



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

FRÖCCSÖNTŐ CSIGACSÚCSOK HATÁSA A SZÍNKEVEREDÉSRE ÉS A
TECHNOLÓGIAI PARAMÉTEREKRE

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZET

KÉSZÍTETTE:

TÖRÖK DÁNIEL

OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK

TÉMAVEZETŐ:

DR. KOVÁCS JÓZSEF GÁBOR

2019

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

1. Bevezetés

A műanyagok ipari felhasználása a világon az utóbbi években folyamatosan növekvő tendenciát mutat. Ez a jelenség jól megfigyelhető a tömegműanyagok esetében, de a nagyteljesítményű, műszaki polimer alapanyagok is egyre több helyen váltják ki a fémeket, kerámiákat. A műanyagok növekvő népszerűségének legfőbb oka azok relatív alacsony előállítási költségeiben, valamint a fémekhez viszonyított kis sűrűségében, rendkívül jó csillapítási és szigetelési tulajdonságaiban rejlik. Szintén a polimer alapanyagok felhasználását indokolja az is, hogy feldolgozásuk jóval kisebb energia- és költségigényű, mint a fémeké vagy a kerámiáké, és emellett a termékgyártás rendkívül termelékeny.

Az iparban felhasznált műanyagok anyagszerkezetüket tekintve két csoportba, a lineáris és térhálós polimerek csoportjába sorolhatók. A lineáris polimereken belül megkülönböztethetünk részben kristályos és amorf polimereket, amelyek többsége hőre lágyuló. Feldolgozásuk az esetek nagy többségében extrúzióval vagy fröccsöntéssel történik. A fröccsöntés a polimerek feldolgozás-technológiái közül az egyik legtermelékenyebb, amellyel nagy nyomáson és hőmérsékleten, zárt szerszámban bonyolult geometriájú műanyag termékek állíthatók elő. Az extrúzióval szemben a fröccsöntés szakaszos technológia, azonban a feldolgozás során kialakuló nagy áramlási sebességeknek köszönhetően a termelékenysége egy nagyságrendbe esik az extrúzióéval. Magyarországon a műanyag termékek közel egyharmadát fröccsöntéssel állítják elő.

Fröccsöntésnél az esetek döntő többségében valamilyen adalékanyagot keverünk az alapanyaghoz, hogy egyes tulajdonságait, például a feldolgozhatóságát, mechanikai tulajdonságait, vizuális megjelenését a követelményeknek megfelelően módosítsuk. A legszélesebb körben alkalmazott adalékok közé tartoznak a színezőanyagok, de gyakran használunk töltő- és erősítő anyagokat, lágyítókat, égést, valamint degradációt gátló adalékokat. A termékek minősége szempontjából fontos kérdés az alkalmazott adalékanyagok homogén eloszlata az alapanyagban, mivel azok nem megfelelő eloszlata fröccsöntési hibákhoz vezethet. Ezek a hibák nem csak a termék felületén megjelenő, szemmel látható nyomok, színegyenetlenségek lehetnek, de akár a termék mechanikai, vagy hőtani tulajdonságait is befolyásolhatják.

A termékek homogenitásának javítására számos lehetőség van. A fröccsöntött darabok adalékanyag-eloszlásának egyenletesebbé tételére a legolcsóbb és legegyszerűbb módszer a fröccsöntőgép és az alapanyag megfelelő megválasztása mellett a technológiai paraméterek helyes megválasztása. Ha ezek segítségével nem sikerül megfelelő keveredést elérni, akkor

speciális keveredést segítő berendezések alkalmazhatók. Ilyenek például a fröccsöntőgépben alkalmazható keverők, amelyek két nagy csoportba sorolhatók aszerint, hogy végeznek-e mozgást miközben kifejtik hatásukat. A statikus keverők a fröccsöntőgép aggregátjába, a csiga elé szerelhetők, és nem végeznek mozgást a polimer ömledék keverése közben. Ezek az összetett geometriai kialakítású keverők a befroccsöntési fázisban keverik az ömledéket. A dinamikus keverők ezzel szemben a fröccsöntő gép csigájának részeként kerülnek beépítésre és a plasztikálási fázisban a csigával együtt mozogva fejtik ki hatásukat.

A plasztikálási folyamat a fröccsöntési ciklus egyik meghatározó lépése. Ebben a fázisban készítjük elő azt az ömledéket, amelyet a következő ciklusban a formaüregbe juttatunk. A fröccsöntött termék minősége szempontjából elengedhetetlen, hogy a képlékeny állapotba hozott ömledék homogén legyen, ami követelmény a töltőanyagok eloszlottságára, a hőmérséklet-eloszlásra és a kialakult nyomásviszonyokra nézve egyaránt. Az ömledék homogenitását a csigán kívül a visszaáramlás-gátló csigacsúcs is nagymértékben befolyásolhatja. A ma használatos csigacsúcsok általában csúszógyűrűs kialakításúak, azonban ezek méretezése és tervezése az esetek többségében empirikus úton történik. Hatásuk a fröccsöntési ciklusra és a fröccsöntött termékek minőségére alig ismert, ez kevésbé kutatott tématerület. A visszaáramlás-gátló csigacsúcsoknak lehet olyan speciális kialakításuk, amelynek révén alapvető funkciójuk ellátása mellett megoldást nyújthatnak a keveredési problémákra is. A speciálisan kialakított csigacsúcsba integrált keverőelemek előnye a statikus keverőkkel szemben, hogy befroccsöntéskor nem okoznak extra nyomásesést, valamint az, hogy nem rövidítik a csiga hasznos hosszát, mint a dinamikus keverők, így nem csökkentik jelentős mértékben a plasztikálási teljesítményt.

