimerek tárolása a szabadban, napfényben	fotooxidáció
Összeépítés	hőszabályozás nélküli forrasztás/hegesztés	termikus oxidáció
Alkalmazás	fluoreszcens fénynek kitett darabok	fotooxidáció
	hosszabb időtartamú alkalmazás a megengedettnél magasabb hőmérsékleten	termikus oxidáció
	agresszív savakat vagy lúgokat tartalmazó tisztítószer használata	hidrolízis

Termikus oxidáció

Termikus oxidáció akkor következik be, ha a polimer magas hőmérsékleten kémiai oxidálószerrel kerül érintkezésbe. A legtöbb polimer képes az oxidációra, de különböző mértékben. Legérzékenyebb a polipropilén, majd a növekedő ellenállás irányában a következő sorrend állítható fel: PP, PE-LD, PE-HD, PA, POM, PPO, PEEK, PPS, PVDF, PTFE.

Ha oxigén hatol be a polimer belsejébe, az a polimerláncok szénatomjaival kémiai kötésbe léphet karbonilcsoportot alkotva. Az ilyen kötés mellett elszakad, azaz meg rövidül a polimerlánc. Az oxigén többlépcsős reakcióban szabad gyököket is képez, ezek pedig véletlenszerűen reagálnak a polimerizáció melléktermékeivel, az adalékok vagy a polimerben található szennyeződések molekuláival, de megtámadhatják a polimerláncok kovalens kötéseit is. A degradációs folyamat az idő előrehaladásával egyre gyorsul, majd autokatalitikussá válik. A hosszú láncok egyre rövidebbek lesznek, végül oxigént tartalmazó funkciós végcsoportot hordozó vegyületekké (karboxil-savakká, észterekké, ketonokká, aldehidekké) válnak.

Fotooxidáció

A fotooxidációt legtöbbször a napfény UV sugarai váltják ki oxigén (levegő) jelenlétében. Bizonyos polimerek különösen érzékenyek a fényre, ezekben ún. kromofór csoportok (szén-nitrogén kötést tartalmazó nitril-, amid-, amincsoportok, szén-oxigén kötést tartalmazó éter-, észter-, keton-, karboxilcsoportok, szén-klór kötést tartalmazó vegyületek, oxigén-oxigén kötést tartalmazó peroxidok, nitrogén-hidrogén kötést tartalmazó amidok és aminok) vannak.

A degradáció általában csak a felületi réteget érinti, mivel az UV sugárzás 150 µm-nél mélyebbre nem hatol be. A degradáció mélysége attól is függ, hogy milyen mélységig tud az oxigén behatolni a termék felületébe. Így is jelentős kárt tud okozni, mert törékennyé teszi a felületi réteget, helyi zsugorodást vált ki, ezáltal belső feszültségek képződnek, a felületről repedések indulnak meg a műanyag belseje felé és utat nyitnak az oxigén mélyebb rétegekbe hatolásához.

Lánc törődés oxigén nélkül

Láncszakadás bekövetkezhet kémiai hatás, elsősorban oxigén nélkül is nagy energia (nagy feszültség vagy túl magas hőmérséklet) hatására. A polimerláncot összetartó kovalens kötések véletlenszerűen szakadnak fel, a szakadáskor szabad gyökök és szén-szén kettős (telítetlen) kötések képződnek. Ez a mechanizmus nagy nyírófeszültség és magas hőmérséklet egyidejű hatásakor a feldolgozógépből érvényesül, ha nincs jelen levegő.

