



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

ANYAGVIZSGÁLATI ÉS MINŐSÉGFELÜGYELETI MÓDSZEREK KIDOLGOZÁSA
SENZOROSZOTT FRÖCCSÖNTŐ SZERSZÁMMAL

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZET

HORVÁTH SZABOLCS
OKLEVELES ANYAGMÉRNÖK

TÉMAVEZETŐ:
DR. KOVÁCS JÓZSEF GÁBOR
EGYETEMI DOCENS

BUDAPEST
2025

A doktori disszertáció bírálata és a védésről készült jegyzőkönyv a
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Karának Dékáni Hivatalában megtekinthető

1. Bevezetés

A fröccsöntés napjainkban a műanyagfeldolgozás egyik leghatékonyabb eljárása. Dinamikus fejlődése annak köszönhető, hogy nagy termelékenységgel bonyolult geometriájú termékek gyártására alkalmas, szakaszos és akár hulladékmentes technológia. A műanyagok térnyerése igen gyors ütemben zajlik, köszönhetően az anyagtudomány gyors fejlődésének.

Az egyre növekvő mennyiségi és minőségi elvárásoknak megfelelni nem egyszerű feladat. A fröccsöntött termékek gyártása során mindig kritikus tényező a termék falvastagsága. Az ipari trendek alapján egyre több alkatrészt helyettesítenek műanyagokkal, illetve egyre nagyobb teret hódít a mikrofröccsöntés is. A vékony falú, jellemzően 1 mm vagy alatti vastagságú termékek gyártása során bármely fröccsöntési paraméter változása hatványozottan kihat a termékek tulajdonságaira. A vékony fal gyors fröccssebességet, nagy hőmérsékletet és nyomásokat igényel. A kitöltéshez szükséges nyomás a falvastagság harmadik hatványával van fordított arányosságban. Ha az anyag fizikai állapota kis mértékben is változik, az jelentős hatással lesz a termék szerkezetére és minőségére. Fontos megjegyezni, hogy a legtöbb széles körben alkalmazott anyagvizsgálati módszer és szabvány kifejlesztése óta a fröccsöntött alkatrészek jellemzői jelentősen megváltoztak.

Az informatikai és gépészeti lehetőségek gyors fejlődésének köszönhetően már számos lehetőség áll rendelkezésre arra, hogy a gyártásunkat kézben tartsuk és adatot gyűjtsünk a változásokról. A fröccsöntő szerszám formaüregében lezajló folyamatok csak részben függenek össze a fröccsöntőgép felügyeleti rendszere által mérhető értékekkel, mivel a mérés helye távol van a formaüregtől. További hátrány, hogy többfészkés szerszámok esetén az egyes fészkek közötti eltérésekről, tehát a szerszámon belüli folyamatokról a fröccsöntőgép nem képes visszacsatolást adni. Gyakran hőmérséklet- és nyomásmérő szenzorokat építenek be a fröccsöntő szerszámba, amelyek további információt szolgáltatnak. A szériagyártás során fontos, hogy ciklusról ciklusra a termékminőség állandó és mérhető legyen. A bonyolult geometriájú termékek gyártásakor az alapanyag jellemzőinek minimális változása is nem megfelelő terméket eredményezhet. A fröccsöntő szerszámokban gyakran találhatunk részben vagy teljesen hidegsatornás elosztórendszert, ahol a kialakítás befolyásolhatja az ömledék hőmérsékleti homogenitását. A hőmérséklet változása befolyásolja az anyag viszkozitását, amely jelentős hatással van a kitöltési folyamatra.

A szenzorok által mért adatok időbeni lefutása kapcsolatban van a termékek

minőségével, kialakuló szerkezetével, illetve az alapanyag és a fröccsöntési folyamat változásaival. A fészeknyomás mérés elterjedt technológia a precíziós termékek gyártása esetén, amely segítségével a gyártás jól nyomon követhető és egyszerűbben optimalizálható. A falvastagság csökkenésével a termék keresztmetszetében kialakuló héj-mag szerkezet aránya megváltozik, a szabadon áramló mag vastagsága lecsökken. A fröccsöntés technológiájából adódóan a formaüregben belül inhomogén termékszerkezet alakul ki, amely vékony falnál fokozottan jelentkezik. A viszkozitás és a nyírás kis mértékű változása is nagy hatással van a kitöltési folyamatra. A formaüregben mérhető nyomás és a termékjellemzők közötti kapcsolatok felállításával lehetőség nyílik a fröccsöntött termékek minőségfelügyeletének magasabb szintjére, amely további kutatásokat igénylő terület.

Az értekezésem célja, a fröccsöntő szerszámba épített nyomásmérő szenzorok alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata és a falvastagsággal változó mechanikai tulajdonságok vizsgálata. A jelenleg érvényben lévő próbatest szabványok a vékony falú termékek esetét csak korlátozottan vizsgálják. A szerszámban kialakult nyomás segítségével következtethetünk a viszkozitás, vagy éppen a fröccsöntött termék tömegének változására is. A szerszámgyártás során számos illesztési hiba és speciális mérési kialakítás használatára lehet szükség, amely nem kellően tanulmányozott, de befolyásolhatja a mérhető nyomást. A mérőcsapok elhelyezése, illesztése és alakja mind meghatározhatja a mérés pontosságát, illetve azt, hogy milyen jelenségek meglétét tudjuk detektálni a nyomásmérés technológiájával. A formaüregben mérhető nyomás felhasználása a termék minőségi jellemzőinek felügyeletére jelentősen elősegítheti a gyártásfelügyeleti és minőségbiztosítási folyamatok működését.