Doktori disszertációmban a csigacsúcsok fejlesztését tűztem ki fő célul. Ennek keretein belül először egyszerű kialakítású csigacsúcsokon vizsgálom az egyes geometriai paraméterek változtatásának a fröccsöntési ciklusra, illetve a termékek színegyenletességére gyakorolt hatását. Céloom továbbá a színhomogenitás méréséhez szükséges algoritmus kifejlesztése is, amely algoritmus a digitális képek feldolgozásán alapul, és alkalmas a csigacsúcsok hatásainak kimutatására. Ezt követően a mérési eredmények és tapasztalatok alapján meghatározom azokat a tervezési irányelveket, szempontokat, amelyeket a csigacsúcsok tervezésénél figyelembe kell venni, majd ez alapján összetett keverő funkcióval ellátott csigacsúcsokat tervezek, és vizsgálom azok hatását.

2. Az irodalom áttekintése és kritikai analízise

Az irodalmi áttekintés első részében a fröccsöntéshez, és az abban lefolyó keveredési folyamatokhoz és gépkatrészekhez kapcsolódó referenciákat tekintetem át. A fröccsöntés nagy termelékenység miatt a technológiának már kismértékű fejlesztésével is jelentős profitra lehet szert tenni, mivel a fröccsöntőgép minősége meghatározó fontosságú a gyártott termékek minősége szempontjából. Ez alapján elhatároztam, hogy a doktori disszertációmban a fröccsöntő gép fejlesztésével foglalkozom. A fröccsöntési folyamat fontos lépése a plasztikálás, amely során a granulátum formájú, szilárd alapanyagot előkészítjük a befröccsöntéshez. Ebben a folyamatban a fröccsöntő csigának alapvető szerepe van, ugyanis a csiga kialakítása fogja meghatározni a befröccsöntéshez előkészített polimer ömledék minőségét. A fröccsöntő csiga szerves részét képezi a visszaáramlás-gátló csigacsúcs, amely szintén részt vesz a plasztikálási folyamatban és befolyásolja annak eredményét.

A fröccsöntő csigacsúcsok témaköre egy kevésbé kutatott részét képezi a fröccsöntéshez kapcsolódó fejlesztéseknek. Ebben a témában szép számban találhatunk a különböző működési elvű és kialakítású csigacsúcsokhoz kapcsolódó szabadalmakat, azonban a publikációk száma nem számottevő. Irodalomkutatásom során csak néhány olyan publikációt találtam, amely jól használható a csigacsúcsok fejlesztéséhez. Ezek többsége szimulációs számításokon alapul, és kevés információt kapunk arról, hogy a csigacsúcsok milyen hatással lehetnek a fröccsöntött termékek minőségére, vagy magára a gyártástechnológiára. Ezzel kapcsolatban nem találtam olyan publikációt, vagy más egyéb forrást, amely a csigacsúcsok fröccsöntési paraméterekre gyakorolt hatását vizsgálná. Emellett az irodalomban nem található olyan ismeretanyag, ami kifejezetten a visszaáramlás-gátló csigacsúcsok tervezéséhez és méretezéséhez kapcsolódna. Ez alapján célként határoztam meg a csigacsúcsok széleskörű vizsgálatát, ami a csigacsúcsok fröccsöntési ciklusra és a késztermékek minőségére gyakorolt hatásának feltárására irányul.

A fröccsöntött termékek minőségi paraméterei rendkívül sokfélék lehetnek. Ezeket a paramétereket az adalékanyagok eloszlata nagymértékben befolyásolhatja, legyenek azok akár mechanikai, termikus, vagy esztétikai tulajdonságok. Az irodalmi áttekintés alapján kiderült, hogy a fröccsöntött termékek esetében az egyik leggyakrabban használt adalék típus a színezőanyagok csoportja. Az iparban a színezőanyagok polimerekben való eloszlata sokszor gondot okoz, és ha ezt a gondot nem sikerül orvosolni, akkor a termékek minősége romlik. A színezékek és azok használata széleskörben kutatott tématerület, ami szintén indokolja, hogy ezekkel az adalékokkal foglalkozni kell. A témában számos kutatás és több könyv is fellelhető. A színezékek fröccsöntött termékekben való eloszlata általában statikus keverőket használnak, amelyek az ömledékrétegek szétválasztásával és átrendezésével, majd a rétegek újraegyesítésével érik el keverő hatásukat. A statikus keverőkkel jó hatásfokú keveredés érhető

el, azonban hátrányuk, hogy a befroccsöntési fázisban fejtik ki hatásukat, és emiatt nem elhanyagolható mértékben befolyásolhatják a technológiai paraméterek alakulását. A technológiai paraméterek közül a legjelentősebb a fröccsnyomás, amely statikus keverők használata esetén akár több száz barral is lecsökkenhet, és ez extrém esetekben hiányos termékek gyártásához is vezethet. A probléma kiküszöbölésére nyújthatnak megoldást az olyan keverő rendszerek, amelyek nem a befroccsöntési fázisban fejtik ki hatásukat, hanem már az ömledék adagolása közben. Ilyen keverő rendszerek kialakíthatók a csigában, vagy akár a visszaáramlás-gátló csigacsúcsokban. A visszaáramlás-gátlóban elhelyezett keverőelemek előnye a csigában elhelyezettekhez képest, hogy nem csökkentik a csiga hasznos hosszát, így kevésbé vannak kihatással a plasztikálás folyamatára.