Hidrolízis

A hidrolízis víz – pontosabban H^+ kationok és OH^- anionok – jelenlétében jöhet létre, pl. ha pl. a polimert víz alá merítik, ha ciklikus kondenzációnak vagy gőz hatásá-

nak teszik ki. Hidrolizálják az arra érzékeny polimereket a savak (magas H^+ koncentráció) vagy a lúgok (nagy OH^- koncentráció) is. Azok a polimerek a legérzékenyebbek a hidrolízisre, amelyeket polikondenzációval állítanak elő. Ilyenek a poliészterek (PBT, PET, kopoliészterek), a polikarbonát (PC), a poliamidok (PA6, PA66, PA12), a poliuretánok (az éter- és észterbázisú PUR-ok egyaránt) és a poliacetálok (POM homopolimerek és kopolimerek).

A hidrolízis kémiai reakció, ahol a víz a reakciópartner, és amelynek reakciótermékei a polimerek eredeti monomerjei vagy az ezekhez nagyon hasonló vegyületek. A reakció mellékterméke ugyancsak víz. A hidrolízis viszonylag gyors folyamat, a degradáció rövid idő alatt következik be.

A degradációt befolyásoló tényezők

Hogy a degradáció milyen mechanizmus szerint és milyen sebességgel megy végbe, több tényezőtől függ:

- *a polimer típusától*, mivel bizonyos (korábban felsorolt) polimerek könnyebben, mások nehezebben épülnek le. Ez a polimerszerkezettől függ,
- *a stabilizátorok védőhatásától*, azok típusától, bekevert mennyiségétől, tartóságától,
- *a hőmérséklettől*, magasabb hőmérsékleten a degradáció felgyorsul,
- *a reakciót kiváltó vegyi anyagtól vagy a sugárzás erősségétől*, nagyobb határfokú vagy nagyobb koncentrációjú vegyi anyag gyorsabb degradációt vált ki,
- *a feszültség nagysága*, nagyobb feszültség mellett a leépülés gyorsabb; a külső és belső feszültségek összeadódnak.

A hiba okának feltárása

Ha egy műanyag termék váratlanul meghibásodik, rendszerint összeül egy szakértői gárda és elkezdik találgatni, hogy mi lehet ennek az oka. Sokféle ötlet, feltételezés merül fel ilyenkor anélkül, hogy azokat bármilyen vizsgálat vagy adat alátámasztaná. Pedig már a krimiidrodalom legendás nyomozója, Sherlock Holmes is megmondta, hogy kapitális hiba elméleteket felállítani tényekre vonatkozó adatok nélkül. A rakétatechnika atyja, Werner von Braun szerint is egyetlen vizsgálati eredmény többet ér, mint ezer szakértői vélemény.

A hiba okának feltárását tehát hibaelemzéssel kell kezdeni. Ennek eredményei birtokában már van arra remény, hogy megtalálják a hiba gyökerét. A feladat nagyon összetett, a munkába gyakran be kell vonni a minőségvizsgálókat, a tervezőket, a gyártókat és a végfelhasználókat is. Minden meghibásodás egyedi eset, és az ok vagy okok felderítése közben lépésről lépésre kell haladni, a körülmények és a már meglévő adatok ismeretében.

A hibaelemzés

A hibaelemzés egy logikus és szisztematikus vizsgálat, amelyben kémiai elemzéssel ellenőrzik a meghibásodott termék összetételét és különböző fizikai és ter-

mikus módszerekkel mérik különféle tulajdonságait. A kapott eredmények önmagukban semmit sem mondanak, de ha úgy tekintik őket, mint egy összerakós játék elemeit, kijöhet belőlük a meghibásodás története. A hibaelemzés alapján megállapítható a meghibásodás mechanizmusa és oka – azaz hogy hogyan és miért ment tönkre a kérdéses alkatrész. Ezt azért kell felderíteni, hogy hasonló hiba a jövőben elkerülhető legyen, pl. alkalmasabb alapanyagot válasszanak, módosítsanak a tervezésben, jobban ügyeljenek a feldolgozáskor vagy a szereléskor.