2. Az irodalom kritikai elemzése, célok pontosítása

A fröccsöntési folyamat során az ömledék bonyolult termodinamikai folyamaton megy keresztül, ahol számos jelenség befolyásolja a kialakult termék minőségét. A cél, az állandó termékminőség biztosítása, amelyhez mérés szükséges. Az ellenőrzésen túl a beavatkozás és a folyamatba visszacsatolás nyújt kézzel fogható előnyt az ipari alkalmazásokban.

Az ipari trendek átalakulása és az elektromobilitás térnyerése a fröccsöntési ipart is jelentősen átalakította. Az autó- és elektronikaipari polimer alkatrészek egyre növekvő elvárásoknak vannak kitéve, ráadásul egyre több alkatrész készül fröccsöntéssel. A termékek tagoltsága és komplexitása sokszor nem a fröccsöntött termékek tervezési alapelveit követi.

Ennek eredményeképp a falvastagság jelentősen változhat egy adott termék különböző pontjain. A mikrofröccsöntés alkalmazásának terjedése, és az egyre csökkenő termék falvastagságok szükségessé teszik, hogy jobban megismerjük a fröccsöntött termékek falvastagság függő viselkedését. Jelenleg az irodalomban találhatóak ellentmondások a falvastagság függő mechanikai tulajdonságokkal kapcsolatban és az érvényben lévő anyagvizsgálati szabványok nem jellemzik a vékonyfalú termékek valós előállítási körülményeit.

A termékminőség fészkenkénti felügyeletének egyik hatékony módja nyomásmérő szenzorok alkalmazása, amelyek a fröccsöntő géphez képest jobb visszacsatolást szolgáltatnak a termékminőséggel kapcsolatban, mivel a termékhez sokkal közelebb mérnek. A fröccsöntő szerszámokban elsődlegesen nyomás- és hőmérséklet mérő szenzorokat alkalmaznak elterjedten. A szenzorok segítségével a formaüregben lejátszódó folyamatok állandóssága ellenőrizhető és a fröccsöntési folyamat egyszerűbben optimalizálható. A termék kitöltöttsége, zsugorodása, és a végső méretek között számos esetben jó korreláció áll fenn a ciklusban mérhető belső nyomással. Ezen felül további információt kaphatunk a beállított fröccsöntési technológia változásáról a nyomásgörbéket elemezve. Számos kutatás foglalkozik a nyomásmérő szenzorok mért értékei és a termék végső tulajdonságai közötti kapcsolat felállításával, azonban a nyomásmérés megoldásai és az arra ható külső tényezők hatása nem kellően kutatott terület. A nyomásmérő szenzorok elhelyezése, azok beépítése és a méréshez használt közvetítő elem hatása további tanulmányozásra szorul. A szenzorok beépítési módszere, a mérőcsapok átmérője, pozíciója mind befolyásolhatja a mérhető nyomást a formaüregben.

A fröccsöntés során a szenzorok alkalmazhatósága egy folyamatosan fejlődő terület és számos kutatás vizsgálta a fröccsöntött termék minősége és a folyamatban mérhető értékek közötti kapcsolatot. A fröccsöntés során az egyik legfontosabb anyagjellemző a viszkozitás. Az alapanyag viszkozitása meghatározza a folyamat stabilitását és az ismételhetőségét, azonban a mérése nem egyszerű feladat és általában speciális eszközöket igényel. Sok esetben az alapanyag tulajdonságai gyártásonként ingadozhatnak. Az ipari gyakorlatban a *melt flow index* (MFI) mérés terjedt el az alapanyagok folyóképességének vizsgálatára, azonban egy gyártás közben használható módszer sokkal előnyösebb a változások detektálására. Készültek olyan megoldások, amelyek fröccsöntőgép segítségével lehetővé tették a viszkozitás mérését, azonban ezek közös jellemzője a külső fűtés és bonyolult használat.

A fészekbe épített nyomásmérő szenzorok mért értékeit számos kutatásban

korreláltatták a belső nyomásból származtatott nyomásintegrállal. A nyomásintegrál jó kapcsolatban áll a termék tömegével, amely jól jellemzi a minőséget bizonyos körülmények között. A nyomásintegrál és a termék tömegének kapcsolatát sok esetben egyértelmű összefüggésbe hozták egymással.

