A sikeres mikrofröccsöntés titkai

Az orvosi készülékek, elektronikus eszközök és a biogyógyszer-ipari berendezések gyártóinak új, mikrofröccsöntött termékekre van szükségük ahhoz, hogy képesek legyenek kisebb, kevésbé invazív és/vagy kisebb helyigényű készülékeket előállítani. A mikrofröccsöntött alkatrészek olyan kicsik is lehetnek, mint egy porszem, és/vagy ilyen méretű részeket tartalmazhatnak.

Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás; mikrofröccsöntés; szerszámtervezés; összeszerelés; bevizsgálás; polietilén, polipropilén, PLA; ciklikus olefin kopolimerek; műszaki műanyagok.

A kihívás

A legtöbb mikroméretű termék valamilyen szintű, extrém kihívással indul. Ritkán fordul elő, hogy gyárthatók lesznek az eredeti tervek, vázlatok szerint. Gyakran egy már piacon lévő termék lekicsinyítése a feladat, csakhogy néhány nagyságrenddel kisebb méretre.

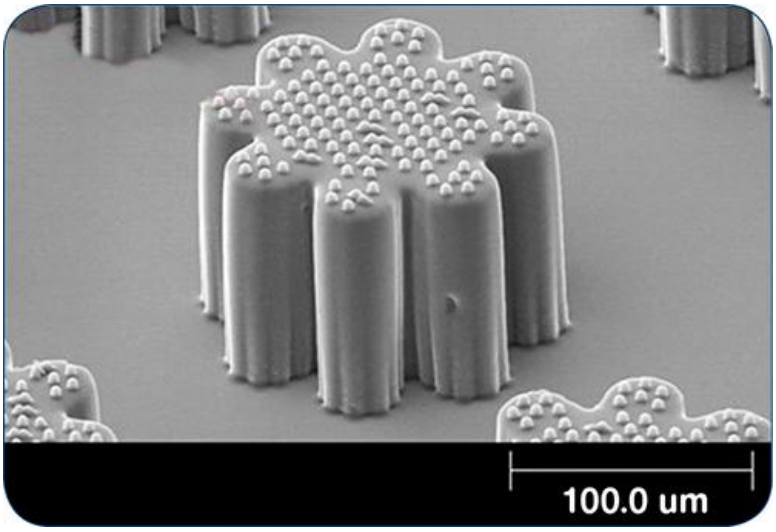
A mikroméretű összeszerelt termékek egyre komplexebbek lesznek, mivel arra van szükség, hogy pici, érzékeny artériákba, vagy pedig szivattyúkba, katéterekbe, illetve endoszkópokba illeszkedjenek mégpedig jól működő mikroalkatrészekkel a belsejükben. Gyakran problémás geometriai kialakításúak, miután korábban valamikor két vagy több alkatrészből összeszerelve lettek kialakítva, de a költségcsökkentés érdekében ezeket most egy alkatrészbe integrálják, hogy elkerüljék a bonyodalmas mikroszkóp alatti szerelés költségeit. Számos esetben, mint pl. a porinhalálókban az eredetileg 20 mikroalkatrészt kevesebb mint 5 összeszerelendő alkatrészbe integrálták.

A legújabb mikroalkatrészek olyan részeket, pl. bemélyedéseket tartalmazhatnak, amelyek átmérője és mélysége 3 mikron körüli érték – amelyekből több mint 80 millió férne el egy mikroszkóp tárgylemezén *(1. ábra).* Általában a legkisebb méretű formarészlet jelenti a legnagyobb kihívást, és jelenti egyben a meghatározó jelleget is az adott alkatrész formája, csatlakoztatása és funkciója szempontjából.

Hasonlóképpen, a mikroméretű termékek fröccsszerszámainak eszköztárát jelentő megmunkálási technológiák is kritikusak mind a szerszámgyártás, mind a méretellenőrzés tekintetében.

A mikromegmunkálási technológiák terén kifejlesztett számos új megoldás teszi lehetővé a mikrofröccsszerszámok elkészítését és ezáltal a hőre lágyuló műanyagokból, szilikongyantákból vagy fémporokból történő mikrofröccsöntést.

Ezek a termékek megkövetelhetik a gyógyszer-hatóanyagok közvetlen, polimerekhez, fémekhez vagy membránokhoz történő bekeverését vagy hozzáadását, és emellett mozgó komponenseket, fogaskerekeket, emeltyűket és meghajtókat tartalmaznak az ismétlődően és hosszan tartó működés biztosítására. Tekintetbe véve ezeket a funkciókat és azt is, hogy ezeket az eszközöket közvetlenül beépíthetik az emberi szervezetbe, fontos, hogy robusztus, megbízható kivitelűek legyenek, és alaposan bevizsgálják formájukat, csatlakoztathatóságukat és működésüket.