A hibaelemzéshez számos eszköz áll rendelkezésre. A vizsgálatot vezető szakembernek mindenekelőtt össze kell gyűjtenie a meghibásodott darabbal kapcsolatos háttérinformációkat. Az alapos szemrevételezés után használhat mikroszkópot, végezethet kémiai elemzést, vizsgálathatja a molekulaszervezetet és számos fizikai vizsgálati eszközt is igénybe vehet. A vizsgálatok a körülményektől függően lehetnek roncsolásmentesek és roncsolással járók is. Nagyon sok hasznos adat származhat a törésfelület tanulmányozásából. A hibaelemzés két legfontosabb módszere a fraktográfia és az anyagvizsgálat.

Ha a darabon repedezés észlelhető, a *fraktográfias vizsgálat* elengedhetetlen. Ezzel deríthető fel a repedezett felület morfológiája és topográfiája, és ebből határozható meg a repedések jellege. A hiba okának feltárásához szükség van a repedések térképére. A vizsgálat eszközei a különböző mikroszkópok: a sztereomikroszkóp, a digitális mikroszkóp, szükség esetén a pásztázó elektronmikroszkóp (SEM).

A törésfelület jellegét többféle paraméter határozza meg:

- az műanyag összetétele (alappolimer és a bekevert adalékok),
- a vizsgált darabra korábban ható erők (nyomás, húzás, nyírás),
- az erők nagysága,
- az erőhatások sebessége,
- az erők frekvenciája (folyamatos vagy váltakozó),
- a környezeti hatások (hőmérséklet, vegyi anyagok).

A törésfelületről legfőképpen azt kell megállapítani, hogy milyen nyomot hagyott azon a repedés megindulása és terjedése. Alapvető adat az, hogy a repedés rugalmas (képlékeny, ductile) vagy rideg (brittle). A rugalmas repedés deformálódik, nyúlás nyomai figyelhetők meg. Makroszkópos vizsgálatokban a rugalmas repedések néha feszültség okozta kiféheredést hoznak létre. Mikroszkóp alatt általában megnyújtott szálhoz hasonlítanak. A rideg törések deformációja csekély, nyúlás nem észlelhető rajtuk. Makroszinten az ilyen repedések csak kevéssé válnak el a környezetüktől, és kevéssé torzítják a felületet. Mikroszkóp alatt a repedések simák és éles szögűek.

Nagyon fontos adat a repedések kiindulásának helye. Ez legtöbbször a legnagyobb terhelés vagy a legkisebb szilárdság helyét jelzi. A darab törését a feszültség formájától, a környezeti hatásoktól és a darab kialakításától függően egy vagy több ilyen gyenge pont is okozhatja. A törés kiindulási pontjából következtetni lehet a feszültség nagyságára és irányára, továbbá a törés pillanatában fennálló fizikai körülményekre.

A törés kiindulási helye és a repedésterjedés okozta felületi elváltozások mellett a törésfelületről további jellegzetességek is leolvashatók, pl.:

- bordaszerű csíkok,
- kettéágazó repedések,
- másodlagos repedések,
- folyási nyomok,
- repedés-összenövések,
- repedésmaradványok,
- hibás helyek (üregek, zárványok).

A fraktorgráfias megfigyelések értékelése nagy gyakorlatot igényel, mert a hasonló jelenségek különböző anyagokban és eltérő feszültségek hatására néha egymástól különböző okokra vezethetők vissza. Ezért tudni kell, hogy a vizsgált termék milyen polimerből készült. Az alapanyag fajtájának és összetételének ismerete fontos feltétele a fraktogramok helyes értékelésének.

A meghibásodás mechanizmusának meghatározása gyakran kevésbé bonyolult, mint a hiba okának megtalálása. *A fraktográfias adatok és az anyagvizsgálat eredményei gyakran elegendőek ahhoz, hogy megállapítsák, hogyan következett be a hiba.* Az anyagvizsgálatnak az összetételre, a molekulaszerkezetre és a fizikai tulajdonságokra kell irányulnia.