Az irodalom áttekintését követően célul tűztem ki különböző falvastagságú termékek mechanikai tulajdonságainak vizsgálatát, illetve a mérési elrendezés hatását a mérhető nyomásra. A falvastagság változásával a húzó mechanikai tulajdonságok jelentősen változhatnak, ezért fontos, hogy ismerjük a végső termék geometriának megfelelő viselkedést. A nyomásmérő szenzorokat általánosan alkalmazzák a minőség felügyeletére, azonban a formaüreg különböző pontjain elhelyezett mérési pontoknál nyerhető információk nem kellően kutatottak. Ezért értekezésemben vizsgálom a termék különböző pontjain, és oldalain a mérhető belső nyomást. Ezen felül az egyes mérőcsapok különböző konfigurációinak hatását is a formaüregben mérhető nyomásra. A nyomásmérő szenzorok alkalmazhatóságát a viszkozitás méréséhez a formaüregben és a terméktömeg jobb meghatározása érdekében fontos irány a kutatásaimnak. A viszkozitás mérése egy hidegcsatornás szerszámban egyszerű megoldást kínálhat az alapanyagok tesztelésére és az eltérések azonosítására. A tömegmérés egy általánosan bevett gyakorlat a fröccsöntött termékek alapvető minőségi és folyamatképeségi hibáinak detektálására, amelyet célom a belső nyomásméréssel gyártás közben vizsgálni és a belső nyomás, illetve a terméktömeg között egy jobb korrelációt meghatározni

3. Felhasznált alapanyagok, gépek, vizsgálati módszerek

A kísérletekhez kétféle anyagot használtam fel. Az első egy akrilnitril-butadién-sztirol (ABS, Terluran GP 35, Styrolution Group GmbH), folyási indexe $34 \text{ cm}^3/10 \text{ perc}$ *melt volume flow rate* - MVR, $220 \text{ °C} / 10 \text{ kg}$). Az alapanyag feldolgozás előtt szárításra került: 80 °C hőmérsékleten 3 órán keresztül.

Felhasználtam egy Polipropilént (PP, Mol Tipplen H145F), amely folyási indexe $29 \text{ g}/10 \text{ perc}$ (MFI, $230 \text{ °C} / 2,16 \text{ kg}$). Az anyagot a felületi nedvesség eltávolítása után egy rövid, 30 perces 60 °C -os szárítást követően dolgoztam fel.

3.1. Fröccsöntőgépek és perifériák

A fröccsöntési próbákhoz egy Engel TL-170 fröccsöntőgépet használtam, amely teljesen elektromos, 50 t záróerejű 25 mm átmérőjű csigával rendelkező gép volt. A vezérlést

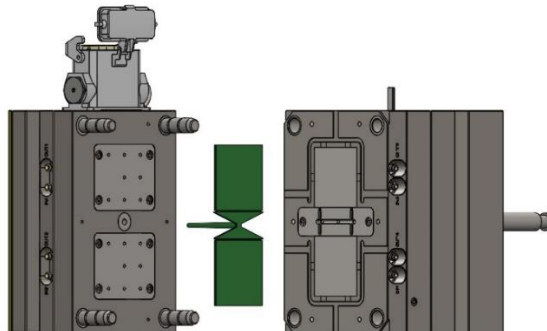
tekintve a fröccsöntőgép alkalmas külső jel szerinti átkapcsolás használatához (szerszámnyomás mérő rendszer jele alapján átkapcsolás fröccsöntésről utónyomásra).

A temperáláshoz két Wittmann-C90 típusú temperáló készüléket használtam, melyek segítségével a víz hőmérsékletét 30 és 90 °C között tudtam beállítani. A szárításhoz egy Moretto X-Dry90 eszközt használtam fel, amely egy kis méretű, meleglevegős szárítóberendezés. A szárításhoz használt hőmérsékletet egy J-típusú kézi hőmérővel ellenőriztem. Az alapanyag nedvességtartalmát a szárítást követően egy Mettler Toledo HX204 nedvességmérővel ellenőriztem.

3.2. Fröccsöntő szerszámok

VV-lapka szerszám (Változtatható Vastagságú lapka próbatest)

A szerszám két fészkes, hidegsatornás és a formaüreg egy filmgáton keresztül töltődik ki, melynek vastagsága 2 mm, szélessége azonos a termék méretével (80 mm). A falvastagság értéke fokozatmentesen állítható egy ékpályás mechanizmussal 0,8 és 4,2 mm között (1. ábra). A falvastagság beállítása a filmgát vastagságát nem befolyásolja.



1. ábra. VV-Lapka próbatest álló oldal (bal), mozgó szerszámoldal (jobb)

A belső nyomás méréséhez a Cavity Eye által gyártott indirekt nyomásmérő szenzorokat használtam fel. A szerszámba összesen 16 szenzor került beépítésre. A mérőcsap átmérője 3 mm.

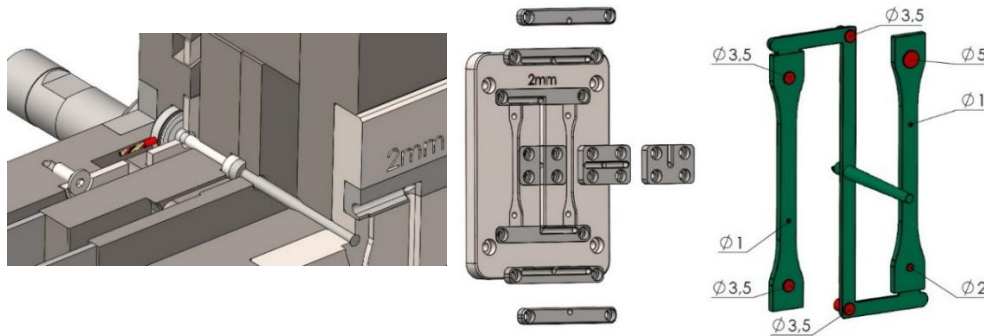
Szakító próbatest szerszám – 1A

A szerszám két fészkes, geometriai kialakítása megfelel az 1A típusú fröccsöntött próbatest szabványnak (ISO 527-1:2019). A szerszámba 4 nyomásmérő szenzor kerül beépítésre az álló oldali formalapba. A mérési pontok a befogott rész közepén helyezkedtek el. A szerszám érdekessége, hogy a falvastagsága 2 és 4 mm között állítható a mozgó oldali formalap cseréjével.