1. ábra Mikroalkatrész részlete

Mikroömledék áramlásának analízise

Mivel a mikrofröccsszerszámok és prototípus-alkatrészek kifejlesztési folyamata nagyon költséges lehet, a mikroömledék-áramlás analízise lehetővé teszi, hogy a gyártás során az ömledék megfelelően töltse ki a szerszámüreget. Gyakori az a téves feltevés, hogy a normál méretű fröccstermékeknél használatos szoftverek és modellező eljárások a mikrofröccsöntésnél is alkalmazhatóak.

Így például egy tipikus, 500 µm (0,5 mm) méretű gát ömledékáramlása drasztikusan eltér egy hasonló alakú 75 mikrométerétől. A fő különbség az, hogy a mikroalkatrészbe a sokkal szűkebb nyíláson bekerülő ömledék a bejutásához szükséges jóval nagyobb nyíróenergia révén sokkal jobban felhevül. Következésképpen a szilárdtestmodell hálójának rendkívül nagy felbontással kell rendelkeznie, hogy meghatározható legyen, mi történik a gátban és a vékony falú területeken. A szilárdtestmodell hálójának felbontása a gátnál 2,5–5 mikronos, a termék többi részénél 10–25 mikronos szintet igényel.

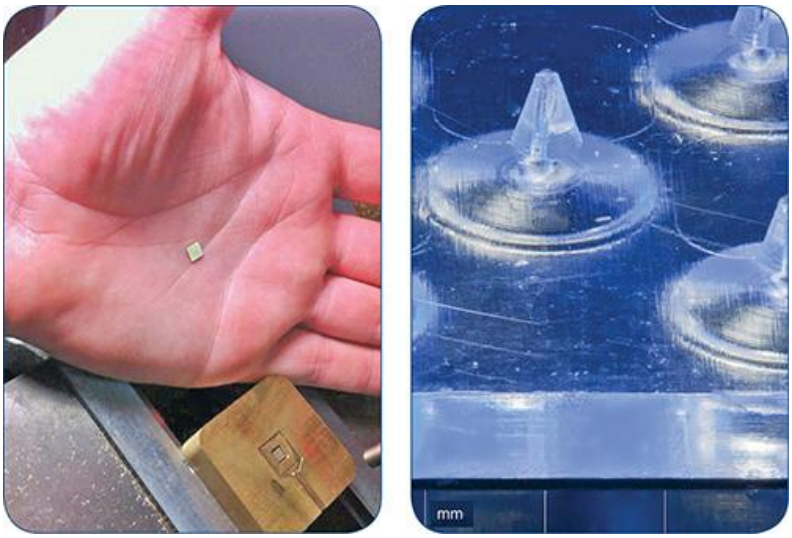
Egy másik fontos faktor a szerszámkitöltés vagy a hűlés szimulációja során a fröccsöntési folyamat és a szerszámgyártás gyakorlati ismerete. A legügyesebb számítógépes szakember sem boldogulhat általános műanyagipari ismeretek, illetve a

mikroszerszám tervezésének, a gát méretezésének és elhelyezésének vagy a beömlő- és elosztócsatornák kialakításának ismerete nélkül.

Mind a folyamat, mind az anyag specifikus ismerete alapvető fontosságúak. A mikroalkatrészek gátjának megfelelő méretezése szükséges ahhoz, hogy ne tegyék ki a szerszámüregbe befolyó műanyagömledéket szükségtelenül nagy hőterhelésnek. Az olyan hőérzékeny anyagok, mint a bioreszorbeálható és biogyógyászati polimerek tartózkodási ideje a fröccshengerben, fúvókában és a forrócsatornában már eleve hőterhelést jelent, amelyhez a gáton át történő kényszeráramlás okozta felhevülés még hozzáadódik. Bizonyos esetekben az anyagnak van meghatározó szerepe a gyártási folyamat kiválasztására nézve, máskor a folyamat határozza meg az anyagkiválasztást. A mikrofröccsöntésnél leggyakrabban használt műanyagok a PEEK, PLA, PGA, LSR, polietilén, polipropilén, polikarbonát, LCP, PMMA, ciklikus olefin kopolimerek (COCs), illetve a rozsdamentes acél (fémfröccsöntés).

Szerszámgyártás

Amikor az anyagkiválasztás és a termék alakja már olyan mértékig meghatározásra került, hogy érdemes a prototípus bevizsgálására pénzt költeni, szükségessé válik egy mikrofröccsöntő szerszám elkészítése. Legyen a kiválasztott anyag akár hőre lágyuló polimer, akár szilikongyanta vagy fémpor, *a jó szerszám mindig a siker legkritikusabb tényezője.* A mikromegmunkálási technológiák teszik lehetővé a hajszálvékony magtüskék, elosztócsatornák és miniatűr szerszámüregek kialakítását.