Az összetétel elemzésének ki kell terjednie az alappolimerre és az adalékokra is. Alapvető kérdés, hogy a meghibásodott termék megfelelő anyagból készült-e. Nagyon fontos ellenőrizni, hogy a műanyag tartalmazza-e az előírt mennyiségű és minőségű erősítő üvegszálat, és hogy a szükséges mennyiségű antioxidánst keverték-e bele.

A műanyagok molekulaszerkezete alapvetően határozza meg tulajdonságait. A molekulaszerkezetre jellemző adatok a molekulatömeg, ennek eloszlása és a polimer kristályos vagy amorf volta. *Ha a meghibásodott darab anyagának molekulatömege kisebb az alapanyag eredeti molekulatömegénél, a meghibásodás okai között a degradációnak is szerepe lehetett.*

A fizikai tulajdonságok mérése néha nem egyszerű, mert a meghibásodott daraból nem lehet próbatestet kivágni. Az elvégezhető vizsgálatok eredményeinek és az eredeti anyagra megadott értékek összevetéséből azonban hasznos következtetéseket lehet levonni.

A hibaelemzés megkönnyítésére számos jól dokumentált technikát fejlesztettek ki. Ezek közül kell kiválasztani az elvégzendő feladatnak és célnak legjobban megfelelőket, azaz azokat, amelyekkel elegendő adatot lehet kapni elfogadható költséggel. A túl sok adat éppen olyan hátrányos, mint a túl kevés.

Olyan vizsgálati eljárásokat kell kiválasztani, amelyek az elvégzendő hibaelemzéshez szükséges adatokat szolgáltatják. Ez általában a munka fokozatos elvégzése során lépésenként derül ki. Az első lépés legtöbbször a szemrevételezés, ezt követhetik a mikroszkópos vizsgálatok, majd az alapvető anyagvizsgálatok. A kapott adatok alapján el lehet dönteni, hogy milyen kiegészítő vizsgálatokat célszerű még elvégezni.

Az adatok értékelése és az okok meghatározása

Ha befejezték a tervezett vizsgálatokat, összesíteni és értékelni kell az eredményeket. Az adatok értelmezésekor úgy kell eljárni, hogy abból lehetőleg kiderüljön a

meghibásodás mechanizmusa (hogyan ment tönkre a vizsgált darab) és mi volt ennek az oka (miért ment tönkre a vizsgált darab).

A műanyag formadarabok hibaelemzésekor nagyon gyakran jutnak arra a következtetésre, hogy többféle egymástól független tényező is jelentős szerepet kapott meghibásodásban. A hiba kialakulásában részt kaphat a túlterhelés, a hirtelen terhelés, az ütés, a kúszás okozta repedezés, a kifáradás, a környezet által kiváltott feszültség-repedés, a molekuláris degradáció. Hozzájárulhat a nem optimális alapanyag és forma, a feldolgozás és beépítés tökéletlensége, a felhasználás alatt fellépő károsodás. Ezeket a mechanizmusokat mind számba venni és hatásukat megbecsülni igazi kihívást jelent. Ha mégis sikerül, az eredmény segítségével meg lehet kezdeni a meghibásodás alapvető okának meghatározását (a hiba gyökerének elemzését; *RCA, root cause analysis*).

A szabályos hibaelemzés nyilvánvaló előnyeinek ellenére ezt gyakran elhagyják és a kedvenc elméletekkel próbálják a hiba okát magyarázni. Legtöbbször arra hivatkoznak, hogy a vizsgálatok időigényesek és drágák. Egy tanulmányban azonban kimutatták, hogy a problémák megoldásában a vizsgálatokkal és elemzésekkel sok időt lehet megtakarítani, és az eredmény néhány hét alatt megszülethet. A megfelelő irányítás nélküli munka hibás következtetéshez vezethet. Ha ennek alapján próbálják kiküszöbölni a hibát, eközben rengeteg időt és más forrást pazarolhatnak el anélkül, hogy a hiba megszűnne.