A keverő rendszerek minősítésének egyik alapvető szempontja a keverék homogenitása. Ennek meghatározása korántsem egyszerű feladat. A keverékek minősítésének első nehézsége a mintavételezés, ezen belül a mintavétel módjának és a keveréket jellemző minta méretének helyes megválasztása. A következő nehézség a keverék vizsgálati módszerének megválasztása és a vizsgálati eredmények alapján a keverék inhomogenitásának számszerűsítése. Az irodalmi források azt mutatják, hogy a keverékek inhomogenitásának vizsgálatában a digitális képfeldolgozás szerepe egyre jelentősebb, ami a számítástechnika fejlődésének köszönhető. Előnye, hogy a minősítés jól automatizálható és könnyen integrálható a meglévő gyártórendszerbe, valamint kiküszöbölhető vele az emberi kiértékelés szubjektivitása. A digitális képfeldolgozás alapjai már igen jól ismertek, számos eljárás létezik, amelyekkel a digitális képek módosíthatók, vagy kiértékelhetők. A keveredés digitális képfeldolgozással történő minősítésére az irodalomban számos példát találhatunk, ezek többsége porkeverékek elosztatottságának meghatározására használatos. A fröccsöntött termékek színében lévő inhomogenitások számszerűsítésére azonban nem sok példát találtam. Ez alapján fontosnak tartom egy olyan, digitális képfeldolgozáson alapuló rendszer kifejlesztését, amely alkalmas a fröccsöntött termékek felületi minősítésre, továbbá jól használható a csigacsúcsok minősítésére is.

Az irodalomkutatás alapján doktori munkámban a következő célokat tűztem ki:

- csigacsúcsok széleskörű vizsgálata, azok fröccsöntési technológiára és a fröccsöntött termékek homogenitására gyakorolt hatásának feltérképezése,
- egyszerű geometriájú csigacsúcsok tervezése, amelyek lehetővé teszik az egyes geometriai paraméterek hatásának vizsgálatát,
- a vizsgálatokhoz egy színhomogenitás- kiértékelő rendszer fejlesztése, amely alkalmas a csigacsúcsok termékminőségre gyakorolt hatásának a vizsgálatára is,

- csigacsúcs-tervezési irányelvek felállítása a mérések során szerzett tapasztalatok alapján,
- összetett geometriájú csigacsúcsok vizsgálata és minősítése, valamint ezek összehasonlítása az egyszerű geometriájú csigacsúcsokkal.

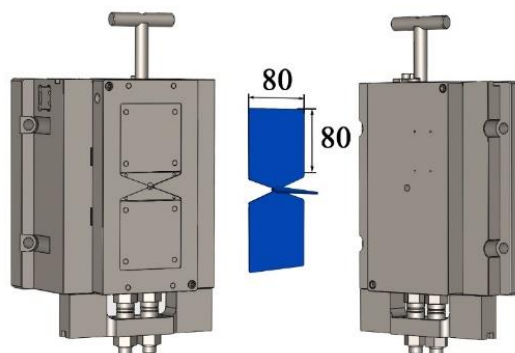
3. Felhasznált anyagok, gépek és mérési módszerek

Ebben a fejezetben a gyártáshoz és a mérésekhez használt feldolgozó gépek és mérőberendezések találhatók.

3.1. Fröccsöntőgép és szerszám

Arburg Allrounder Advance 270S 400-170 fröccsöntő gépet használtam a méréseim során. A fröccsöntő gép aggregátja egy univerzális kialakítású, egybekezdésű, háromzónás, 30 mm átmérőjű, 20-as hossz/átmérő viszonyú, nitridált csigával rendelkezik, amelynek axiális elmozdulása maximum 120 mm lehet, így a maximális adagtérfogat 85 cm^3 . A fröccsöntés közben megengedhető maximális fröccs- és utónyomás 2000 bar. A gépben a fröccsöntő csiga helyzet szabályozott, így a fröccsöntési paramétereknél beállított adagsúly és az átkapcsolási térfogat pontosabban tartható a gyártás során.

A vizsgálatok során egy 80x80x1,2 mm-es lapka próbatesteket gyártó szerszámot használtam. A szerszám kétfézes kialakítású, az álló és a mozgó oldali formalap cserélhető betétes. A próbatestek formaürege a 1. ábrán látható módon a mozgó oldali szerszám félben, a cserebetétben kerültek kialakításra. A termékekhez az elosztó csatorna filmgáttal csatlakozik. A szerszám álló oldali formalapjának felülete polírozott, ami a termék színében lévő inhomogenitások jobb detektálhatóságát segíti.



