

ELEKTROMOS FRÖCCSÖNTŐGÉP ALKALMAZÁSA A MÉRNÖKI POLIMERTECHNOLÓGIAI ALAPISMERETEK EGYETEMI OKTATÁSÁBAN

APPLICATION OF AN ELECTRIC INJECTION MOLDING MACHINE IN UNIVERSITY EDUCATION OF BASIC ENGINEERING POLYMER TECHNOLOGY

Dr. Czégéni Csilla Enikő *, Hódos György**

ABSTRACT

We present the integration of Engel e-mac 180 electric injection molding machine into university engineering education. In addition to expanding students' practical knowledge, this implementation raises the standard of university education. It provides an opportunity for students to learn the parts of an industrial electric injection molding machine, the injection molding tool and their specific role in the molding cycle. Furthermore, they can operate the injection molding machine through programming the parameters of the molding cycle. While optimizing molding parameters, students can learn how to determine the gate freeze time and understand its importance in achieving perfect cavity filling. The injection molding of standard test specimens also offers opportunities for subsequent mechanical testing or hardness measurements of polymers with different structures (amorphous, semicrystalline). Finally, in order to promote environmental awareness, we propose studying environmentally friendly, energy-saving injection molding technologies by utilizing recycled plastics or bio-based polymers with this electric injection molding machine.

1. BEVEZETÉS

A műanyagok mára már az életünk nélkülözhetetlen részeivé váltak, amelyek nélkül a mindennapjaink elképzelhetetlenek lennének. Bár a mai környezettudatos szemléletmódban a műanyag szó gyakran „közellenségként” cseng, de gépészmérnöki szempontból pont ez teszi fontossá a polimertechnológiai alapismeretek bővítését: a probléma nem a műanyaggal van, hanem a szemlélettel, ahogy eddig kezeltük. A mikroműanyag-szennyezés és a környezetszennyezés nem a polimerek létezésének, hanem a nem megfelelő hulladékgazdálkodásnak a következménye. A fenntartható jövőhöz nem kevesebb műanyagra, hanem okosabb műanyag-felhasználásra és jól képzett mérnökökre van szükség. A fenntarthatóság alapja az, hogy minimalizáljuk a selejtet és egyre nagyobb

mennyiségben gyártsunk újrahasznosított- vagy bioalapú alapanyagokból.

Ennek a korszerű szemléletnek az elsajátításához elengedhetetlen a magas szintű gyakorlati oktatás. Mivel oktatási céllal kevés helyen áll rendelkezésre az iparban használt fröccsöntő gép, a hallgatók csak elméleti szinten, esetleg gyakorlati bemutatókon keresztül tanulnak a gyártástechnológiákról. Ha elérhetők is a számukra laboratóriumi berendezések azok általában kisméretűek, amelyek a korlátozott szerszám befogadó képességük miatt szintén kisméretű próbadarabok (pl. szakító próbatestek) előállítására alkalmasak, valódi ipari alkatrészek gyártására nem.

Jelentős mérföldkőnek tekinthető a Debreceni Egyetem Gépészmérnöki Tanszékén az Engel E-Mac 465/180 Fast Track elektromos fröccsöntő gép üzembehelyezése, ami egy rendkívüli gyakorlati lehetőséget nyújt a mérnökhallgatók számára. Az Engel gép precizitása három speciális szerszámon keresztül demonstrálható: az autóalkatrész-gyártó szerszámmal a valódi ipari gyártástechnológia szemléltethető, a szakítópróbatest-szerszámmal számszerűsíthetők az anyagtulajdonságok (pl. a szakítószilárdság), míg a spirál szerszámmal az ömledék áramlás-törvényszerűségei taníthatók. Ezek a gyakorlati tapasztalatok elősegítik, hogy a hallgatókból ne csak gépkezelők, hanem a folyamatokat is megértő és irányítani képes mérnökök legyenek. Képessé válnak arra, hogy akár az újrahasznosított darálékból vagy re-granulátumokból is kiváló minőségű terméket tervezzenek, majd gyártsanak.