2. ábra Balra: fröccsszerszámbetét és fröccsdarab (bőrre alkalmazható mikrotapasz, amely gyógyszerek adagolására alkalmas). Jobbra: a termék erősen kinagyított képe több vékony tűt mutat (<1 mm). Készülhet LCP, PC, PMMA és COC polimerből

Miután az alkatrészek olyan parányiak *(2. ábra)*, a méret toleranciaértékei még kisebbek lesznek és a szerszámméretek toleranciája nem lehet nagyobb, mint a darab

toleranciaértékének 25%-a, ha megfelelő gyártástechnológiai ablakot kívánnak biztosítani. Ha a darab mérettűrése 0,01 mm, akkor a szerszámméreteké legfeljebb 0,0025 mm lehet. Ilyen pontosságra az egész világon csak kevés szerszámgyártó képes, mert vagy nincs megfelelő berendezésük 0,0025 mm pontosságú mérésekhez, vagy/és nincs megfelelő pontosságú fémmegmunkáló gépparkjuk, illetve a megfelelően pontos működtetésükhöz szükséges szaktudásuk.

A legfontosabb szerszámtervezési szempontok a következőkben foglalhatók össze.

- *Elosztócsatornák/beömlés*: az elosztócsatornák és/vagy a beömlés (ha van ilyen) lehet barát, de lehet ellenség is a mikroalkatrészek összeszerelésénél. Használhatják pl. mint fogantyút az automata összeszerelő berendezésben vagy pozícionáló bütyköket képezhetnek ki rajta. Végül azonban el kell őket távolítani.
- *Választóvonalak*: a két szerszámfél találkozásánál kialakuló mintegy 10 mikrométer kiemelkedésű választó vonal jelentős mértékben akadályozhatja az összeszerelési folyamatot, és mindenképpen figyelembe kell venni, amikor az alkatrészt más alkatrész(ek)hez kívánják illeszteni, mert ha nem, akkor megfelelő mozgatás, megvezetés hiányában megakadályozhatja az összeszerelést.
- *Kúposság*: minél nagyobb a kúposság, annál jobb, de előfordulhat, hogy a funkció miatt csak $0{,}2^{o}$ kúposság lehetséges. A darab belsején vagy külsején kialakított kúposság problematikus lehet. A mikroalkatrész a kúpos felületen „ülve” megbízhatatlan, esetleges felületet képez, ami nem megfelelően pozícionálhatja azt az összeszerelési folyamat során. Megoldást jelenthet e téren, ha a darab felületének egy kis részét kúposság nélkülire alakítják ki, vagy az összeszerelő berendezés/állomás ellendarabját is a megfelelő mértékűen kúposra tervezik, vagy ha a kúposságot az összeszerelés előtt eltávolítják.
- *A gát elhelyezése*: a beömlés helyének kiválasztása a normál méretű fröccstermékeknél is rendkívül fontos tényező, de a mikrofröccsöntés esetében még ennél is nagyobb szerepe van abban, hogy a szerszámüregben egyenletes legyen az ömledék áramlása. Ennek hiányában a kitöltés nem lesz teljes, sőt a finom szerszámelemek meg is sérülhetnek.
- *Beömlőmaradék*: a legtöbb mikrofröccsöntött termék leszűkített keresztmetszetű gáton át történő beömléssel készül. Ilyen esetekben a beömlési helyet le kell munkálni, hogy elkerüljék éles „bütykök” kialakulását, amelyek implantátumok esetében megsérthetik az artériák falát, vagy az automatikus összeszerelésnél okozhatnak fennakadást. Ez a probléma úgy is kezelhető, ha a beömlést a termék falában kialakított bemélyedésben alakítják ki (ha a falvastagság ezt lehetővé teszi), mert így a „bütyök” nem áll ki a fal síkjából és a darab mozgatása során nem akadályozza az összeszerelést.
- *Felületi érdesség*: noha erről gyakran megfeledkeznek, a felület érdessége fontos tényező az összeszerelés során, mivel érdes felületen nehezebben csúszik az adott alkatrész, viszont jobban lehet ragasztani. Sima felület esetén a darab kidobása problémás lehet.

Fröccsöntési folyamat

Ha a szerszámot helyesen alakították ki, maga a fröccsöntési folyamat mintegy 10–15%-os szerepet játszik a megfelelő termék előállításában. *A legnagyobb problémát a szerszámüreg kitöltése jelenti.* A megfelelő levegőelvezetés alapkövetelmény, amelyet gyakran csak a szerszámüreg „puzzle" jellegű, több rétegből való összerakásával lehet elérni. A fröccsnyomás általában 1500–3000 bar, ezért nem megfelelő fröccsbeállítások esetén az ömledék elgörbítheti a hajszálvékony szerszámelemeket. Hasonló okokból nagyon fontos a mag/csésze pontos pozicionálása, mivel a kiegyensúlyozatlan kitöltés gyakran szerszámkárosodáshoz, illetve hiányos kitöltéshez vezet. A be-fröccsöntési idő nagyon rövid, általában 0,1 s alatti érték.