A hibaelemzés megfelelően rendezett adatai alapján kiderül a hiba kialakulásának a mechanizmusa, de oka nem mindig egyértelmű. Ilyenkor segít az *RCA-technika*, amelynek teljes neve *Event and Causal Factor Charting* (Az eseteket és okokat előidéző tényezők feltérképezése). Ez rugalmas eszköze a meghibásodás időbeli eseményeit és okait befolyásoló tényezők elemzésének. Az elemző egy idővonalat épít fel, amely tartalmazza az aktuális körülményeket, a másodlagos történéseket és a feltételezéseket. A cél, hogy megtalálják a meghibásodás fő előidéző tényezőjét, amely lehet a feldolgozási folyamat, a környezeti hatás vagy emberi tévedés. Ebből az elemzésből legtöbbször az is kiderül, hogy melyik az a tényező, amelynek kiiktatása után hasonló meghibásodás nem léphet fel.

Az elemzés tovább folytatható egy másik RCA-módszerrel, a *Five Why* (5 miért) technikával, amely még mélyebben keresi a meghibásodás okát. A hiba kialakulásához hozzájáruló okok mindegyikének azonosítása után felteszik a „miért” kérdést, és végül eljutnak a hiba alapvető okához. A három technika (hibaelemzés, a tényezők feltérképezése és az 5 miért) együttes alkalmazása biztosan elvezet a meghibásodás gyökeréig.

Két példa a meghibásodás okának feltárására

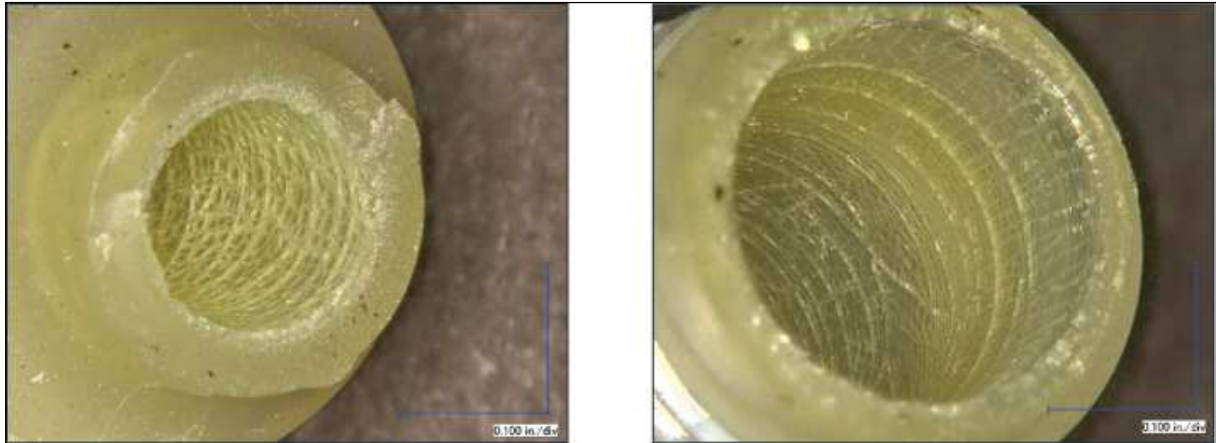
Egy folyadékot szállító könyökcső törésének hibaelemzése

Egy élelmiszeriparban alkalmazott, PA66-ból gyártott könyökcső (1. ábra) kb. hathónapos használat alatt elszíneződött, majd eltört. Az azonos sorozatból származó újabb könyökcsövek ezen a helyen ennyi idő alatt ismételten tönkrementek, de az

üzem más helyein jóval hosszabb volt az élettartamuk. A meghibásodás helyén egy kereskedelmi forgalomban megvásárolható szerrel tisztították a csőrendszert.



