



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

HAJAGOS SZABOLCS
DIPLOMATERV
FRÖCCSÖNTŐ SZERSZÁM INZERTEK NUMERIKUS
MODELLEZÉSE

Témavezető:

Dr. Szabó Ferenc
adjunktus

Konzulens:

Dr. Zink Béla
adjunktus,

Krizsma Szabolcs
doktorandusz

BUDAPEST, 2022



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gépészmérnöki Kar

Polimertechnika Tanszék

<http://www.pt.bme.hu>

DIPLOMAMUNKA-FELADAT

NYILVÁNOS

AZONOSÍTÁS	Név: Hajagos Szabolcs		Azonosító: 74767759586	
	Képzéskód: 2N-MG0		Specializáció kódja:	Feladatkiírás azonosítója:
	Szak: Gépészmérnöki mesterképzési szak		2N-MG0-PT	GEPT:2023-1:2N-MG0:HVAGZY
	Diplomamunka-feladatot kiadó tanszék:		Zárvizsgát szervező tanszék:	
	Polimertechnika Tanszék		Polimertechnika Tanszék	
Témavezető: Dr. Szabó Ferenc (74657172829), adjunktus				

FELADAT	Cím	Fröccsöntő szerszám inzertek numerikus modellezése Modeling of the deformation of injection mold inserts
	Részletes feladatok	1. Végezzen irodalomkutatást a fröccsöntő szerszámokra a fröccsöntési technológia során ható mechanikai igénybevételek témakörében, főképp a szerszám és inzertdeformációk kiváltó okait ismertesse. Mutassa be a szerszámdeformáció modellezési lehetőségeit, részletesen térjen ki a peremfeltételek és az anyagparaméterek meghatározására, illetve a számítási eredmények pontosságára. 2. Határozza meg a legfontosabb peremfeltételeket, modellezési és anyagparamétereket. Készítsen numerikus modelleket és végezze el a számításokat az inzertek deformációs viselkedésének vizsgálatára. 3. Az eredményeket értékelje ki és hasonlítsa össze az inzertek valós viselkedésével. Az eredmények alapján határozza meg a fontosabb eltéréseket, ezeknek a lehetséges okait és módosítsa a modelleket úgy, hogy az igénybevétel hatására fellépő valós viselkedéssel jobban korreláljon. 4. A módosított modellekkel számolt eredményeket értékelje ki és tegyen továbbfejlesztési javaslatokat a továbbra is fennálló eltérések kiküszöbölésére.
	Hely	A diplomamunka-készítés helye: BME Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3 Konzulens: Krizsma Szabolcs, doktorandusz és Dr. Zink Béla, adjunktus

ZÁRÓVIZSGA	1. záróvizsga tantárgy(csoport)	2. záróvizsga tantárgy(csoport)	3. záróvizsga tantárgy(csoport)
	ZVEGEPTNGAT Anyagszerkezetan	ZVEGEPTNGTE Tervezés	ZVEGEPTNGFE Feldolgozás

HITELESÍTÉS	Feladat kiadása: 2022. szeptember 5.		Beadási határidő: 2022. december 9.	
	Összeállította: Dr. Szabó Ferenc (74657172829) témavezető		Ellenőrizte: Dr. Bárány Tamás s.k. tanszékvezető	Jóváhagyta: Dr. Györke Gábor s.k. dékánhelyettes
	Alulírott, a feladatkiírás átvételével egyúttal kijelentem, hogy a Diplomamunka-készítés c. tantárgy előkövetelményeit maradéktalanul teljesítettem. Tudomásul veszem, hogy jogosulatlan tantárgyfelvétel esetén a jelen feladatkiírás hatálytalan. Hajagos Szabolcs			

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

Ez a diplomaterv dolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Diplomatervezési és Szakdolgozat feladatokra előírt tartalmi és formai követelménynek megfelelően készült. E diplomatervet a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2023.01.06.

témavezető

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Hajagos Szabolcs* (HVAGZY), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2023.01.06.

hallgatók

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dr. Szabó Ferencnek és Dr. Zink Bélának, akik lehetőséget és segítséget biztosítottak ennek a dolgozatnak a megírásához.

Külön köszönöm Bartók Dávidnak a fröccsöntőgép használatában és a kísérletben való segédkezést és Krizsma Szabolcsnak a numerikus számításokban való segítségét.

Emellett köszönöm a Polimertechnika Tanszéknek, hogy biztosították számomra a szükséges anyagokat és berendezéseket.

A dolgozat elkészítését a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA FK 134336 - Additív gyártástechnológiával gyártott 3D erősítő struktúrájú vázszerkezet inzertként történő alkalmazásának elemzése fröccsöntött polimer kompozitokban című pályázata támogatta.

TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás	vi
Jelölések jegyzéke.....	ix
1. Bevezetés	2
2. Szakirodalmi áttekintés	3
2.1. Fröccsöntés.....	3
2.2. Fröccsöntő szerszámok	6
2.2.1. A fröccsöntő szerszámok szerkezeti felépítése.....	6
2.2.2. A ciklus során fellépő mechanikai igénybevételek	9
2.3. Numerikus modellezés	11
2.3.1. Szerszám és inzertdeformáció modellezési lehetőségei	13
2.4. Irodalmi összegzés, kritikai elemzés és célkitűzések	18
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések	19
3.1. Felhasznált alapanyagok	19
3.1.1. Fröccsöntési alapanyag.....	19
3.1.2. Inzertek alapanyaga.....	19
3.2. Alkalmazott feldolgozó berendezések	20
3.2.1. Fröccsöntőgép és szerszám	20
3.2.2. Objet 30 Pro	21
3.3. Vizsgálati módszerek	22
3.3.1. TA Instruments DSC Q2000 berendezés.....	22
3.3.2. TA Instruments DMA Q800 berendezés.....	22
3.3.3. Mercury Monet DIC	23
3.3.4. Fényképezőgép és objektív.....	23
3.3.5. Számítógép	24
4. Kísérleti/fejlesztési rész	25
4.1. A szerszám és az inzertek kialakítása.....	25
4.2. Fizikai mérések.....	26
4.2.1. DSC mérés.....	27
4.2.2. DMA mérés	27
4.2.3. Inzertek valós viselkedésének meghatározása	28
4.3. Numerikus számítások eredményei	30
4.3.1. Inzertre ható erő numerikus számítása	30
4.3.2. Inzertek deformációs viselkedésének numerikus számítása	35