Szakító próbatest szerszám – 1BA

A próbatest szerszám sztenderd 1BA szabványnak megfelelő (ISO 527-1:2019). A

szerszámhoz készítettem 4 különböző falvastagságú betétet, melynek a magassága eltérő, így a fröccsöntött próbatest falvastagsága változtatható volt 0.8, 1, 1.5 és 2 mm tartományban (2. ábra).

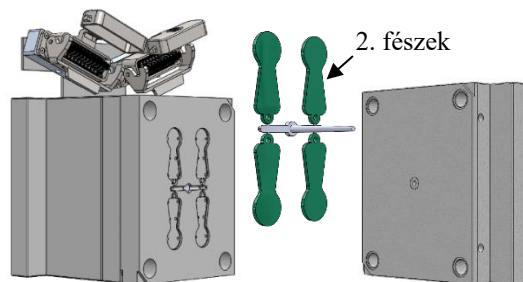


2. ábra. Az 1BA próbatest szerszám mozgó oldali szenzorbeépítési elrendezése (bal), a cserélhető betét a rendelkezésre álló gátakkal (közép) és az álló oldali mérőcsap méretek a próbatesten jelölve (jobb)

A szerszámba összesen 10 szenzort helyeztem el, az álló oldalon kialakításra került egy kis átmérőjű (1 mm) mérőcsappal ellátott mérési pozíció a folyási út $\frac{3}{4}$ részén.

Kulcstartó szerszám

A szerszám 4 fészkes, hidegcsatornás és 1 mm átmérőjű tűgáttal rendelkezik (3. ábra). A szerszámban 6 kilökö található minden termékhez, ezek közül 4 alá került szenzor beépítésre. A termék falvastagsága minden fészekben 2,6 mm, és a fészkek közötti szórás elhanyagolható mind kitöltésben, és tömegben. A folyási úthossz a gáttól a formaüreg végéig közel 61,5 mm. A mérésekhez a jobb felső (2.) fészkek eredményeit használtam fel.



3. ábra. A 4 fészkes „kulcstartó” szerszám és a nyomásmérési eredmények kiértékeléséhez 2. fészkek

A szerszámba 16 darab 1 kN terhelhetőségű nyomásmérő szenzor került beépítésre, tehát minden fészkekhez 4-4 szenzor tartozik. A párban lévő nyomásmérési pontok (gát, folyási út vége) között eltérést nem tapasztaltam, a szerszám töltése egyenletes a fészken belül is.

4. Kutatómunka összefoglalása

Falvastagságfüggő mechanikai tulajdonságok vizsgálata

A fröccsöntött termékek falvastagsága mentén kialakuló héj-mag réteg arány jelentőségének bemutatására szakító próbatest szerszámokat (1BA, 1A) használtam fel. A kísérletsorozatban próbatesteket fröccsöntöttem, majd ezt követően elvégeztem a mechanikai tulajdonságok (szakítás) vizsgálatát. A próbatest szerszámokkal végzett mérések alapján kijelenthető, hogy a próbatest falvastagságának megváltoztatása hatással van a húzószilárdságra és a rugalmassági moduluszra. Ennek oka a szilárd – áramló réteg arányának megváltozása a falvastagság lecsökkenésével, amelyet az átlagos orientáció mérésével igazoltam (kontrakció hő hatására). Amennyiben a falvastagságot lecsökkentjük az 1BA próbatest szabvány által maximálisan használható 2 mm értékről 1 mm értékre, akkor a főbb mechanikai tulajdonságok akár 18 %-ot is változhatnak. Hasonló jelenségeket már publikáltak korábban is, azonban a fröccsöntési sebesség hatását nem vizsgálták a hagyományos termékgyártás sebességtartományában. Méréseim alapján az 1 mm falvastagság alkalmazásával a fröccsöntési sebesség is jelentősen befolyásolja a mechanikai tulajdonságokat, jelen esetben a lassú fröccsöntési sebesség növeli az elérhető szakadási tulajdonságokat. A szabvány alapján elkészített próbatestek mechanikai tulajdonságai jelentősen eltérhetnek a valós viselkedéstől, és akár függhetnek a fröccsöntési technológiától is.