1. ábra Ezt a PA könyököt hat hónaponként kellett cserélni törés miatt



2. ábra A csőkötésen belül és a cső belső falán képződött repedések

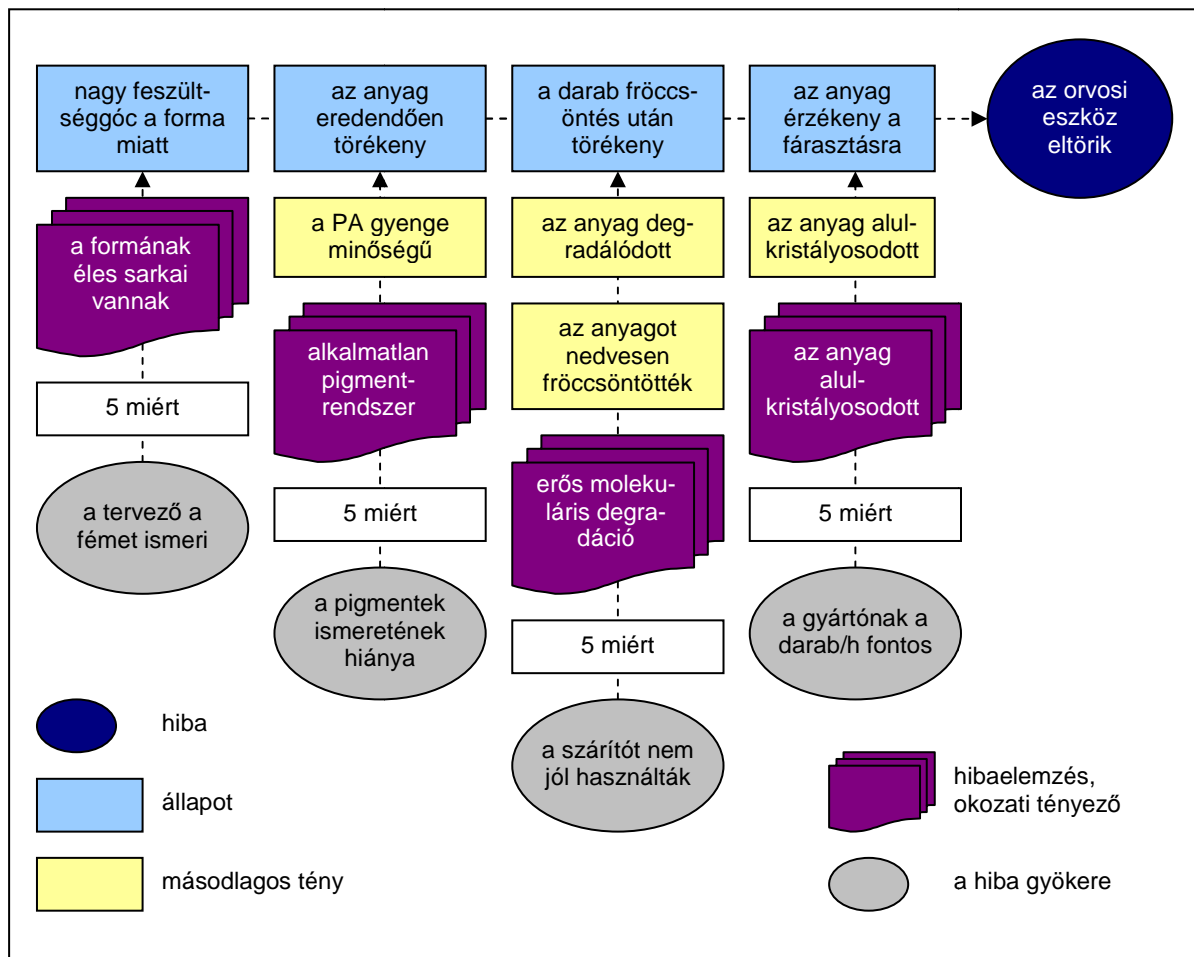
Mikroszkópos vizsgálatkor a könyök végén lévő csőkötésben durva keresztirányú rideg repedéseket észleltek. A könyökcső belső falát is egymást keresztező repedések kusza hálója borította (2. ábra). A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok is igazolták, hogy vegyi anyag által kiváltott molekuláris degradáció ment végbe a csőben. Fourier transzformációs infravörös spektroszkópiával (FTIR) kimutatták, hogy a csöveket valóban az erre a célra alkalmas poliamidból gyártották, de a sérült csövek belső felületéről vett mintában karbonilcsoportok jelenlétét is észlelték. Energia-diszperzív röntgenspektroszkópiával a referenciamintában szenet, oxigént és nitrogént (a poliamidot alkotó elemeket) mutattak ki, a hibás cső belső felületéből vett mintában ezek mellett jelentős mennyiségű káliumot is. Kiderült, hogy a tisztításra kiválasztott szer kálium-hidroxidot tartalmaz, amely erős lúg, ezért a hidrolízisre érzékeny poliamidot megtámadta. A problémát a tisztítószer cseréje oldotta meg.