4.3.3. <i>Anyagmodell pontosítása</i>	40
5. Összefoglalás	44
5.1. Magyar nyelvű összefoglaló	44
5.2. Idegennyelvű összefoglaló.....	45
5.3. További megoldásra váró feladatok	46
6. Felhasznált források	47
7. Melléklet.....	49

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
a	oldalhossz (length)	mm
b	magasság (height)	mm
f	biztonsági tényező (fear factor)	-
p	nyomás (pressure)	bar
q	áramlási sebesség (flow rate)	m/s
A	felület (area)	mm ²
E	rugalmassági modulus (elastic modulus)	MPa
F	erő (force)	N
K _z	keresztmetszeti tényező (section modulus)	mm ³
L	szerszám magassága (height of the mold)	mm
M	monomer-egység móltömege (molecular weight of monomer unit)	g/mol
M _h	hajlító nyomaték (bending moment)	MPa
R	egyetemes gázállandó (universal gas constant)	J/(kg·mol·K)
T	hőmérséklet (temperature)	°C
T _g	üvegesedési átmenet hőmérséklet (glass transition temperature)	°C
T _m	kristályolvadási hőmérséklet (crystallization temperature)	°C

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
ε	nyúlás (strain)	mm/mm
$\delta_{nyomó}$	alakváltozás (deformation)	mm
ν	fajtérfogat (specific volume)	cm ³ /g
π	az anyagra jellemző nyomáskorrekciós állandó (materials specific pressure correction constant)	MPa
σ	feszültség (stress)	MPa
σ_D	kifáradási határ (fatigue volume)	MPa
σ_e	folyáshatár (yield stress)	Mpa
$\sigma_{határ}$	határfeszültség (limit stress)	MPa
ω	a makromolekula saját térfogatát figyelembe vevő korrekciós állandó (the correction constant for the macromolecule's own volume)	cm ³ /g

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
3D-s	háromdimenziós (three dimensional)
DIC	digitális képkorreláció (digital image correlation)
DMA	dinamikus mechanikai vizsgálat (dynamic mechanical analysis)
DSC	differenciális pásztázó kalorimetria (differential scanning calorimetry)
PC	polikarbonát (polycarbonate)
PMMA	polimetil-metakrilát (poly(methyl methacrylate))
PP	polipropilén (polypropylene)
PS	polisztirol (polystyrol)
WLF	Williams–Landel–Ferry egyenlet (Williams–Landel–Ferry equation)

1. BEVEZETÉS

A polimerek mára a legtöbbet használt [1] szerkezeti anyagok, ezért a műanyagipar (alapanyag-előállítás és feldolgozás) a gazdaság egyik meghatározó eleme. 2021-ben 391 millió tonna műanyagot állítottak elő vagy dolgoztak fel világszinten [2], Magyarországon közel 2,7 millió tonnát [3]. A legelterjedtebb feldolgozási módszer a fröccsöntés, amelynek lényege, hogy egy zárt szerszámba nagy sebességgel, nagy nyomással kis viszkozitású polimer ömledéket juttatva állítják elő a háromdimenziós (3D-s) terméket [4]. A technológia szakaszos, ennek ellenére termelékeny, Magyarországon 2018-ban 328 000 tonna terméket állítottak elő ezzel a technológiával [3].

A fröccsöntéssel előállított termékekbe lehetőség van előgyártmányok elhelyezésére, ezek előre, egy külön eljárással előállított alkatrészek, amelyek fröccsöntési ciklus elején, a befröccsöntés előtt kerülnek be a szerszámba. Ezek az előgyártmányok különböző céllal kerülhetnek be a termékbe, a legelterjedtebb ezek közül az inzertes csavarkötés előállítása, de vannak olyanok, amelyek a termék erősítését szolgálják. Alapanyaguk lehet fém, polimer, kerámia, illetve kompozit is, polimer esetében akár additív gyártástechnológiával előállított inzertek is alkalmazhatóak. Ebben az esetben lehetőség van az építési irány megválasztására, ami hatással van az inzert mechanikai tulajdonságaira és így közvetetten a termék mechanikai tulajdonságaira is.

A fröccsöntés során az inzertnek el kell tudnia viselni a ciklus közbeni terheléseket. A fellépő terhelések megismerésének egyik módja a számítógéppel segített modellezés és numerikus számítás. A fröccsöntési szimulációk segítenek mind a szerszámtervezésben, mind a technológiai folyamat paramétereinek optimalizálásában [4]. Ezeknek a számításoknak fontos tényezője az alkalmazott állapotegyenlet, illetve a számításokra szánt idő nagysága is, mivel ezek nagyban befolyásolják a szimulációk pontosságát [5].