A jövő fröccsöntése már nem csupán hatékony termelésről kell szólnon, hanem egyre inkább a fenntarthatóságot, az energiahatékonyságot kell előtérbe helyezni úgy, hogy a folyamatok biztonságosak és környezetbarátak is legyenek. A modern, elektromos vagy hibrid fröccsöntő gépek már jóval kevesebb energiát fogyasztanak, mint a hagyományos hidraulikus berendezések. Emellett fontos szerepet kell kapjon az újrahasznosított műanyagok arányának növelése a gyártásban, a biopolimerek (pl. politejsav, cellulóz) szélesebb körű alkalmazása, alacsony karbonlábnyomú adalékanyagok használata, komposztálható vagy

*egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

** tanszéki mérnök, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

környezeti körülmények között rövid idő alatt lebomló termékek fejlesztése. Ezek a lépések mind kulcsszerepet játszanak abban, hogy a fröccsöntés hosszú távon gazdaságos, de mégis környezetbarát és versenyképes maradjon.

2. A FRÖCCSÖNTŐ GÉP FELEPÍTÉSE, A FRÖCCSÖNTÉS FOLYAMATÁNAK ELMÉLETI ÁTTEKINTÉSE

A fröccsöntés egy szakaszos műanyagfeldolgozási technológia, amely során a műanyag granulátumot olvadáspontja felé melegítve ömledék állapotba hozzák, majd az így kapott kis viszkozitású ömledéket nagy nyomással, egy szűk beömlőnyíláson a kívánt formára kialakított zárt, fémből (acél, alumínium) készült szerszámba fecskendezik. A szerszámban az ömledék a hűtés hatására megszilárdul és elnyeri végleges alakját [1].

A fröccsöntő gép fő részei [2]: a plasztifikáló- és fröccsegység (fröccsagregát), a szerszámmázó egység és a vezérlőegység (1. ábra). A szerszámot valójában azért nem soroljuk a fő egységek közé, mert egy fröccsöntő gép több szerszámmal is használható valamint egy szerszám több gépen is felhasználható. A fröccsöntésben használt alapanyagok hőre lágyuló polimerek, amelyek a kívánt színre (ún. mesterkeverékekkel) színezhetők vagy mechanikai tulajdonságaik javítása érdekében más adalékokkal tölthetők [3].



1. ábra: Az Engel E-Mac 465/180 Fast Track elektromos fröccsöntő gép

A fröccsöntési folyamat a szerszám zárásával veszi kezdetét. Ezt követően kialakul a záróerő (a fröccsöntő gép egyik legfontosabb jellemzője), amely a két szerszámfél tökéletes zárását biztosítja, úgy, hogy a magas nyomással beáramló polimer ömledék ne hogy szétfeszítse a szerszámot.

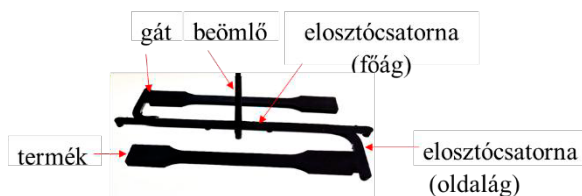
A fröccsöntési ciklus több elkülöníthető szakaszra bontható amint az a 2. ábrán látható: szerszámmázás, fröccsöntés, utónyomás, hűtés/plasztifikálás, szerszámnyitás/kidobás. Összefoglalva a ciklust, a szerszámfelek összezárása után, a plasztifikáló egység (a fröccsagregát, amely magába foglalja a csigát, a hengert és a hozzájuk tartozó egyéb alkatrészeket) előre mozdul, és a fúvóka csatlakozik a szerszámmal. Ezt követően a csiga forgás nélkül, gyorsan előre lendül, és befroccsönti az anyagot a szerszámba. A szerszám teljes kitöltése után

megkezdődik az utónyomás, amely során további anyagot juttatnak a szerszámba a zsugorodás ellensúlyozására. A szerszám kinyitása után a fröccsegység hátrafelé mozdul, majd újra elindul a csiga forgása, és megkezdődik a plasztifikálás, mindeközben a termék a szerszámban hűl. A hűtési idő lejártával a szerszám kinyílik, és a késztermék eltávolítható.