Egy orvosi eszköz meghibásodásának elemzése

Egy betegek számára kiadott orvosi jelzőeszköz fedele sorozatosan megrepedt (3. ábra) és leesett a készülékről: emiatt a betegek ellenőrizhetősége megszakadt. A hiba-elemzést és az okok feltárását a 4. ábrán látható vázlat szerint végezték.



3. ábra A betegeknek kiadott törött fedelű orvosi ellenőrző készülék



4. ábra Az orvosi ellenőrző készülék hibaelemzéséhez és a hiba okának meghatározásához készített munkaterv vázlata

A hibaelemzés a következőket állapította meg:

- *jelenség*: a mobil orvosi eszköz elemtartójáról leesik a törött fedél,
- *következmény*: a beteg ellenőrzése megszűnik,
- *mechanizmus*: lassú ciklikus fáradás,
- *okok*: erőteljes molekuláris leépülés a tervezéskor bevitt éles sarkok miatt (feszültségkoncentráció); a darabban nem alakult ki tökéletesen a kristályos szerkezet, mert az üzem a nagyobb termelékenység érdekében túl korán vette ki a szerszámból a formadarabot (ezt DSC – differenciál pászttázó kaloriméterben felvett – görbe igazolta); az alkalmazott pigment rosszul fért össze a PA-val.

A kapott eredmények alapján idővonalat készítettek, amelyből kitűnt, hogy a fémtárgyak tervezésében járatos szakember nem értett a műanyag tárgyak tervezéséhez; a pigment nem volt kompatibilis a poliamiddal; a PA granulátumot fröccsöntés előtt nem szakszerűen szárították ki; a fröccsöntő üzemnek pedig fontosabb volt a nagy termelékenység, mint a darab minősége. Mindezek az okok hozzájárultak a darab meghibásodásához. Ezeket egyenként mind ki lehet küszöbölni, ami által elkerülhető lesz a fedelek törése. Az alapvető hiba a hozzá nem értés és a feldolgozás hanyagsága volt.

Valószínűtlen, hogy az alkalmazott elemzések nélkül meg lehetett volna határozni külön-külön azt a négy okot, amely a hibát okozta. A hibaelemzés és a két RCA eljárás segítségével, jó hatásfokkal, viszonylag rövid idő alatt és elfogadható költséggel lehet megoldani a műanyag alkatrészek meghibásodásának problémáját.

Összeállította: Pál Károlyné

Jansen, J.: Plastic failure through molecular degradation = *Plastics Engineering*, 71. k. 1. sz. 2015. p. 34–38.

Jansen, J.: Failure analysis-backed RCA thwarts the tendency to „theorize before one has data” when failures arise = *Plastics Engineering*, 70. k. 7. sz. 2014. p. 20–26.