Dolgozatom célja meghatározni a legfontosabb peremfeltételeket, modellezési és anyagparamétereket, majd numerikus modellek és számítások elvégzése az inzertek deformációs viselkedésének vizsgálatára. A számítások elvégzése után az eredményeket kiértékelem és összehasonlítom az inzertek valós viselkedésével. Az eredmények alapján a fontosabb eltérések és ezek lehetséges okait meghatározom, ha szükséges további pontosításokat végzek.

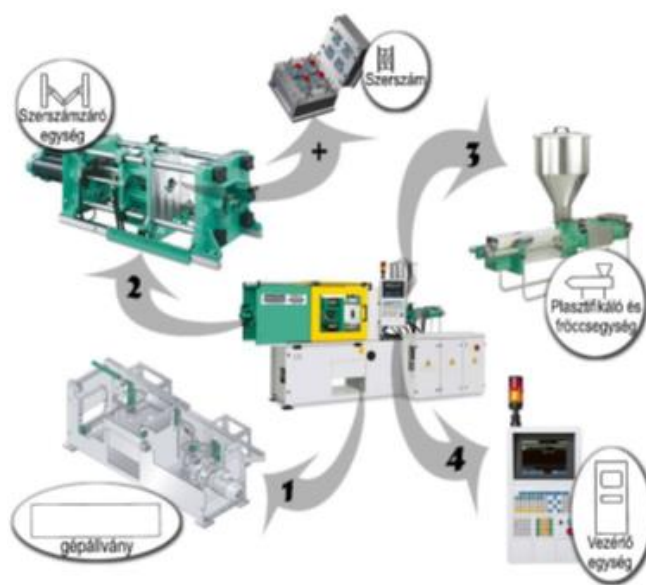
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Ebben a fejezetben bemutatom a fröccsöntés folyamatát, kiemelve a ciklus során fellépő szerszámot ért mechanikai igénybevételeket, illetve a szerszámok ciklus közbeni viselkedésének numerikus modellezési lehetőségeit.

2.1. Fröccsöntés

A fröccsöntés az egyik legfontosabb polimerfeldolgozási technológia a mai műanyagiparban. Ezzel a technológiával hulladékmentesen elő lehet állítani a tetszőleges 3 dimenziós (3D-s) terméket. A fröccsöntés alapelve, hogy a viszkozusan folyós állapotban lévő alapanyagot nagy sebességgel és nagy nyomással a zárt alakadó szerszámba juttatják és megfelelő ideig zárva tartva a szerszámot alakul ki a termék. Alapanyagát tekintve lehet termoplasztikus és nem termoplasztikus is, azonban főként termoplasztikus alapanyagot dolgoznak fel ezzel a technológiával. Ebben az esetben az alapanyagot olvadáspont fölé kell melegíteni, illetve a zárt szerszámban kell kontroláltan lehűteni és csak ezután lehet eltávolítani a szerszámból [4].

A fröccsöntőgép (1.ábra) négy fő részből áll, ezek a gépállvány (1.ábra/1), a szerszámzáró egység (1.ábra/2), a fröccsaggregát (1.ábra/3) és a vezérlő egység (1.ábra/4). Maga a szerszám (1.ábra/+) nem tartozik a fröccsöntőgép főegységei közé, mivel egy géphez több szerszám is tartozhat [6].

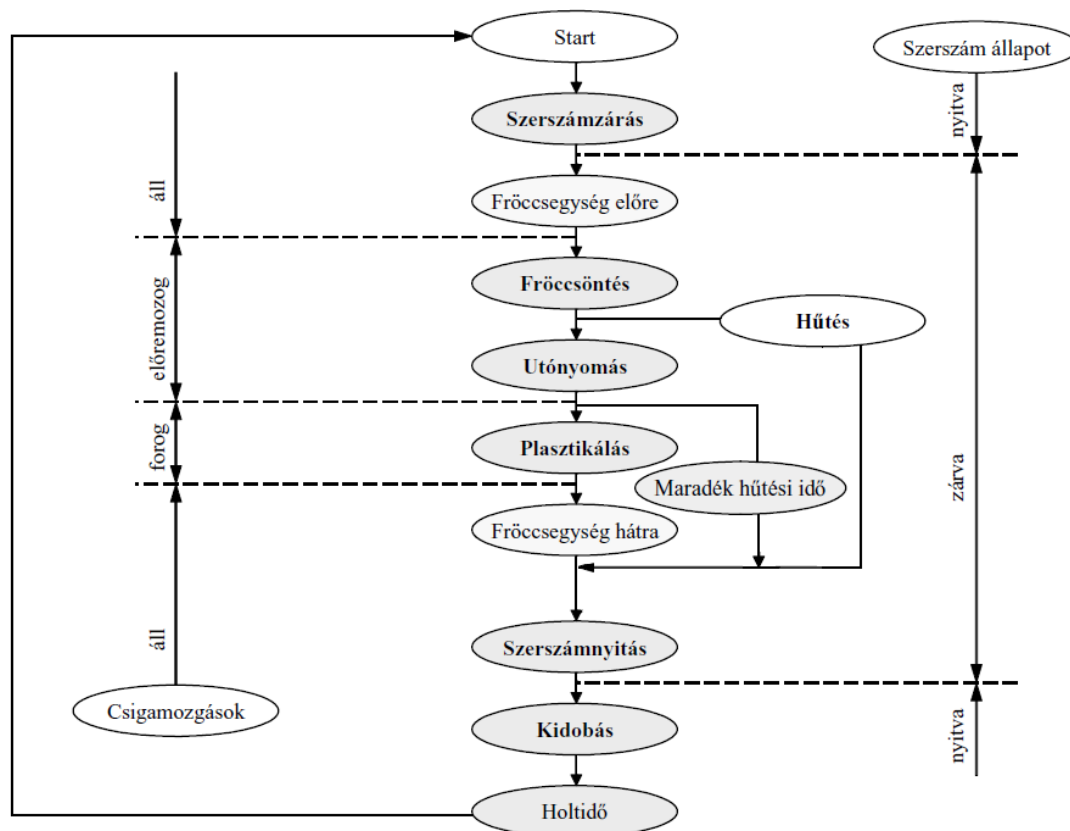


1. ábra: A fröccsöntő gép részegységei (1) gépállvány, 2) szerszámzáró egység, 3) fröccsaggregát, 4) vezérlő egység, +) szerszám) [6].