Ma csak mintegy tucatnyi gyártó kínál mikrofröccsöntésre alkalmas fröccsöntő gépeket, de számuk az iparág fejlődésével egyre nő. Az ilyen gépek jellemzője a kis fröccstérfogat és a rövid tartózkodási idő a hengerben, ami főleg a nyírás- és hőérzékeny bioreszorbeálódó polimereknél (PLA, PGA) kulcsfontosságú.

Összeszerelés, kezelés

A legjobb kezelési mód, ha egyáltalán nem kell kezelni a mikrofröccsöntött alkatrészeket. Ezért célszerű minél több funkciót egyetlen alkatrészbe integrálni, pl. összeszerelés helyett kettős fröccsöntéssel mindjárt a tömítőgyűrűt is felvinni egy alkatrészre. Mindez nagyon alapos, átgondolt tervezést igényel a fejlesztési fázisban.

Az alkatrészek összeerősítésére

- előnyösen alkalmazhatják a tiszta kötést eredményező, szubmikron átmérőjű lézersugárral végzett hegesztést, gyakran plusz anyaggal vagy megvastagított falrészlettel megerősítve a hegesztési pontot. Nanoméretű mozgatóasztalok és sokdimenziós minirobotok segítik a darabok pozicionálását.
- Speciálisan kialakított, kis energiájú berendezésekkel ultrahangos hegesztést is eredményesen alkalmazhatnak.
- Különböző anyagú alkatrészeket oldószeres ragasztással lehet egyesíteni, de itt ügyelni kell a szennyeződések elkerülésére. E kis beruházásigényű módszert általában inkább kisebb sorozatoknál lehet jó eredménnyel használni, mivel az eljárás reprodukálhatósága nem elég megbízható és nehéz automatizálni. A megfelelő oldószer kiválasztása fontos nemcsak a megfelelő kötéserősség, hanem pl. implantátumok esetében a szövet-összeférhetőség miatt is.
- A mikroszegecselés és peremezés eredményesen használható műanyag/fém kötésekhez is.

Bevizsgálási elvek

A minőségellenőrzés nagyon fontos szerepet játszik a mikrofröccsöntéssel készült termékeknél. Gyakran vizsgálják a termék elektromos vezetőképességét, a szivárgást, a nyomástartást és a nyomásállóságot. Különösen a roncsolásos vizsgálatok

esetén a legjobb módszer, ha nagyon jól reprodukálhatóan, nagyon kis ingadozásokkal tartják kézben a gyártási folyamatot, azaz biztosítják az egyenletes, állandó minőséget. A statisztikai folyamatkontroll csökkenti a drága bevizsgálások számát, de időnként ezek elkerülhetetlenek, főleg implantátumok és gyógyszeradagolók esetében.

Automatikus, in-line bevizsgálás 2 másodpercnél is rövidebb idő alatt elvégezhető nagyszériás gyártásnál. Gyakran érdemes nemcsak a késztermékét vizsgálni, hanem a részegységeket/alkatrészeket is, hogy elkerüljék egyetlen hibás egység miatt az egész termék kiselejtezését. A minden darabos ellenőrzés szúrópróbaszerűvé redukálható az automatizált folyamatok megnyugtató beállását követően elvégzett statisztikai elemzés alapján.

Vizsgálati módszerek

Csak azt szabad gyártani, amit ellenőrizni is tudnak. Ez különösen igaz a gyógyászati termékeknél, ahol a jó termék élet-halál kérdése. Felületi minőség és alakhelyesség ellenőrzésére gyakran használnak nagy felbontású kamerákat. 3D lézeres szkenneléssel lehet a kritikus méreteket vizsgálni. A gyógyszerek porszemcséit és a pikoliter méretű folyadékcseppek adagolásának helyességét nagy sebességű videokamerával lehet ellenőrizni.

A fenti vizsgálatok elvégzésére már a tervezés során gondolni kell, különben azok egyáltalán nem, vagy csak rendkívül drágán és bonyolultan végezhetők el. Fontos, hogy az alkalmazott mérési eljárás/berendezés Cpk értéke (minőségképességi index) minden alkatrésznél és részegységnél összhangban legyen a késztermék funkciója által megkövetelt értékkel.

Összeállította: Dr. Füzes László

Bibber, D.: Secrets of success in micro molding = Plastics Technology, 2012. március, www.ptonline.com