1. ábra Lapka próbatestet gyártó szerszám, és a fröccsöntött termék 3D modellje

3.2. Dinamikus keverők és csigacsúcsok

3.2.1. Kereskedelmi forgalomban kapható csigacsúcsok és dinamikus keverők

A kísérletek során különböző geometriai kialakítású csigacsúcsokon vizsgálom a visszaáramlás-gátlók hatásait a fröccsöntési ciklusra és a termékek színhomogenitására.

Az *Arburg cég CAA30B Free Flow* típusú csigacsúcsa (2/1. ábra) egy hagyományos kialakítású visszaáramlás gátló, amely nem tartalmaz keverőelemeket. A csúszógyűrűs kialakítású csigacsúcs 30 mm névleges átmérőjű csigához menetes kötéssel csatlakozik.

A *Plasma Mixing-Ring System* a *BASF* cég dinamikus keverő csigacsúcsa (2/2 ábra), amely a hagyományos visszaáramlás-gátló csigacsúcs helyett kerülhet beépítésre. A keverőelemek ennél a csigacsúcsnál a csúszógyűrűn találhatók és főként a disztributív keveredést segítik elő. A csigacsúcs alkalmas mind a tömegműanyagok, mind a nyírásérzékeny és átlátszó anyagok színezéséhez.

A *Cavity Transfer Mixer típusú dinamikus keverő* (2/3 ábra) a Rapra Technology Limited cég extruderekhez használatos keverőjének szabadalma alapján készült. A dinamikus keverő, hasonlóan a BASF csigacsúcsához, a visszaáramlás-gátló helyére kerül beépítésre. A csigacsúcs forgó részében (test) és a csúszógyűrűn félgömb alakú üregek találhatók, amelyeken a polimer ömledék keresztáramlik. A gyűrű és a forgórész közti szűk illesztési hézagnak köszönhetően az ömledék csak az üregek irányába képes áramolni, amelyek egymáshoz viszonyított elfordulása nagy nyírásnak teszi ki az alapanyagot. A CTM típusú keverő nagymértékű diszperzív és disztributív keverést biztosít.



2. ábra Kereskedelmi forgalomban kapható csigacsúcsok és dinamikus keverők
Arburg CAA30B Free Flow, (2) BASF Plasma Mixing-Ring System, (3) Cavity Transfer Mixer

3.2.2. Saját tervezésű csigacsúcsok

A kísérletek során különböző geometriai kialakítású csigacsúcsokon vizsgálom a visszaáramlás-gátlók hatásait a fröccsöntési ciklusra és a termékek homogenitására. Ehhez csigacsúcsokat terveztem, amelyeken a geometriai jellemzők, mint például a résméret (v), az átáramlási úthossz (L), a támasztó gyűrű és a fröccshenger közti résméret (v_{ent}) hatása vizsgálható. Ezek a saját tervezésű csigacsúcsok a méréseknél lesznek részletesen bemutatva.

3.3. Alapanyagok és mesterkeverékek

A mérések során felhasznált alapanyag töltetlen akrilnitril-butadién-sztirol (ABS, Terluran GP 35, Styrolution Group GmbH), ami felhasználását tekintve egy általános célú, fröccsönthető, amorf szerkezetű polimer. Az alapanyag granulátum formában 600 kg-os kiszerezésben állt rendelkezésre, amit a nedvességfelvétele miatt nem célszerű kültéri és nedves helyen tárolni. Feldolgozás előtt minden esetben szükséges az alapanyag szárítása, 4 órán keresztül 80 °C-on. Az alapanyag feldolgozása során ajánlott ömledékhőmérséklet 220-260 °C, a szerszámhőmérséklet 30-80 °C. Az ABS alapanyagot a Clariant cég rózsaszín mesterkeverékével színeztem (Renol-pink ABS143479Q, Clariant), ami ABS hordozóra épül. A színcsere vizsgálatánál a különböző csigatisztítók minősítéséhez egy egyedi receptúrájú, kék mesterkeveréket használtam. A mesterkeverékeket a gyártói ajánlás szerint 4 m%-ban adalékoltam az alapanyaghoz.

3.4. Mérési módszerek

3.4.1. Plasztikálási teljesítmény

A *plasztikálási teljesítményt* az Arburg Allrounder Advance 270S 400-170 fröccsöntő gépen mértem három különböző csigaforgási sebesség (10, 25 és 50 m/perc) és három különböző fúvóka hőmérséklet (200, 225 és 250 °C) mellett. A mérés során fröccsöntő gép aggregátja hátsó, míg a fröccsöntő csiga első pozícióban helyezkedik el. A torlónyomás értéke 300 bar, ami megakadályozza a csiga axiális mozgását a plasztikálási teljesítmény mérése közben. Folyamatos plasztikálás mellett gyűjtöttem a fúvókán kiáramló polimer ömledéket 1 percen keresztül, majd mértem annak tömegét, így a plasztikálási időből és a kiáramló polimer tömegéből meghatározható a plasztikálási teljesítmény (14. összefüggés). Ellenőrzés céljából a plasztikálási teljesítményt meghatároztam a próbatestek folyamatos ciklusban történő gyártása közben is. Ennél a módszernél az adagolási időből és az adagolási térfogatból számítható a plasztikálási teljesítmény, felhasználva a polimer ömledék fajtérfogatát a számításoknál. Mivel a polimer ömledék fajtérfogata, így a sűrűsége is jelentősen függ a hőmérséklettől és a nyomástól, a kapott plasztikálási teljesítmény csak közelítő értéket ad.