Termoplasztikus alapanyag esetén a feldolgozás során az alapanyag három fő folyamaton megy keresztül. Az első az alakítható állapotba hozás, amikor is a granulátum formájú alapanyagot viszkozusan folyós állapotba hozzák, ezt nevezik plasztifikálásnak. A második folyamatban történik a befröccsöntés ez az alakadás

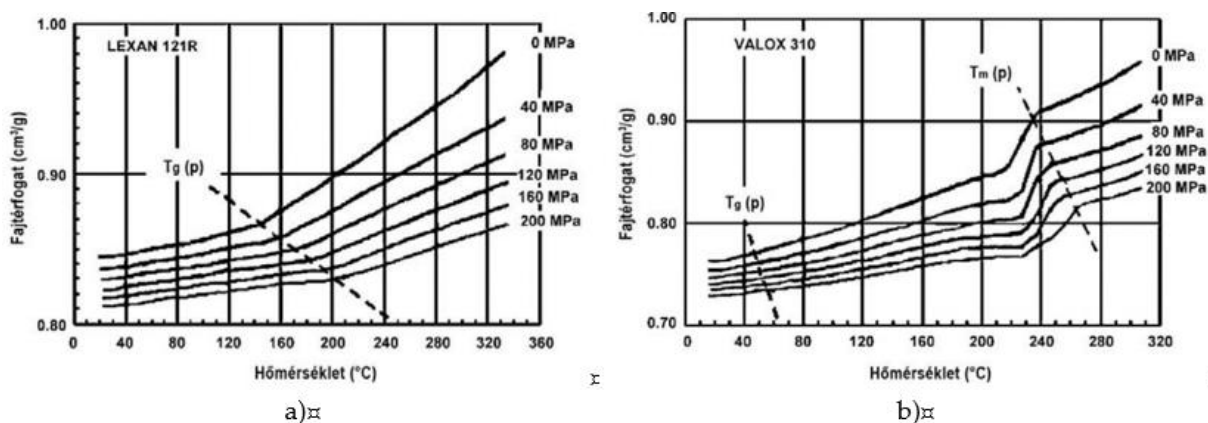
folyamata. A végső folyamat pedig az alakrögzítés, azaz amikor a zárt szerszámban kontroláltan lehűtik az alapanyagot, amíg az olyan állapotba kerül, hogy biztonságosan el lehessen távolítani a szerszámból [6].

Egy fröccsöntési ciklus kétféleképpen lehet jellemezni, az egyik a mechanikai mozgáselemek tükrében, a másik az állapothatározók függvényében. Az első esetben a ciklus 6 szakaszból áll, amelynek kezdete a szerszámzárás. A második lépésben a fröccsegység előre mozdul és rázár a szerszámmra, a harmadik lépés maga a fröccsöntés, amit a csigadugattyú tengelyirányú mozgása által történik meg. Ezt követően történik az utónyomás, amelyre azért van szükség, mivel az ömledék hőmérséklete csökken, ahogy a hidegebb szerszámmal ér és ennek következtében fajtérfogata csökken, ennek kompenzálására további ömledéket juttatnak a szerszámba, ami a csiga lassú előre mozgásával érhető el. A negyedik szakaszban történik az újabb ciklushoz szükséges alapanyag előállítása, azaz a plasztikálás, amely során a csiga forogva hátrafelé mozog, így előállítva a kívánt anyagmennyiséget, illetve a maradék hűtés is ebben a szakaszban történik. Maga a hűtés viszont, már a befröccsöntés után elkezdődik. Az ötödik szakaszban a fröccsegység hátra mozog, hogy elváljon a szerszámtól, így megszüntetve a hőátadást a szerszám és a fröccsegység között. Az utolsó szakaszban pedig a szerszám nyitása és a termék kidobása történik meg [4]. A 2. ábrán látható a fröccsöntés folyamata a részletezett szakaszokkal.



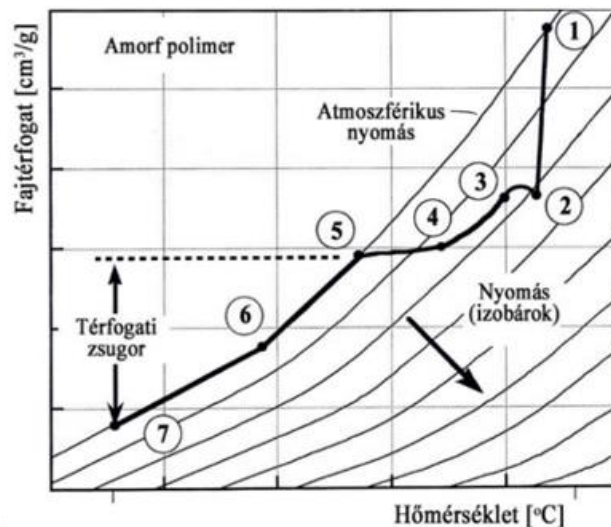
2. ábra A fröccsöntés folyamata [7].