2. ábra: A fröccsöntési ciklus [4]

A szerszám bezárása után a ciklus ismétlődik, a fröccsegység újra rázár a szerszámmal. A késztermék eltávolítása a szerszámüregből többnyire a kidobó tűskék segítségével történik. A kilövő rendszer mellett nagyon fontos szerepe van a beömlőnek ami lehet hideg vagy melegcsatornás, fő részei: a beömlő csatorna, az elosztó csatornák és a gátak (3. ábra). A szerszám termék üregébe a műanyag ömledék a gáton keresztül jut be, ami az elosztó csatorna beszűkülő része. Beszélhetünk direkt meglövésről (ilyenkor nem használunk gátat) vagy lehet standard-, film-, legyező-, esernyő-, küllő- és alagút a gát típusa.



3. ábra: Egy hidegcsatornás fröccsöntő szerszám beömlőrendszerének felépítése

Fröccsöntés során egy-egy terméken számos hiba jelentkezhet, amelynek típusai és okai nagyon sokfélék és összetettek lehetnek, ezek visszavezethetők a nem megfelelő fröccsöntési paraméterekre, az alapanyagokra vagy a fröccsöntő szerszámmal. Beszélhetünk geometriai eltérésekről (amikor a termék mérete, alakja tér el a tervezettől) vagy esztétikai hibákról (ezek a termék megjelenését vagy akár a mechanikai tulajdonságait is befolyásolhatják). A fröccsöntött műanyagtermékek esetén a kiindulási anyag és adalékok aránya, a polimer megolvasztásához szükséges hőmérséklet, a nyomás, az utónyomás, a hűlési idő, az utónyomási idő és plasztifikálás paraméterei is mind hatással van a termék minőségére.

3. A FRÖCCSÖNTŐ GÉP INTEGRÁLÁSA A GYAKORLATI OKTATÁSBA

3.1. Az optimális fészekkitöltés és átkapcsolási pont meghatározása, pecsételődési pont megállapítása az autóalkatrész gyártásakor

Cél: Egy konkrét alkatrész gyártása (autó lökhárító rögzítő elem) a technológiai paraméterek szisztematikus változtatásával. A hallgató megkeresi az ideális átkapcsolási pontot utánnnyomás alkalmazása nélkül, a kétfészkes szerszám esetén vizsgálja a fészkek közötti különbséget is, majd meghatározza a pecsételődési pontot. Különböző alapanyagok viselkedésének vizsgálata ugyanazzal a szerszámmal.

Amikor a hallgatók az autóalkatrészt gyártják, megtanítjuk nekik, hogy a precíz fészekkitöltés és a tökéletes utánnnyomás-beállítás kulcsfontosságú. A hallgatók megtanulják azt is, hogyan állítsák be úgy az utánnnyomást, hogy a termék éppen annyi anyagot tartalmazzon, amennyi a szerkezeti integritáshoz kell. Az autóiipari fröccsöntött rögzítő elem mindkét oldali képe látható a 4. ábrán.



4. ábra: Az autóiipari fröccsöntött rögzítő termék mindkét oldali képe

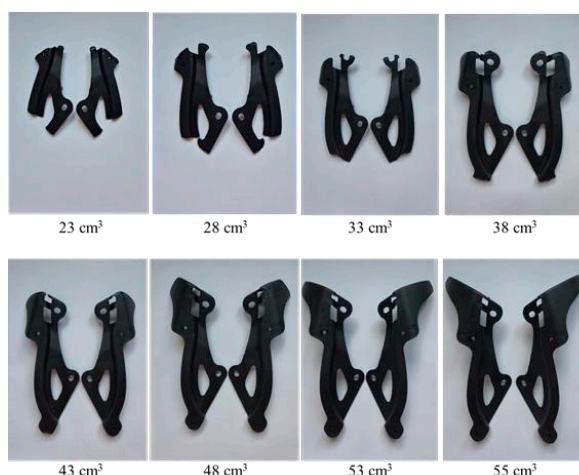
A polipropilén (PP) kiválóan alkalmas oktatási célú fröccsöntéshez, mivel költséghatékony alapanyag, feldolgozása egyszerű, nem igényel sem magas hőmérsékletet, sem speciális tárolást, szárítást. Mechanikai tulajdonságai megfelelőek az egyszerűbb alkatrészek gyártásához, ugyanakkor lehetőséget biztosítanak olyan jelenségek szemléltetésére is, mint a zsugorodás, beszívódás vagy az áramlási vonalak kialakulása. A vizsgálatok célja a fröccsöntött, PP alapanyagú lökhárítótartó elemek gyártási paramétereinek optimalizálása, különös tekintettel az átkapcsolási térfogatra, az utánnnyomásra és az alkalmazott PP alapanyag tulajdonságaira. Az alkalmazott szerszám egy+egy fészkes hidegsatornás autóalkatrész (első lökhárító tartó elem) fröccsöntő szerszám. A szerszám bélyeg és csésze oldala látható az 5. ábrán. Ez a fajta szerszámalkalítás a jobb és bal oldali alkatrészek egyidejű gyártását teszi lehetővé, ami azért előnyös, mert mindkét darab azonos feldolgozási körülmények között egyszerre készül el.