A belső nyomás vizsgálata a falvastagság függvényében

A kísérlethez az 1BA változtatható falvastagságú szerszámot és a PP H145F anyagot használtam fel. A fröccsöntési próbák során a mérésekhez három jellemzőt azonosítottam, amely a gáthoz közeli belső nyomásmérő szenzorok által mért nyomásgörbéből származtattam, és az álló és mozgó oldal között kapott eredmények összehasonlítására használtam: kitöltési nyomás [bar], csúcsnyomás [bar], nyomásintegrál [bar*s]. Az álló és mozgó oldal közötti eredményeket összehasonlítva elmondható, hogy 2 mm falvastagság alkalmazásánál a melegebb szerszámoldalon nagyobb kitöltési- és csúcsnyomást mérhetünk. Az álló oldali hőmérséklet növelése átlagosan 8%-os mérhető különbséget eredményezett a kitöltési- és csúcsnyomás különbségekben az álló oldalon a nagyobbat mérve. Az oldalanként eltérő szerszámhőmérséklet kialakulásának igazolására a termék vetemedését mértem az álló és mozgó oldali szerszámhőmérséklet függvényében. A termékek vetemedésének iránya megegyezik a mérhető oldalankénti nyomáskülönbségek és hőmérsékletkülönbségek értékeivel, tehát a melegebb oldal felé deformálódik a próbatest. A vetemedés mérésével igazoltam, hogy szerszámoldalként kialakult a hőmérséklet különbség, amely mérhető nyomáskülönbséget okoz az álló és a mozgó oldal között, kitöltési- és csúcsnyomásban, a 2 mm falvastagságú 1BA próbatest termékeknél.

A mérési elrendezés hatása a mérhető belső nyomásértékekre

A mérésekhez az IBA szakító próbatest szerszámot és PP H145F anyagot használtam fel. A vizsgálat célja, hogy a különböző alakú és illesztési hibával rendelkező mérőcsapok hatását vizsgáljam a mérhető nyomásra, a fröccsöntési sebesség és a falvastagság függvényében. A kilökő átmérőjének függvényében az álló és mozgó oldalon mért nyomások alapján minél kisebb a csap átmérője és a fröccsöntési sebesség, annál nagyobb az eltérés a nyomásban. Tehát a rövidebb mérőcsapokkal lehet kisebb nyomást mérni. A mért eredmények alapján az összefüggés exponenciális mind a kilökő átmérő, mind a fröccsöntési sebesség függvényében az álló és a mozgó oldalon mérhető nyomáscsúcs viszonyára. A kapott összefüggés alapján az átlagos négyzetes hiba kicsi ($R^2=0,987$). Nagy fröccsöntési sebességek használatával a hatás közel elhanyagolható még a kisebb mérőcsapoknál is.

Viszkozitás mérési módszer nem fűtött szerszámban

A méréseket több falvastagság, anyag, anyaghőmérséklet és szerszámhőmérséklet mellett végeztem el az Engel fröccsöntő gépen a VV lapka szerszámmal. A formaüregben a viszkozitást a nyomásmérő szenzorok mért értékei alapján határoztam meg és a szükséges reológiai korrekciók elvégzésre kerültek. Mivel a szerszám nem fűtött, az áramlás során kialakult a héj-mag réteg, amely extra nyomást eredményezett a formaüregben, befolyásolva a kapott viszkozitás értékét. Az eredményeket a kapillár reométerrel meghatározott mérésekkel hasonlítottam össze. A PP és az ABS anyag felhasználásával a megfelelő reológiai korrekciók elvégzését követően a formaüregben mért nyomásból a viszkozitás értéke 10% alatti hibával meghatározható. A kialakult eltérések oka a héj-mag réteg kialakulása (folyamatos hűtés), illetve a nyírásból eredő hőfejlődés. A mért viszkozitás átlagos hibája a falvastagság (4 mm), illetve a szerszámhőmérséklet (80°C) növelésével csökkent mindkét alapanyag felhasználásával.

Módszer fejlesztés a termékek tömegének felügyeletére

A kulcstartó szerszámmal végeztem el a méréseket különböző utónyomások és utónyomási idők mellett ABS és PP anyagok felhasználásával. A belső nyomásmérő szenzorok által mérhető nyomásgörbe alatti terület, továbbiakban nyomásintegrál jó egyezést mutat a termék tömegével, amennyiben az utónyomást nem változtatjuk. Azonban, ha az utónyomás értéke változik, akkor ez az összefüggés is változik. Tehát egy adott nyomásintegrálhoz több terméktömeg is tartozhat az utónyomás függvényében, illetve ugyanez fordítva is igaz. A mérési eredmények alapján meghatároztam egy módszert a termék tömegének leírására a nyomásintegrál, a formaüregben belüli csúcsnyomás és az

anyagra jellemző pvT eredmények felhasználásával, amely figyelembe veszi az utónyomás hatását.

A meghatározott módszer segítségével a valós és a mért terméktömeg közötti hiba jelentősen csökkent az irodalomban található illesztéshez képest. Az általunk meghatározott módszer R^2 értéke 0,99 volt, míg az irodalomban leírt lineáris illesztés R^2 értéke 0,77. Az eredmények alapján az általunk használt illesztési módszerrel a legnagyobb hiba a mért és a számolt terméktömeg között 0,96% alatt volt 200-600 bar utónyomási tartományban. Kijelenthető, hogy a nyomásintegrál és a szerszámban mérhető nyomáscsúcs alapján a termék tömege pontosabban meghatározható, mint lineáris illesztéssel, amennyiben az összefüggést meghatároztuk legalább 3 különböző nyomás és több utónyomási idő esetén, ahol elérjük a gátfagyást. Az összefüggés felhasználásával a várható terméktömeg széles tartományban számolhatóvá, ezáltal on-line monitorozhatóvá válik.