A másik módszer az állapothatározók függvényében vizsgálja a fröccsöntési ciklust. Ezek az állapothatározók: a nyomás (p), a hőmérséklet (T) és a fajtérfogat (v), amiknek nagy jelentősége van a folyamat optimalizálásában. Közös diagramban ábrázolva az állapothatározókat meg lehet állapítani, mind az amorf polimerek mind a részben kristályos polimerek esetén az üvegesedési hőmérsékletet (T_g), részben kristályos polimerek esetén a kristályolvadási hőmérsékletet (T_m) is. Ez onnan következik, hogy a polimerek fajtérfogatát nagyban befolyásolja a külső nyomás és a hőmérséklet [3, 4, 6]. A 3. ábra/a-n egy amorf polimer tipikus p - v - T diagramja, a 3. ábra/b-n pedig egy részben kristályos polimer p - v - T diagramja látható.



3. ábra Tipikus p - v - T diagram amorf (a) és részben kristályos (b) polimer esetében [8].

A fröccsöntési folyamatot a p - v - T diagram (4. ábra) alapján vizsgálva is 6 szakaszra lehet bontani. Az első szakaszban (egyes és kettes pont között) történik a befröccsöntés, ahol a nyomás nő, ahogy az ömledék kitölti a szerszámüreget. A második szakaszban (kettes és harmas pont között) történik az átkapcsolás utónyomásra, maga az utónyomás pedig a négyes pontig tart. Itt történik a gátfagyás, azaz a legkisebb keresztmetszetű rész megszilárdul, ezután a termék fajtérfogat csökkenését nem lehet kompenzálni további anyag többlet bejuttatásával. Ezután a termék hűtése következik először állandó fajtérfogaton (négyes és ötös pont között), majd ahogy eléri az atmoszférikus nyomást, állandó nyomáson (ötös és hatos pont között), az ötös ponttól elkezdve a termék zsugorodni kezd. A szerszám kinyitása és a termék kidobása a hatos pontban következik be. A hatos és hetes pont között a termék további hűlése és zsugorodása történik, szerszámon kívül, környezeti hőmérsékleten folytatódik [5].



4. ábra A fröccsöntési folyamat p-v-T diagramja [6].

Az állapotváltozók közötti összefüggést Spencer és Gilmore írta le oly formában, hogy az az egyetemes gáztörvényhez hasonló leírást adjon (1):

$$(p + \pi)(v - \omega) = \frac{RT}{M} \quad (1)$$

ahol p a nyomás, v a fajtérfogat, R az egyetemes gázállandó, T a hőmérséklet, M a polimert alkotó monomer móltömege, π anyagfüggő nyomáskorrekciós állandó és ω térfogat jellegű korrekciós állandó [4].

2.2. Fröccsöntő szerszámok

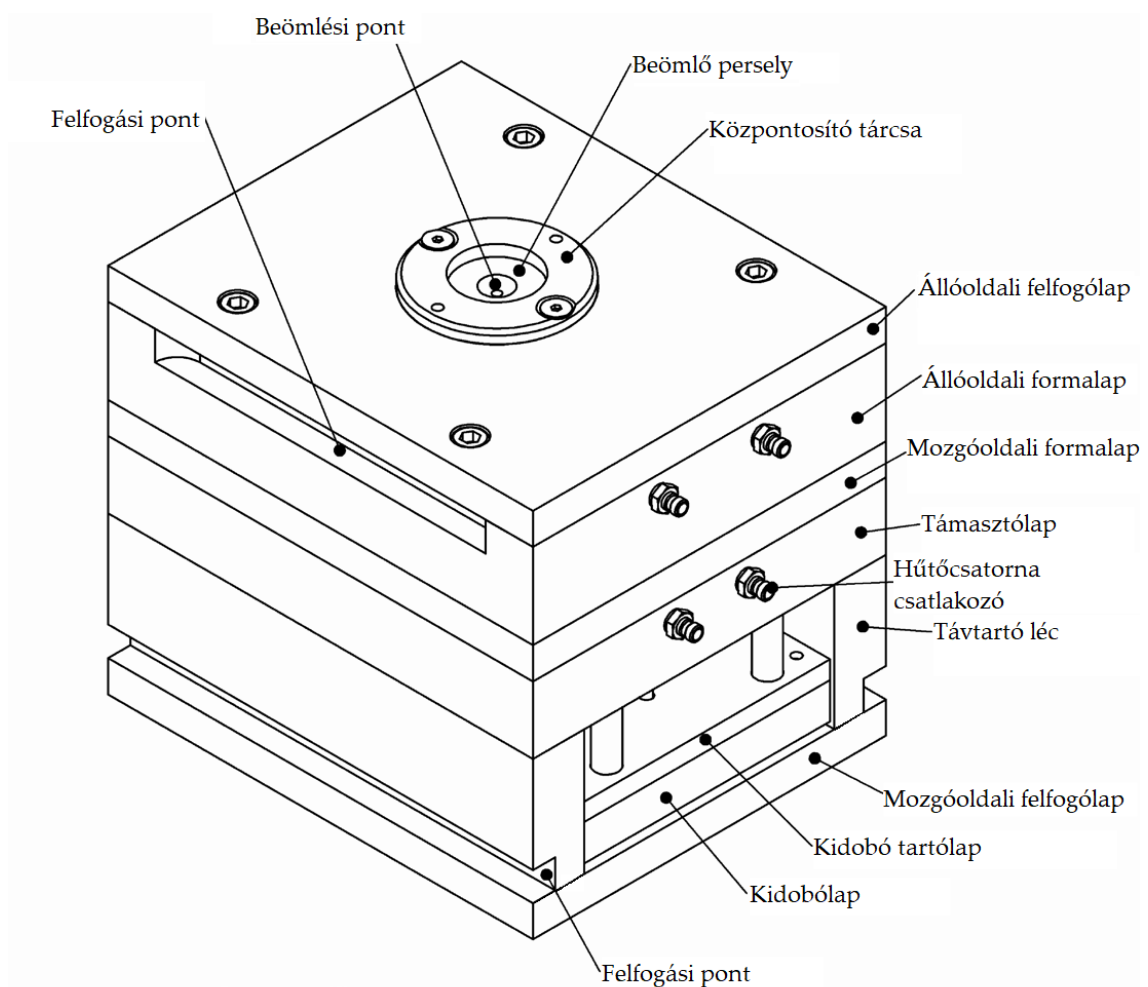
A fröccsöntőszerszám egy olyan komplex szerkezet, aminek több követelménynek kell megfelelnie a fröccsöntés során. Az egyik legfontosabb követelménye, hogy a polimerömléket a szerszámüregben tartsa és ezáltal a polimerömlék megfelelően kitöltse a szerszámüreget, így létrehozva a kész terméket. A másik feladata a nagyhőmérsékletű polimerömlék által bevitt hő elvezetése és átadása a szerszámban áramló hűtőközegnek, úgy, hogy a termék a lehető legegyszerűbben és leggyorsabban hűljön. A harmadik feladata, pedig a termék eltávolítása a szerszámból, anélkül, hogy a termék nagy feszültségnek lenne kitéve [9].