(a) (b) (c)

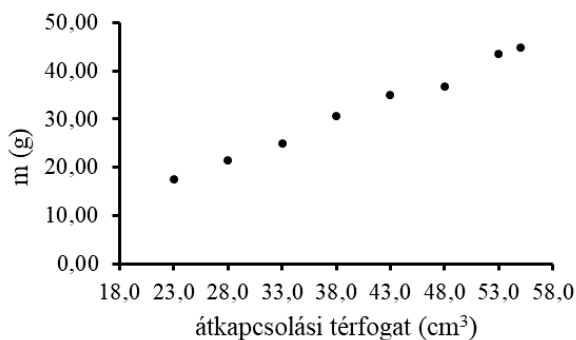
5. ábra: Fröccsöntő szerszámrészek bemutatása: (a) kimozdítás nélküli-, (b) előretolt kilökökkel a bélyeg oldal, (c) csésze oldal

A kitöltés vizsgálat demonstrálásához az átkapcsolási térfogatokat 23 cm^3 és 55 cm^3 között változtattuk, majd a fröccsöntött termékek tömegét digitális táramérlegen lemértük.



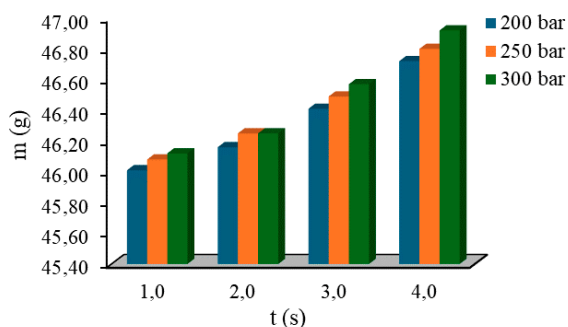
6. ábra: Az optimális átkapcsolási térfogat meghatározásához készített mintadarabok képei

Az átkapcsolási térfogat változtatásának hatását vizsgáltuk a fröccsöntött darabok tömegére és a szerszám kitöltésére. A 6. ábrán a különböző beállításokkal készült mintadarabok láthatóak. Megfigyelhető a fokozatos kitöltés: alacsonyabb adagolási térfogatnál ($23\text{--}43 \text{ cm}^3$) a darabok még hiányosak („short shot”), nagyobb adagolási térfogatnál ($48\text{--}55 \text{ cm}^3$) az alkatrészek szemrevételezés alapján már teljesnek tűnnek. A kapott adatok szemléletessé tehetők a tömeg átkapcsolási térfogat függvényében történő ábrázolásával. A 7. ábra grafikonján látható, hogy az átkapcsolási térfogat növelésével a darabok tömege nő. Általában azt a pontot keressük, ahol a szerszámműreg kb. 95-98%-ig telik meg volumetrikusan, majd a maradékot és a tömörítést már az utánnnyomás végzi.



7. ábra: Az átkapcsolási térfogat és az alkatrész tömege közötti összefüggés

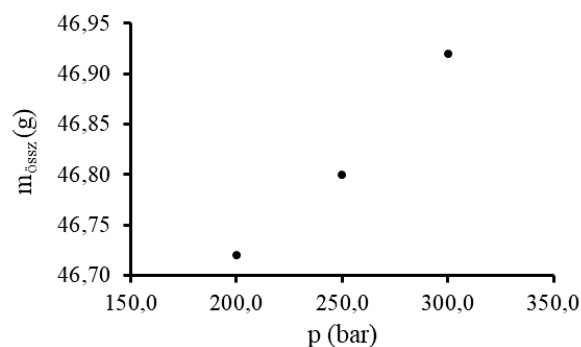
A 8. ábra azt mutatja, hogyan változik a fröccsöntött darab tömege a különböző növekvő utónyomás értékek (200, 250 és 300 bar) alkalmazásakor az utónyomás időtartamának függvényében. Jól látható, hogy mindhárom nyomáson a termék tömege növekszik az utónyomás idő növelésével, mivel hosszabb ideig van lehetőség a fajtérfogat csökkenés kompenzálására. Megfigyelhető, hogy az utónyomás növelése nagyobb termék tömeget eredményez azonos időtartam alatt, a 300 bar utónyomással gyártott darabok tömege pedig a legnagyobb. Ez arra utal, hogy a nagyobb utónyomás hatékonyabban képes kompenzálni a hűlés közbeni zsugorodást.