3.4.2. Színhomogenitás mérése

A gradiens alapú kiértékelés első lépéseként a próbatestekről készült digitalizált képeket RGB színtérből szürkeárnyalatos színtérbe konvertáltam a 1. összefüggés alapján. A függvény a színes képet leíró, $n \times m \times 3$ dimenziójú, valós tér elemeit képezi le, az $n \times m$ dimenziós, valós

tér elemeire, így a homogenitás a szürkeárnyalatos szintérben egyszerűbben vizsgálható, mindhárom színcsatorna együttes információtartalma alapján (a kiértékelés bármelyik színcsatorna esetén működik). A képet leíró mátrix a szürkeárnyalatos szintérben:

$$I_{grey} = 0,3R + 0,59G + 0,11B, \quad (1)$$

ahol I_{grey} a kép szürkeségi fok mátrixa, R , G és B pedig a vörös, zöld és kék színcsatorna intenzitás-mátrixa. A színes képek szürkeárnyalatos szintérbe való konvertálására ezen felül számos lehetőség közül választhatunk, azonban a digitális képfeldolgozás területén ez a módszer terjedt el.

A kiértékelés következő lépése a gradiens mátrix meghatározása a szürkeárnyalatos képet leíró mátrix intenzitásértékeiből. A diszkrét függvények gradiensének meghatározására, hasonlóan az előbbi konverzióhoz, több módszer áll a rendelkezésünkre. A számítások során az intenzitás gradiensének nagyságát a 2. összefüggés alapján határoztam meg, centrális módszerrel ($i=1 \dots n$; $j=1 \dots m$, ahol n és m a kép mérete). A centrális módszer annyit jelent, hogy a gradiens meghatározása a képpontot körülvevő többi képpont intenzitásértékei alapján történik.

$$I_{grad}(i, j) = \sqrt{\left[\frac{I_{grey}(i-1, j) - I_{grey}(i+1, j)}{2}\right]^2 + \left[\frac{I_{grey}(i, j-1) - I_{grey}(i, j+1)}{2}\right]^2}, \quad (2)$$

ahol I_{grad} a kép szürkeségi fok mátrixából számított gradiens mátrix, I_{grey} pedig a kép szürkeségi fok mátrixa. A gradiens mátrix így a szürkeségi fok mátrix gradiensének magnitúdóját tartalmazza.

A képek homogenitásának mérőszámát a gradiens mátrix elemeinek összegzésével kapjuk. A különböző méretű képek összehasonlíthatósága miatt a homogenitásra jellemző hibaértéket a képmérettel fajlagosítottam (3. összefüggés).

$$IH_{grad} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{grad}(i, j)}{n \cdot m}, \quad (3)$$

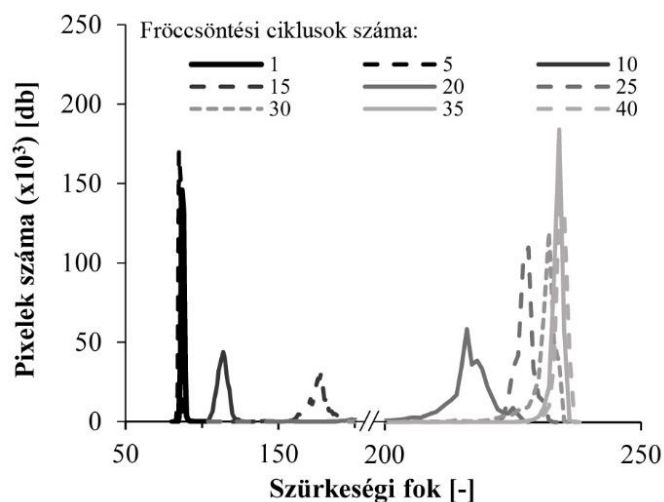
ahol IH_{grad} a kép inhomogenitásának mértéke, I_{grad} pedig a kép szürkeségi fok mátrixából számított gradiens mátrix, n és m pedig a kép mérete pixelben megadva.

A kiértékelés során a képeket különböző szórású Gauss-szűrőkkel életlenítettem, és a hibaértéket minden egyes szűrőhöz meghatároztam, így a hibák kiterjedését és azok intenzitásbeli eltérését is figyelembe vettem a kiértékelések során.

3.4.3. Csigacsúcsok tisztíthatóságának mérése

Kísérletekhez Terluran GP-35 típusú ABS alapanyagot használtam, amelyet a mérések előtt 4 órán keresztül szárítottam 80 °C-on. Az alapanyagot sötétkék mesterkeverékkel