5. Összefoglalás

A fröccsöntött termékek piaca folyamatosan növekedő minőségi és költségmegtakarítási igényekkel néz szembe. Értekezésemben, a fröccsöntött termékek falvastagságfüggő tulajdonságainak fontosságát mutattam be, illetve a szerszámba épített nyomásmérő szenzorok alkalmazhatóságát vizsgáltam. Az irodalomkutatásban bemutattam a fröccsöntést, mint gyártási technológia alapjait, majd a szerszámokon belül az áramlás során kialakuló, nyírási hőfejlődést. A továbbiakban a polimer ömledék áramlása során kialakult szerkezet bemutatásával foglalkoztam. Az irodalomban eltérések alakultak ki a héjmag réteg arányának változásáról a falvastagság függvényében, azonban a végtermékek mechanikai tulajdonságainak változása a falvastagság függvényében nem kellően kutatott terület. A jelenleg érvényben lévő anyagvizsgálati szabványok nem jellemzik kellő alapossággal a vékonyfalú termékek jellemzőit.

A fröccsöntő szerszám formaüregében, a polimer ömledékek áramlása során az egyik legfontosabb paraméter a viszkozitás. A meghatározásához általában speciális eszközökre van szükség, illetve a mért eredmények korrekciójára, hogy megkapjuk a valós viszkozitást. A fröccsöntő szerszám fészében mérhető nyomás számos információt szolgáltat a fröccsöntési folyamatról, alapanyag jellemzőiről és a végső termékminőségről. A viszkozitás felügyeletére a fröccsöntési ciklus során a nyomásmérő szenzorok megfelelően használhatóak, de csak akkor, ha a viszkozításra ható egyéb körülmények változatlanok, vagy ismertek. Számos publikáció létezik a nyomásmérő szenzorok alkalmazásáról, azonban

a nyomásmérési elrendezésből eredő hibákról, illetve a méréshez használt mérőcsapok alakját és pozícióját nem kutatták a mérhető értékekre. Az iparban használt fröccsöntő szerszámoknál gyakran előfordul, hogy egy belső nyomás méréshez használt csapnak a pozíciója a fészek síkjához képest nem megfelelő, illetve a mérőfelület síkja nem merőleges az ömledék áramlásának irányára. Sok kutatási munkában használtak nyomásmérő szenzorokat fűtött szerszámokban a viszkozitás meghatározására, azonban a hagyományos fröccsöntő szerszámokban ez a téma nem kutatott. Az on-line viszkozitásmérés egy nagyon hasznos és egyszerű módja a fröccsöntési folyamat monitorozásának, illetve a különböző alapanyagok közötti eltérések összehasonítására. A viszkozitás mellett az egyik fontos jellemzők a termék tömege a minőség biztosítás szempontjából. Számos publikáció vizsgálta a formaüregben mért nyomásból származtatott nyomásintegrál és a terméktömeg kapcsolatát, azonban a csúcnyomás hatását nem vették figyelembe.

A disszertációm eredményeként javaslatot tettem a vékony falú termékek húzó igénybevételét leíró szabvány módosítására, mivel jelenleg a szabvány nem veszi figyelembe, hogy a lecsökkent falvastagság jelentősen jobb szakítószilárdságot is eredményezhet. Továbbá a jelenleg érvényben lévő próbatest fröccsöntését leíró szabvány nem specifikálja a fröccsöntési sebességet csigaátmérőtől függetlenül, amely eredményeképp a mechanikai tulajdonságok szintén jelentősen változhatnak.

A változtatható falvastagságú IBA szerszámokban az álló és a mozgó oldalon is elhelyezésre kerültek nyomásmérő szenzorok és mérőcsapok több konfigurációban. Az álló és a mozgó oldalon elhelyezett nyomásmérő szenzorok mért értékein kimutatható a lokális hőmérséklet hatása a ciklus során. A szerszám egyik oldali hőmérsékletét megváltoztatva azonosítható a megváltozott lokális viszkozitás, hűtési sebesség. Továbbá azonos oldali hőmérsékletek esetén azonosítható volt a magasabb hőmérsékletű ömledék az álló oldalon, amely a gát pozíciójának és a nyírási hőfejlődésnek volt köszönhető.

A formaüregben mérhető belső nyomás hatását a méréshez használt csapok hosszának, illetve alakjának függvényében vizsgáltam. Ennek eredményeképp kijelenthető, hogy a csapok pozíció és alakhibája befolyásolja a ciklusban mérető nyomást. Ez a hatás annál jobban érvényesül, minél kisebb a csap átmérője és a fröccsöntési sebesség. Továbbá a mérhető nyomás jelentősen változik, ha a méréshez használt csap alakja megváltozik (ferde csapok), és csak korlátozottan használható folyamatfelügyeletre és optimalásra. Az eredményeknek a megfelelő kilökök és a szerszámmegmunkálási pontosság megválasztásában van szerepe.