8. ábra: A tömeg változása az utónyomás idő és nyomás függvényében

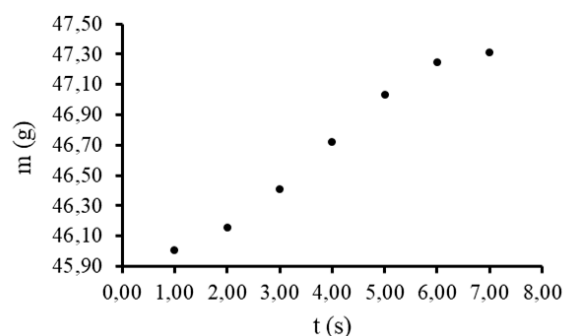
A 9. ábrán láthatjuk, hogy négy másodperc utónyomás idő alkalmazásakor az utónyomás nagysága hogyan befolyásolja a fröccsöntött termék tömegét. A mérési eredmények egyértelmű emelkedő trendet mutatnak, a nyomás növelésével a mintadarab tömege folyamatosan nő. Mivel 300 bar nyomáson a terméken egyre nagyobb a sorja, ezért 250 bar utónyomás alkalmazása elegendő.

Az utónyomás idő vizsgálatának jelentősége azért fontos, hogy meghatározzuk segítségével a lepecsételődési pontot, ugyanis ez minél később következik be annál tovább érvényesíthetjük az utónyomás hatását, aminek zsugorodás csökkentő szerepe van. Lepecsételődés után a műanyag ömledék megszilárdul, így már nem tudunk több anyagot a szerszámba juttatni, nem nő tovább a termék tömege.



9. ábra: A fröccsöntött autóalkatrész tömegének változása különböző utónyomásoknál 4 s utónyomás idővel

Az utónyomás idő változtatásakor az utónyomást 250 bar-ra állítottuk. A 10. ábrán látszik, hogy 7 s után a mérési pontjainkra illeszthető görbe ellaposodik, telítésbe megy át. Ez azt jelzi, hogy a beömlőnyílás (gát) megfagyott, így további anyag már nem tud bejutni a szerszámba.



10. ábra: Az utónyomás idő hatása a mért tömegre 250 bar utónyomást alkalmazva

3.2. Termékminőség ellenőrzés, hibaanalízis az autóalkatrészen

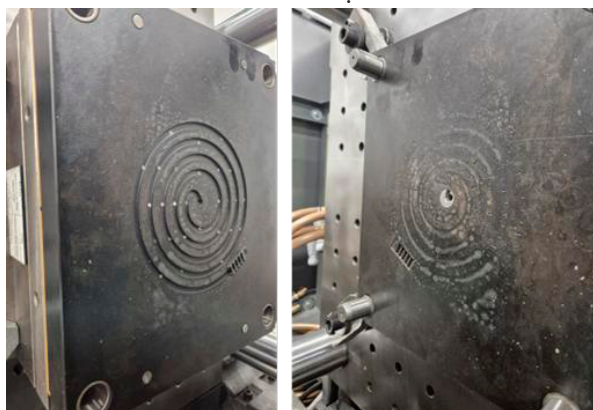
Cél: A gyakori fröccsöntési hibák (összecsapás, zsugorodás, vetemedés, beégés, beszívódás) azonosítása és okainak feltárása.