színeztem, amiből 80x80x2 mm-es lapka próbatestet gyártottam. A termékek tömege 32,5 g volt az elosztórendszerrel együtt. A fröccsöntő egység sem statikus, sem dinamikus keverőelemeket nem tartalmazott. Első lépésként a kék mesterkeverékkel bekevert ABS alapanyagból gyártottam terméket, biztosítva az állandósult állapotot. Ezt követően színezetlen ABS alkalmazásával folytattam a termékgyártást, és vizsgáltam a termékek színének változását ciklusról ciklusra. A fröccsöntött minták digitalizálásához Epson Perfection V600 Photo síkágyas lapszkennert használtam. A mintákról 200 dpi felbontású, 600x600 pixel méretű képeket készítettem. A 3. ábra a fröccsöntött próbatestekhez tartozó szürkeségi fok hisztogramokat mutatja. Megfigyelhető, hogy a kék szín tisztulásával a hisztogramok a nagyobb szürkeségi fok tartomány felé tolódnak el. A folyamat elején a maradék színezőanyag lassan kezd kitisztulni a hengerből, a próbatestek mélykék színűek. Néhány ciklus után egy gyors lefolyású tisztulás figyelhető meg, a próbatestek színe a fehér tartomány felé tolódik, a mesterkeverék nagy része gyorsan kiürül a hengerből. Ezt követően újra lelassul a folyamat. A fröccshenger tisztításakor ez a harmadik szakasz a kritikus, amikor a próbatestekben már csak kis mennyiségű színezőanyag marad, viszont a szennyeződés még látható a termék felületén. Ez a harmadik szakasz a legtöbb esetben egy igen lassú tisztulási folyamat, ahol a kék szín halványodása mellett néhány terméken sötétebb csíkok is megjelennek. Ezek a fröccsöntő egység pangó részeiből kerülhetnek ki, amelyek még későbbi ciklusokban is gondot okozhatnak.



3. ábra A termékek színének szürkeségi foka a ciklusok során (csigatisztító alkalmazása nélkül)

A továbbiakban a csigatisztító hatékonyságának szemléltetésére ábrázoltam az átjártott anyagmennyiség (ciklusok száma) függvényében a hisztogramok csúcserőértékeinek eltolódását.

4. Összefoglalás

Értekezésem elején az irodalmi források feldolgozásával foglalkoztam, és részletesen bemutattam a fröccsöntésnél használható visszaáramlás-gátló rendszereket. Ezek közül manapság a gyűrűs kialakítású visszaáramlás-gátlók terjedtek el, amelyeket az ipar széles körben használ. Az irodalomkutatás alapján bemutattam, hogy szabadalmak nagy számban találhatók a visszaáramlás-gátlókról, azonban tudományos cikkek kevésbé foglalkoznak ezzel a témakörrel, és csak elvétve található néhány kutatás a területen. Az irodalomkutatásban kitértem továbbá a keveredés mechanizmusaira és a különböző színezőanyagokra, valamint a különböző keverékek minősítési módszereire, kiemelten kezelve a digitális képfeldolgozás témakörét. Az irodalmi források alapján célul tűztem ki a fröccsöntő csigacsúcsok vizsgálatát és fejlesztését, valamint olyan mérési eljárás kidolgozását, amellyel a fröccsöntött termékek felületi minősége meghatározható és számszerűsíthető.

Az értekezés további részében a visszaáramlás-gátló csigacsúcsok vizsgálatával foglalkoztam. A vizsgálatokhoz első lépésben csigacsúcsokat terveztem, amelyek egyszerű geometriájúak, így ezeken a csigacsúcsok jellemző paramétereinek hatásai vizsgálhatók. Ezeken a csigacsúcsokon méréseket végeztem, és meghatároztam a különböző kialakítású csigacsúcsok hatását a plasztikálási teljesítményre, ömledékhőmérsékletre, fröccsnyomásra, adagolási időre és a próbatestek színhomogenitására.

Értekezésemben kimutattam, hogy a fröccsöntőgép plasztikálási teljesítményét a csigacsúcsok legszűkebb átáramlási keresztmetszete nagymértékben befolyásolja. A legszűkebb résméret és a plasztikálási teljesítmény kapcsolatát egy általánosított telítési függvénnyel írtam le, amelynél az illesztési paraméterek gépfüggő konstansok. Az általam létrehozott összefüggés alapján az adott fröccsöntő géphez és felhasznált alapanyaghoz a legszűkebb résméret és a csiga forgási sebessége függvényében meghatározható a plasztikálási teljesítmény. Az összefüggés nagyban megkönnyíti a csigacsúcsok átáramlási keresztmetszetének megválasztását, mert a számított plasztikálási teljesítmény alapján nagy pontossággal becsülhető a ciklus közben mért adagolási idő is.

Az értekezés következő lépéseként a különböző kialakítású csigacsúcsok használatával fröccsöntött próbatestek felületének színhomogenitását vizsgáltam. A színhomogenitás vizsgálatához a Gauss-szűrők speciális felhasználásán alapuló képelemző algoritmust fejlesztettem. Alapelve, hogy a digitális képen a durva, intenzív hibák a kép életlenítése, szűrése után is láthatóak maradnak. Minél szembetűnőbb a hiba, annál nagyobb szórású szűrő szükséges ahhoz, hogy a hibát eltüntessük a képről. A színhomogenitás hibaértékének számításához a különböző szórású szűrőkkel életlenített képeket használtam fel, amelyeken a szürkességi fok intenzitásfüggvényének gradiensét számítottam ki. Minél több a színváltozás a

képen, annál inhomogénebb a kép. A képekre jellemző homogenitásgörbét úgy kapjuk, ha a különböző szórású szűrővel életlenített képek hibaértékeit a szűrő szórásának függvényében ábrázoljuk. Az életlenítés hatására a mérésből adódó zajok kiküszöbölhetők. A nagy kiterjedésű hibák, amelyek szemmel láthatók, még durva életlenítés hatására sem tűnnek el a képről, így hatásuk megjelenik a homogenitásgörbén. Az általam fejlesztett algoritmust felhasználva megállapítottam, hogy egyszerű kialakítású csigacsúcsok esetén a színhomogenitás szempontjából legmeghatározóbb hatása a résméretnek és a támasztógyűrű átmérőjének van.