Az ipari gyakorlatban a felhasznált alapanyagok folyóképességének vizsgálatára

MFI eszközt használnak az egyszerű, gyors és gazdaságos elveket figyelembe véve. Az anyagok valós viszkozitásának meghatározására számos gyártó kínál erre a célra fejlesztett reométerekeket, melyek használata egy külön labor fenntartását igénylik. Kutatásomban a szerszámba épített nyomásmérő szenzorokat felhasználva, két különböző anyag esetén is 10% alatti hibával meghatároztam a viszkozitást a fröccsöntés valós körülményei mellett. Hidegcsatornás szerszám használatával a falvastagság 4 mm-re növelésével és a megfelelő szerszámhőmérséklet használatával a viszkozitás ipari körülmények között megfelelően mérhető.

A nyomásmérő szenzorok mért értékeinek felhasználásával közvetlen információt kaphatunk a fröccsöntött termékek minőségéről. A ciklus során mért nyomásintegrál és a terméktömeg kapcsolatát sok publikációban vizsgálták, azonban a sokszor megállapított egyértelmű kapcsolat a nyomásintegrál és a terméktömeg között nem valós. Ahhoz, hogy a nyomásintegrál értékéből meg tudjuk mondani a termék tömegét, szükséges figyelembe venni a nyomásmaximumot a formaüregben. A nyomásintegrál és a nyomáscsúcs együttes használatával a fröccsöntött termék tömege még a termék kidobása előtt becsülhető, amely új lehetőségeket nyit a folyamatfelügyeletben.

A doktori munkámban bemutatott eredmények jó alapként szolgálnak a falvastagságfüggő tulajdonságok hatékonyabb vizsgálatában. A nyomásmérő szenzorok beépítési elrendezésének és a használható mérőcsapok alak- és mérettulajdonságainak hatása a mérhető nyomásra elengedhetetlen a megfelelő alkalmazáshoz. A bemutatott nyomásmérésen alapuló mérések egy egyszerű módszert nyújtanak a viszkozitás és a terméktömeg kontrolljára elfogadható hiba mellett.

6. Tézisek

1. Tézis [1, 2]

Az MSZ EN ISO 527-2:2019 szabvány nem veszi figyelembe a falvastagság hatását a vékonyfalú fröccsöntött termékek (0,8-2 mm között) mechanikai tulajdonságainak jellemzése esetén. A fröccsöntött termékek falvastagságának csökkentésével a volumetrikus kitöltés végére kialakult szilárd réteg falvastagsághoz viszonyított keresztmetszete nagyobb, amely a mechanikai tulajdonságok falvastagság és fröccsöntési technológia függését eredményezi. Kimutattam, hogy a fröccsöntött próbatest szakítószilárdsága növekedhet a falvastagság és a fröccsöntési sebesség csökkenésével, mivel az erősen orientált kitöltés közbeni szilárd réteg aránya megnövekedik az adott keresztmetszetben. A próbatest (1BA) falvastagság csökkentése a tervezett termék jellemző falvastagságára, illetve a fröccsöntési sebesség gépfüggetlen definiálása (mm/s helyett cm^3/s mértékegységben) segít a végtermékre jellemző valós mechanikai tulajdonságok megismerésében és ezáltal a szabvány alkalmazhatóságának javításában.

Állításaimat ABS GP35 és PP HI45F anyagok felhasználásával, 1A és 1BA típusú szakító próbatestek fröccsöntésével és vizsgálatával bizonyítottam, 0,8; 1; 1,5; 2 és 4 mm falvastagság használatával.

2. Tézis [3]

A fröccsöntő szerszámban az eltérő álló- és mozgóoldali szerszámfal hőmérséklet és a formaiüregen belüli áramlási viszonyok okozta ömledékállapot hatása mérhető az adott szerszámoldali nyomásban, így a lokális nyomások alapján meghatározható a fröccsöntött termékek vetemedésének iránya.

Állításaimat PP HI45F anyag felhasználásával, 1BA típusú szakító próbatestek fröccsöntésével és vizsgálatával bizonyítottam, 2 mm falvastagság használatával, 30 és 90 °C szerszámtemperálási tartományban. A végtermék vetemedésének mérésével igazoltam az oldalanként kialakult eltérő hőmérsékletkülönbségek kialakulását.

3. Tézis [3-5]

A fröccsöntő szerszámban mérhető belső nyomás mérési pontatlansága exponenciálisan növekszik a fröccsöntési sebesség és a mérőcsap átmérőjének csökkenésével, ha a mérőcsap ömledékkel érintkező felülete a formaiüreg síkja alatt helyezkedik el.

Állításaimat különböző átmérőjű (1; 2; 3,5; 5 mm), különböző formaüreg síkhoz képesti pozícióban elhelyezett (+1; 0; -1;), illetve különböző alakú (homorú, domború, 30, 45° szöget bezárva a formaüreg síkjával) kilökök/mérőcsapok felhasználásával igazoltam ABS GP35 illetve PP H145F anyagokat felhasználva, 2 mm falvastagságú IBA próbatest szerszámmal.