A jelenleg rendelkezésre álló autóalkatrész szerszám alkalmas bizonyos fröccsöntési hibák analizálására, azok szándékos generálásával. A mechanikai igénybevételnek való megfelelés mellett sok esetben nagyon fontos a termék esztétikája, felületi megjelenése, ezeknek a hibáknak a feltárása és az okok felderítése, hogy a hiba mihamarabb megszüntethető legyen. Ezek a hibák adódhatnak az alapanyagból, a technológiából, a szerszám kialakításból. A fröccsöntött darabok elkészítése után a hallgatók feladata a termékminőség ellenőrzése, hibaanalízis. Fröccsöntés után a tanulók különféle fröccsöntési hibákat vizsgálhatnak, például: hiányos termék, sorja képződés, diesel hatás, összecsapási vonalak, beszívódás, zsugorodás, vetemedés.

3.3. A műanyagok folyási tulajdonságainak tanulmányozása spirál szerszámban

Cél: A különböző műanyag alapanyagok reológiai tulajdonságainak jellemzése, az anyagminőség összehasonlítása.

A műanyagok viszkozitásának mérését általában folyásindex mérővel (MFI) végzik. A hallgatók a gyakorlat keretein belül a műanyag ömledék folyásindex mérése mellett az ömledék áramlását spirál szerszámba történő fröccsöntéssel jellemezhetik, mérik a megdermedésig megtett távolságot. A rendelkezésünkre álló, az olvadék folyási hosszának meghatározására alkalmas spirál szerszám képe látható a 11. ábrán.



11. ábra: A spirál szerszám bélyeg és csésze oldala

A spirál folyási teszt a műanyagiparban használt vizsgálati módszer, ahol az ömledék spirál alakú pályán való áramlási hosszát mérik. A spirál az egyik leghasznosabb diagnosztikai eszköz a fröccsöntésben a folyási tulajdonságok vizsgálatára. Megmutatja, hogy egy adott műanyag mennyire jól folyik és hogyan tölti ki a szerszámműreget. Ezt a típusú szerszámot, kifejezetten oktatási és anyagvizsgálati célokra használják amivel a műanyag ömledék áramlási úthosszát (folyóképességét) mérik adott nyomás és hőmérséklet mellett [5]. Kiválóan alkalmas a különböző alapanyagok (pl. PP vs. PA6) feldolgozhatósági különbségeinek tanulmányozására. A spirál méretei, hossza, átmérője befolyásolják, azt hogy milyen lesz a kitöltés, amiből az olvadék folyóképességére következtethetünk. A különböző fröccsöntési paraméterek, amelyek hatással vannak a polimer viszkozítására, mint pl. anyaghőmérséklet, fröccsnyomás, szerszámhőmérséklet hatása is tanulmányozható egy ilyen szerszámban vagy jellemezni tudjuk az alapanyag minőségét.



12. ábra: Spirál folyási PP próbatestek

A 12. ábrán a jobb oldali képen a fekete PP próbatesten láthatjuk, meddig jutott el az anyag a spirálban (mm-ben), mielőtt a hűlés miatt megdermedt volna. Míg az ábra bal oldalán jól látható a fröccsöntött spirál próbatest a főcsatornával együtt, ezen is azonosítható a dermedési pont.

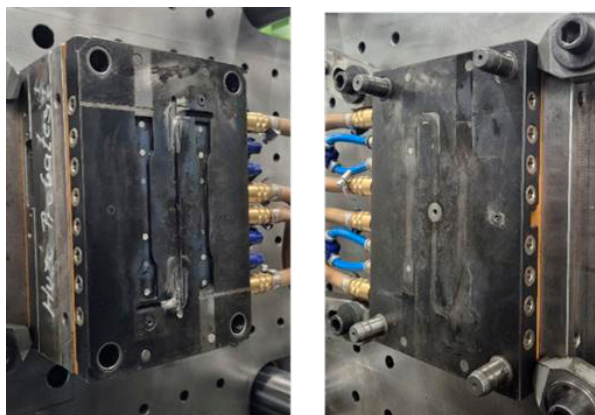
MFI = 13 g/min				
210 °C	230 °C	250 °C	270 °C	
220 mm	290 mm	320 mm	380 mm	

MFI = 30 g/min				
210 °C	230 °C	250 °C	270 °C	
290 mm	320 mm	380 mm	420 mm	

13. ábra: A hőmérséklet emelésének hatása a fröccsöntött spirál hossza két különböző folyásindexű polipropilén alapanyag esetén