2.2.1. A fröccsöntő szerszámok szerkezeti felépítése

Egy fröccsöntő szerszámnak nagyon sok alkatrészre van szüksége, hogy a vele támasztott követelményeknek és feladatokat eleget tegyen. Nagyon sok technikai megoldású szerszám létezik, az egyik legegyszerűbb a kétlapos, hidegcsatornás szerszám [9].

Egy tipikus kétlapos szerszámot mutat az 5. ábra. A szerszám különböző lapokból áll, amiket belsőkulcsnyílású csavarok tartanak össze. Az állóoldaltól kezdve ezek a következők: állóoldali felfogó lap, ennek segítségével rögzítik a szerszámot a gépre,

az állóoldali formalap, ebben helyezkedik el a formabetét, általában a csésze oldal, utána következik a mozgóoldali szerszámbetét, amiben szintén a formabetét helyezkedik el, de ez a mag betét, ez az elrendezés lehetővé teszi, hogy a mozgóoldali betétre zsugorodjon rá a termék és így könnyen eltávolítható legyen. Ezután egy támasztólap következik, erre a lapra nem minden esetben van szükség, ezután a kidobó rendszer lapjai következnek, ami a kidobótartólap és a kidobólap, a kidobótartólap tartja meg az egyes kidobókat és pozícionálja őket, a kidobólap pedig a kidobókat támasztja meg illetve biztosítja az egyenletes elmozdulást, a kidobás ilyen megvalósulásához szükség van arra, hogy a kidobólapok szabadon tudjanak mozogni, ennek biztosításra szolgál a távtartó lécz, az utolsó lap a mozgóoldali felfogó lap, aminek ugyanaz a feladata, mint az állóoldali felfogólapnak [9].

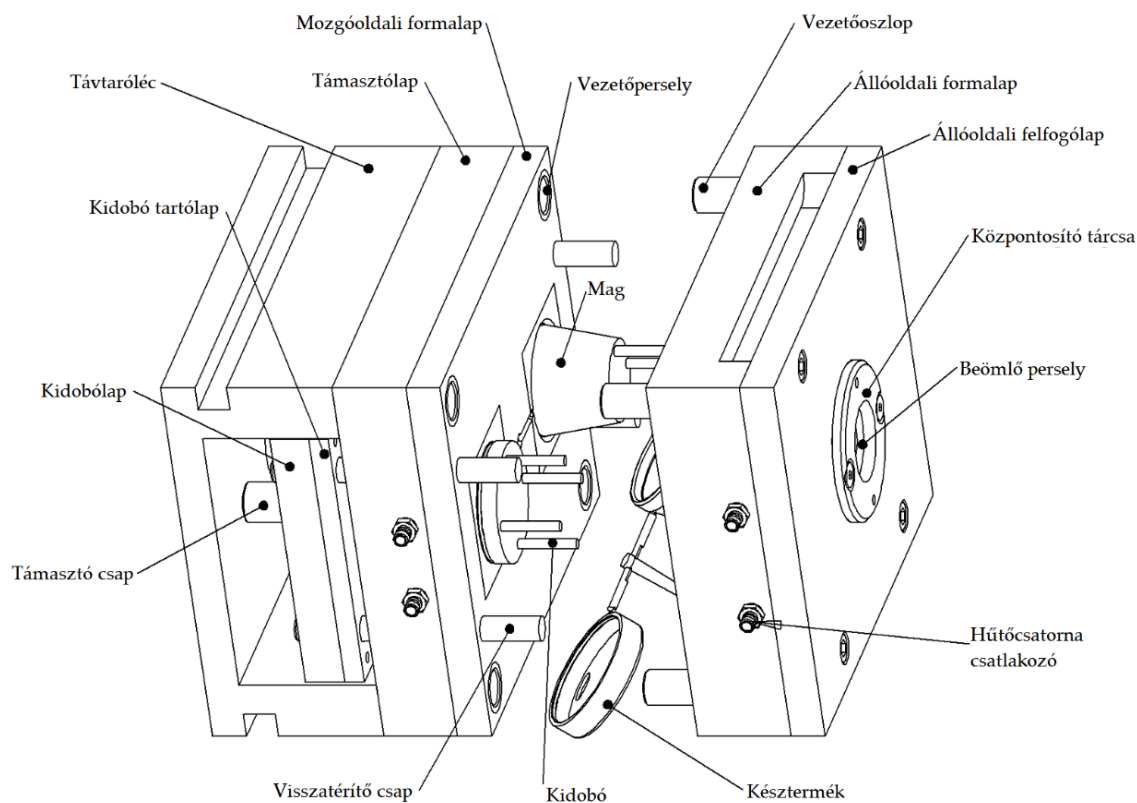


5. ábra: Kétlapos fröccsöntő szerszám részei zárt állapotban [9].