Disszertációmban vizsgáltam továbbá a termékek színhomogenitása és a csigacsúcsban kialakuló áramlási viszonyok közötti kapcsolatot. Ehhez a csigacsúcsban kialakuló, falmenti nyírósebességet használtam fel, amely a polimer alapanyag folyási tulajdonságainak és a csigacsúcs geometriájának ismeretében analitikus összefüggések alapján meghatározható. Kimutattam, hogy egyszerű geometriájú csigacsúcsok esetén a falmenti nyírósebesség lineáris kapcsolatban van a termékek színhomogenitásával. A bonyolult geometriájú csigacsúcsok esetén megállapítottam, hogy a csigacsúcs keveredést javító geometriai kialakításának színhomogenitásra gyakorolt hatása mellett a résméret hatása elhanyagolható. Megállapítottam továbbá, hogy a keveredést javító geometriai kialakítás keverési hatékonysága meghatározható, ha az eredményeket összevetjük az egyszerű kialakítású csigacsúcsokkal kapott mérési eredményekkel. Adott keverő geometria esetén megállapítható, hogy a keveredés milyen mértékben köszönhető a geometriai kialakításnak és milyen mértékben a szűkítésnek.

A disszertáció utolsó fejezetében a fröccshenger tisztíthatóságával, valamint a csigacsúcsok tisztításra gyakorolt hatásával foglalkoztam. Kidolgoztam egy mérési eljárást, amellyel a tisztulási folyamat vizsgálható. A módszer, hasonlóan a színhomogenitás mérésére kidolgozott algoritmushoz, a próbatestekről készített digitális képek elemzésén és feldolgozásán alapul. Munkám során megállapítottam, hogy a tisztulási folyamat időtartama és intenzitása függ a fröccshenger és a csigacsúcs kialakításától. A tisztulási folyamat adalékanyagok (csigatisztítók) hozzáadásával felgyorsítható. Az egyszerű geometriájú csigacsúcsok esetén kimutattam, hogy a tisztulási folyamat nem függ jelentősen a geometriai paramétereiktől (résméret, folyási hossz stb.). Kimutattam továbbá, hogy az összetett geometriájú csigacsúcsok tisztíthatósága rosszabb, mint az egyszerű kialakítású csigacsúcsoké, és az általam fejlesztett módszerrel a különbség is számszerűsíthető.

A doktori munkám eredményei jó alapul szolgálnak a csigacsúcsok szisztematikus tervezéséhez és a meglévő csigacsúcsok teszteléséhez. A mérési módszerek tovább fejleszthetők és pontosíthatók, vagy kis módosításokkal más problémák vizsgálatára is alkalmasak.

5. Tézisek

I. Tézis

Bebizonyítottam, hogy a fröccsöntőgépekbe szerelt csigacsúcsok legszűkebb átáramlási keresztmetszetének plasztikálási teljesítményt módosító hatása leírható, a csigaforgási sebesség függvényében az alábbi módon:

$$P_r(v_k, A_{min}) = c_1 \cdot v_k \cdot \sqrt{1 - e^{-\sqrt{\frac{A_{min}}{c_2 \cdot v_k}}}}$$

ahol P_r a plasztikálási teljesítmény [kg/h], v_k a csiga kerületi sebessége [m/perc], A_{min} a csigacsúcs legszűkebb átáramlási keresztmetszete [mm²], c_1 és c_2 illesztési konstansok. A $c_1 \cdot v_k$ szorzat a fröccsöntőgép plasztifikáló egységének a kihozatala a csigacsúcs nélkül.

Állításaimat különböző átáramlási keresztmetszetű csigacsúcsokkal felszerelt, Arburg Allrounder Advance 270S 400-170 típusú fröccsöntőgép plasztikálási teljesítményének mérésével igazoltam, ABS Terluran GP-35 alapanyag használata esetén, három csigakerületi sebesség alkalmazásával [1].

II. Tézis

Kifejlesztettem egy digitális képfeldolgozáson alapuló vizsgálati eljárást, amellyel csigacsúcsok homogenizáló képessége számszerűsíthető. A mérés alapja, hogy a fröccsöntött minták digitalizálása után a képet leíró színtfüggvények átlagos gradienséből egy homogenitási jellemzőt határoz meg. A módszer a Gauss szűrő szórásának változtatásával és azok eredeti képen való alkalmazásával, egy a különböző homályosságú képekből meghatározott homogenitás függvényt eredményez, amit integrálva egy olyan homogenitásra jellemző mérőszámot ad, amely a hibák kiterjedését és azok intenzitását is figyelembe veszi [2-6].

A módszer alkalmazhatóságát 21 különböző csigacsúcs felhasználásával, Arburg Allrounder Advance 270S 400-170 fröccsöntő gépen, ABS Terluran GP-35 alapanyagból fröccsöntött, 80x80x1,2 mm méretű lapka próbatesteken igazoltam.