Az újrahasznosított anyagok folyási tulajdonságai gyakran mutatnak ingadozást. A hallgatók az spirál segítségével mérhetik, mennyiben tér el egy gyári alapanyag és például egy 30%-ban újrahasznosított keverék reológiája, és hogyan kell a gép paramétereit (pl. utónyomás profilt) módosítani ahhoz, hogy a termék minősége (és így a karbonlábnyoma is) optimális maradjon. Két különböző folyásindexű (MFI = 13 és 30 g/min) polipropilén alapanyagból készítettünk spirál próbadarabokat négy különböző feldolgozási hőmérsékletet alkalmazva (13. ábra). Az első anyag (MFI = 13 g/min) nehezebben folyik azonos körülmények között. Mindkét anyagnál egyértelműen látszik (13. ábra), hogy a hőmérséklet emelésével a spirál hossza növekszik. A polimer láncok a magasabb hőmérsékleten könnyebben elmozdulnak egymáson, a viszkozitás csökken, így az ömledék messzebbre jut a szerszámban, mielőtt megdermedne. Látható, hogy a magasabb MFI lehetővé teszi az alacsonyabb hőmérsékleten történő feldolgozást vagy a bonyolultabb formák könnyebb kitöltését.

A 14. ábrán látható fröccsöntő szerszám szabványos szakító vizsgálatokhoz alkalmas próbatestek gyártására szolgál. Ez egy kétfészkés szerszám, ami azt jelenti, hogy egyetlen befecskendezési ciklusban egyszerre két darab szakító próbatestet állít elő.



14. ábra: Szakítópróbatest szerszám bélyeg és csésze oldala

A 15. ábrán pedig egy fröccsöntött polipropilén szakító próbatest képe látható felülnézetből, amin azonosítható a beömlő- és csatornarendszer. A főcsatorna ahol a gép a forró, képlékeny műanyagot befecskendezte. Az osztócsatornák: a vízszintes ágak, amelyek elosztják az anyagot a két fészék felé. A gát, az a szűk pont, ahol a csatorna és a próbatest találkozik, amit a gyártás után le kell választani (le kell törni vagy vágni) a kész termékről. Az így előállított próbatestek mechanikai tulajdonságok vizsgálatára alkalmasak.



15. ábra: Fröccsöntött szakító próbatest

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott elektromos fröccsöntő gép és a rendelkezésre álló fröccsöntő szerszámok alkalmazásával a feladatok elvégzésével a hallgatók betekintést nyerhetnek a fröccsöntés technológiájába, megismerhetik a gépkezelést, az optimális fröccsöntés beállításait, a megjelenő hibákat és azok okait valamint elkerülési lehetőségeit. A spirál szerszámmal a műanyag alapanyagok reológiai tulajdonságai tanulmányozhatók, a szakító próbatest szerszám pedig a polimerek mechanikai tulajdonságainak vizsgálatához szükséges próbatestek gyártására ad lehetőséget.

5. SUMMARY

Utilization of presented electric injection molding machine and the available molds, students can gain insight into injection molding technology, machine operation, process optimization, as well as the machine operation, optimal process settings, common defects, their causes, and ways how to prevent them. The spiral mold allows the characterization of the rheological properties of plastic raw materials, whereas the tensile specimen mold enables the production of specimens required for testing the mechanical properties of polymers.

6. IRODALOM

- [1] L. Macskási, G. Czél, C. Érseki, G. Falk, L. Molnár, Műanyagok fröccsöntésének elmélete és gyakorlata, Sunplant Kft., Miskolc, 2024.
- [2] A. Szűcs, F. Ronkay, R. Boros, J. Györgyi, Fröccsöntés Mesterfokon, Cavity Eye Hungária Kft, Kecskemét, 2025.
- [3] T. Czvikovszky, J. Gaál, P. Nagy, A polimertechnika alapjai, Műegyetemi kiadó, 2007.
- [4] Y. Wang, C. Lee, Design and Optimization of Conformal Cooling Channels for Increasing Cooling Efficiency in Injection Molding, Appl. Sci. 13 (2023) 7437. <https://doi.org/10.3390/app13137437>.
- [5] D. Chalicheemalapalli Jayasankar, T. Tröster, T. Marten, Optimizing Injection Molding Tool Design with Additive Manufacturing: A Focus on Thermal Performance and Process Efficiency, Materials 18 (2025) 571. <https://doi.org/10.3390/ma18030571>.