A központosító tárcsa általában a szerszám közepén helyezkedik el, ennek segítségével illesztik össze a szerszámot és a fröccsöntő gép szerszámfelfogólapját, hogy a fröccsegység rá tudjon zárni a szerszámmra és az ömledék ne jusson ki a befröccsöntés során. Egy ilyen központosító tárcsa a mozgóoldali felfogólapon is

található, ez azt a célt szolgálja, hogy a kidobó rendszer megfelelően csatlakozzon a fröccsöntő egység kidobó-mechanizmusához [9].

A szerszám nyitásakor az osztósíkból fog szétválni, ez a sík a két formalap között van. Ezt az állapotot mutatja a 6. ábra.



6. ábra: Kétfalpos fröccsöntő szerszám részei nyitott állapotban [9].

Kidobáskor a gép kidobórendszere előre mozdítja a kidobólapot és a hozzátartozó kidobókat, így eltávolítva a terméket a szerszámból. A kidobórendszer további elemei a visszatérítő csapok, amelyek átmérője sokkal nagyobb, mint a kidobóké, illetve hosszabbak is, ezekre, azért van szükség, hogy ha a kidobáskor a kidobólap nem tér vissza a helyére, akkor záráskor ezek ütköznek fel az állóoldalra, így visszatérítik a kidobólapot a helyére, a nagy átmérőre a nagy erők miatt van szükség [9].

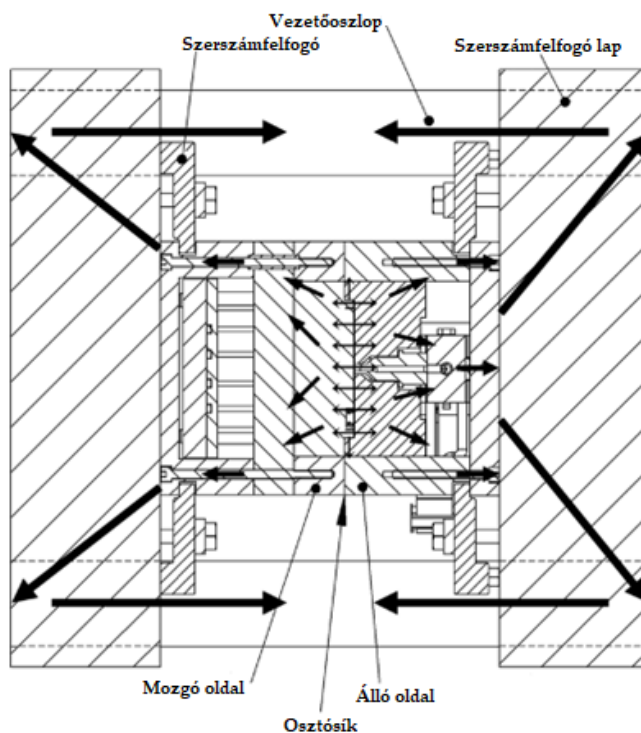
A 6. ábraán egy kétfészkes szerszám látható, azonban a költségcsökkentés és a gyorsaság miatt ennél több fészkekkel rendelkező szerszámokat is használnak. Nagy termék esetében azonban egyfészkes szerszám is lehetséges. A fészekszám mellett az elosztócsatorna típusa szerint is lehet csoportosítani a szerszámokat. Az elosztócsatorna lehet hidegcsatornás, ebben az esetben a beömlő- és elosztócsatorna a termékkel együtt eltávolításra kerül, a szigetelt csatornás, itt a csatorna nem szilárdul meg hanem ömledék állapotban marad, ezt úgy érik el, hogy a beömlő- és elosztó csatornát olyan nagy keresztmetszetűre tervezik, hogy az ömledéknek csak egy része szilárdul meg és ez viselkedik hőszigetelő réteggént, így gátolva a csatorna teljes megszilárdulását.

A harmadik fajtája az elosztócsatornáknak a forrócsatornás rendszer, mely esetében szintén nem szilárdul meg az elosztócsatornában lévő anyag, mivel azt a csatorna köré épített elektromos fűtés a beállított hőmérsékleten tartja. Hidegcsatorna esetén előfordul az úgynevezett háromlapos szerszám, mely esetében a beömlő- és elosztócsatorna egy külön osztósíkban kerül eltávolításra [9].

Egyéb szerszámtípusok a család szerszámok, etázs szerszámok és a kocka szerszámok. A család szerszámok többfészkesek, azonban az egyes fészkekben nem ugyanazokat a termékeket állítják elő, hanem az összetartozó termékeket, amelyek egy későbbi lépésben szerelnek össze. Az etázs szerszámok, amelyek esetében egyszerre több osztósíkban lehetséges a fröccsöntés. A kocka szerszám esetében a szerszám négy oldalú és egyszerre két oldalára fröccsöntenek rá, míg a másik kettőről történik a kidobás [9].