III. Tézis

Igazoltam, hogy a mesterkeverékek eloszlata, így a késztermék színhomogenitását jellemző mérőszám lineáris kapcsolatban van a polimer ömledék áramlásakor az egyszerű geometriájú csigacsúcsokban fellépő falmenti nyírósebességgel. Állításomat több különböző konstans résméretű csigacsúcs esetében bizonyítottam. Az összefüggés érvényességi tartományának alsó határa egy olyan minimális nyírósebesség, ami felett a plasztikálás megvalósítható, a felső érvényességi határa pedig az alapanyag degradációs érzékenységből

adódik. Állításomat GP-35 Terluran típusú ABS alapanyag és RenolPink mesterkeverék használatával, készített próbatesteken igazoltam [1, 2, 4].

IV. Tézis

Bizonyítottam, hogy a csigacsúcsok keveredésre gyakorolt hatását azok komplex geometriai kialakításából adódó összetett áramlási képe is jelentősen befolyásolja, a keveredés nem csak az ömledék nyírásának következménye. Ezekkel a speciális geometriájú csigacsúcsokkal elérhető, hogy kis nyírósebesség mellett, az anyag felmelegedését elkerülve és a kihozatalt nem korlátozva nagy keveredési hatás érhető el.

Állításomat GP-35 Terluran típusú ABS alapanyag és RenolPink mesterkeverék használatával, általános fröccsöntési beállításokkal készített próbatesteken igazoltam [1, 2].

V. Tézis

Új mérési módszert dolgoztam ki a fröccsöntésnél lejátszódó tisztulási és színcsere folyamatok lefutásának jellemzésére. A mérési eljárás a folyamatos gyártásban készülő próbatestek digitalizálásán és a digitális képek feldolgozásán alapul. Kimutattam, hogy a képeket leíró intenzitásfüggvényekkel nyomon követhető a tisztulás és a színcsere során tapasztalható színváltozás. Igazoltam, hogy a mérési módszer alkalmas a tisztulási folyamat jellegének és ebből adódóan időtartamának meghatározására.

Kimutattam továbbá, hogy a tisztulási folyamat egy egytárolós arányos és egy holtidős tag sorba kapcsolásával modellezhető. A rendszer gerjesztését figyelembe véve a különböző csigacsúcsokhoz tartozó időparaméterek meghatározhatók az arányossági tényező és a holtidő ismeretében. A rendszerre jellemző válaszfüggvény ezek alapján a következőképpen alakul:

$$Y(t) = \begin{cases} K ; & 0 \leq t \leq Th \\ K + X(t) - X(t) e^{-\frac{t}{Tp}} ; & t \geq Th \end{cases}$$

ahol K a kitisztítandó alapanyag átlagos szürkeségi foka, Th a holtidő, $X(t)$ a gerjesztés, ami az átállás utáni alapanyag szürkeségi fokának megfelelő egységugrás gerjesztés, Tp pedig a vizsgált rendszer időállandója [7].

6. Publikációk

- [1] Török D., Kovács J. G.: Effects of injection molding screw tips on polymer mixing. *Periodica Polytechnica*, 62, 241-246 (2018).
- [2] Török D., Kovács J. G.: Effects of Dynamic Mixers on the Color Homogeneity and the Process in Injection Molding. *Polymer Engineering & Science*, 59, 189-195 (2019).
- [3] Zsíros L., Torok D., Kovacs J. G.: The Effect of Masterbatch Recipes on the Homogenization Properties of Injection Molded Parts. *International Journal of Polymer Science*, (2017).
- [4] Zsíros L., Török D., Kovács J. G.: Evaluation of the homogenization properties of masterbatches. *Coloration Technology*, 133, 431-438 (2017).
- [5] Zsíros L., Török D., Kovács G. J.: Színegyenetlenség mérésére alkalmas mérőrendszer fejlesztése és alkalmazása statikus keverők minősítésére. 'OGÉT 2015 Csíksomlyó, Románia. 2015.04.23-2015.04.26., 415-418 (2015).
- [6] Török D., Zsíros L., Kovács G. J.: Különböző kialakítású gáttípusok és a szerszám felületérdességének hatása a fröccsöntött termékek színhomogenitására. 'OGÉT 2016 Déva, Románia. 2016.04.21-2016.04.24., 455-459 (2016).
- [7] Török D., Suplicz A., Kovács J. G.: Csigatisztítók hatékonyságának minősítése. *Polimerek*, 2, 104-108 (2016).
- [8] H Hargitai, D Török: Mixing efficiency study of nano and micro filled pp systems. *Acta Technica Jaurinensis*, 7, 344-355 (2014) 10.14513/actatechjaur.v7.n4.334
- [9] Török D., Zsíros L., Kovács J. G.: Különböző elemszámú és átmérőjű StaMixCo statikus keverők vizsgálata. *Műanyag és Gumi*, 51, 346-351 (2014)
- [10] Török D., Suplicz A., Kovács J. G.: Mérési módszer fejlesztése a fröccsöntött, kompozit termékekben létrejövő szegregáció mérésére. in 'XXVI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia: 26th International Conference on Mechanical Engineering Marosvásárhely, Románia. 2018.04.26-2018.04.29., (2018)