4. Tézis [6, 7]

A folyási út mentén állandó keresztmetszetű fröccsöntő szerszám formaüregében mért nyomásból származtatott átlagos viszkozitás a falvastagság növelésével jobban közelíti a reométerrel mérhető értékeket. A szerszámban mért viszkozitás, a korrekciót követően (Rabinowitsch), 10% alatti hibával meghatározható az 50-500 1/s deformációsebesség tartományban, 4 mm falvastagság esetén. Az adiabatikus és izoterm áramlási körülményekhez képest a mérési hibát a kialakult héjrteg, a hűtési sebesség, illetve a nyírási hőfejlődés okozza.

Állításaimat ABS GP35 és PP H145F anyagok felhasználásával, egy 80x80 mm felületű, filmgátas, fokozatmentesen változtatható falvastagságú szerszámmal igazoltam, 2; 3; 3,5; és 4 mm falvastagságú próbatesteket fröccsöntve.

5. Tézis [8]

A fröccsöntött termék tömege meghatározható a teljes volumetrikus kitöltéssel bejuttatott terméktömegeből, valamint a p_vT összefüggés és a nyomásintegrál felhasználásával kiszámítható utónyomási tömegeből az alábbi összefüggéssel:

$$m = m_0 + \Delta m_{elm} \cdot \left(1 - e^{-C_{hp} \frac{PI}{1000}}\right),$$

ahol a m_0 [g] a termék utónyomás nélküli tömege, Δm_{elm} [g] a p_vT görbékéből számolt maximálisan kompenzálható terméktömeg, amit a fröccsöntési hőmérsékleten, nulla túlnyomáson kapott fajtérfogat, illetve a szobahőmérsékleten (23 ± 1 °C) az adott utónyomáson kapott fajtérfogat különbségéből és a termék térfogatából számítható, C_{hp} [1/(bar·s)] az utónyomásfüggő nyomásérzékenységi konstans, a PI [bar·s] pedig a mért nyomásgörbékéből a teljes ciklusra számított idő szerinti nyomásintegrál.

Az általam felállított összefüggéssel a terméktömeg a gátfagyástól rövidebb utónyomási idő esetén is leírható, amikor a gáton visszaáramlás jön létre. A fenti összefüggésben a C_{hp} paraméter az utónyomás függvényében meghatározott nyomásérzékenységi konstans, amely az utónyomás fázisban a formaüregből visszaáramló

anyag mennyiségével van kapcsolatban, és függ a fröccsöntő szerszám kialakításától, hőmérsékletétől és az ömledék állapotától.

A fenti összefüggés értelmezési tartományának felső korlátját az adja, hogy az utónyomás csak bizonyos mértékig tartható fenn. A kompenzációs folyamatnak a gátfagyás szab határt, így a tömegekben egy felső korlátot adva, amely az alábbi összefüggéssel írható le:

$$m_{\text{felső korlát}} = m_0 + K_0 \cdot \left(1 - e^{K_1 \cdot \frac{PI}{100}}\right) + K_2 \cdot \frac{PI}{100},$$

ahol m_0 a termék utónyomás nélküli tömege, K_0 [g], K_1 [1/(bar·s)] és K_2 [g/(bar·s)] technológia, szerszám és alapanyagfüggő illesztési konstansok, a PI pedig a mért nyomásintegrál.

Az összefüggés alsó korlátja a fröccsöntőgép nyomáskorlátjából adódik a gépen elérhető maximális utónyomáshoz tartozó C_{hp} nyomásérzékenységi konstans felhasználásával.

Állításaimat PP H145F és ABS GP35 anyagok felhasználásával, egy négyfészkés szerszám használatával bizonyítottam, 100-600 bar utónyomási tartományban.

7. Irodalomjegyzék

- [1] **Horváth S.**, Kovacs J. G.: Effect of processing parameters and wall thickness on the strength of injection molded products. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, **68**, 78-84 (2024).
- [2] **Horváth S.**: Vékonyfalú termék leképzésének elemzése. *Polimerek*, **7**, 239-244 (2021).
- [3] **Horváth S.**, Kovács J. G.: A nyomásmérési elrendezés hatásának vizsgálata a mérhető belső nyomásra. *Polimerek*, **10**, 258-264 (2024).
- [4] Ageyeva T., **Horváth S.**, Kovacs J.: In-Mold Sensors for Injection Molding: On the Way to Industry 4.0. *Sensors*, **19**, 3551 (2019).
- [5] **Horváth S.**, Vámos D., Boros R., Szűcs A.: Átkapcsolás hatása a fröccsöntési folyamatra és a szerszámnyomásra. *Polimerek*, **3**, 125-128 (2017).
- [6] **Horvath S.**, Szucs A.: Determining apparent melt viscosity by cavity pressure. in '77th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers. Detroit, (2019).
- [7] **Horvath S.**, Kovacs J. G.: Determination of wall thickness effect of in-mold viscosity measurement under non-adiabatic, non-isothermal flow conditions. *Express Polymer Letters*, **19**, 246-257 (2025).
- [8] **Horvath S.**, Kovacs J. G.: Real-time product weight estimation based on internal pressure monitoring in injection molding. *Polymer Engineering & Science*, in-press, (2025).