2.2.2. A ciklus során fellépő mechanikai igénybevételek

A fröccsöntőszerszámoknak a ciklus során a polimer ömledék miatt hatalmas nyomást kell kibírniuk. A szerszámüregben létrejött nyomás több tíz tonnás vagy akár több ezer tonnás erővel terheli a szerszámelemeket. Ezért a szerszámot úgy kell megtervezni, hogy ezeket az erőket kibírja tönkremenetel nélkül. A 7. ábra mutatja egy tipikus szerszámban ébredő feszültségeket a fröccsöntési ciklus során. A ciklus során mind nyomó, mind nyírófeszültség hat a formabetétekre és a támasztó lapokra is, ezeket az ábrán az átlós nyilak mutatják [9].



7. ábra: A fröccsöntés során fellépő feszültségek iránya [9].

A gép szerszámfelfogó lapjaira hajlító igénybevétel is hat a folyamat során. Csak a szerszámot tekintve a mozgó és álló oldal feszültségi állapota jelentősen eltér. Az álló oldali formabetétet közvetlenül támasztja alá a tartólap és a szerszámfelfogó lap, így ez a betét szinte tisztán nyomó igénybevételnek van kitéve. A mozgó oldali formalapot azonban nem támasztja teljesen alá a támasztólap a kidobórendszer elhelyezkedése miatt. Így a mozgó oldali formalapban nyomó és nyírófeszültség is ébred, ennek hatására jelentős hajlító feszültség is ébred benne [9].

Egy szerszám mechanikai méretezésénél fontos szempont, hogy a szerszámot érő terhelés kisebb legyen egy úgynevezett határfeszültségnél. Ezt a határfeszültséget kétféleképpen lehet meghatározni: vagy megegyezik ez a szerszám anyagának folyáshatárával és ekkor ellenőrizni kell, hogy a szerszámot érő legnagyobb terhelés is kisebb, mint a folyáshatár. A másik módszer, amikor a folyáshatárt elosztják egy biztonsági tényezővel, így megkapva a határfeszültséget, ennél nagyobb feszültség nem megengedhető a szerszámban. Azonban a szerszámok a méretezés ellenére is a határfeszültség alatt tönkre mennek, ennek oka a ciklikus terhelés. Minden egyes ciklus lehetőséget ad egy-egy kis repedés keletkezésére, ezek a kis repedések ezután a ciklikus terhelés hatására növekedni kezdenek, végül a repedésterjedés kritikussá válik, így a szerszám tönkre megy, ez a fáradásos törés. Emiatt a méretezést célszerű egy úgynevezett kifáradási határra elvégezni, ha az adott anyagnak értelmezhető kifáradási határa, a kifáradási határ az a legkisebb feszültség, ami végtelen idő elteltével sem okoz törést az anyagban. Így a kifáradási határt is figyelembe véve a határfeszültség leírható a (2) képlettel:

$$\sigma_{határ} = \min \left(\frac{\sigma_e}{f}, \sigma_D \right), \quad (2)$$

ahol $\sigma_{határ}$ a határfeszültség, σ_e a folyáshatár, f a biztonsági tényező, σ_D a kifáradási határ [9].

Fröccsöntő szerszámok esetében azonban sokkal jelentősebb hiba lehet a túlzottan nagy alakváltozás. Ennek oka az, hogy nagy hajlító igénybevétel estén az osztósíkban a formabetétek deformálódnak, így nem illeszkednek megfelelően és az osztósík mentén bekövetkezik a sorjásodás. Ez a deformáció olyan nagy is lehet, hogy a szűk tűréshatárok esetén a szerszám méretei kiesnek a tűrésmezőből. A hajlítás nem csak a szerszámban jelentkezik, hanem a gép szerszámfelfogó lapjain is, igaz itt az alakváltozás egy nagyságrenddel kisebb, mint a szerszámban keletkező alakváltozás [9].

Az alakváltozás csökkentésének legegyszerűbb módja a lapok vastagságának növelése, ez abból következik, hogy a vastagság növelésével nő a szerszámlap merevsége. Ezt azonban nem lehet minden határon túl növelni, mivel így egyrészt nehéz és nagy lesz a szerszám, ami befolyásolja a feldolgozó gép nagyságát, másrészt drága lesz a szerszám [9].

Ha a szerszámlap teljesen alá van támasztva az alatta lévő szerszámlapokkal és a szerszámfelfogó lappal, akkor a fő igénybevétele a nyomó igénybevétel, ilyenkor a hajlítás elhanyagolható. Ez a nyomó igénybevétel a szerszámlapokon eloszló

terhelésként jelenik meg a szerszámzáró erő miatt. Ebben az esetben a feszültséget a (3) egyenlettel lehet kiszámolni:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (3)$$

ahol σ a feszültség MPa-ban, F az erő N-ban, A pedig a keresztmetszete mm²-ben. A deformációt pedig az egyszerű Hooke-törvénnyel lehet kiszámolni (4)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (4)$$

ahol az ε a nyúlás mm/mm-ben, σ a feszültség MPa-ban, E pedig a rugalmassági modulus MPa-ban [9].

Az alakváltozást pedig az (5) egyenlettel lehet kiszámolni:

$$\delta_{nyomó} = \varepsilon \cdot L, \quad (5)$$

ahol az $\delta_{nyomó}$ az alakváltozás mm-ben, ε a deformáció mm/mm-ben, L pedig a szerszám magassága mm-ben [9].

Ha a lap hátoldala nincs teljesen alátámasztva, akkor nyírófeszültségek alakulnak ki, és a lap meghajlik. A lap hajlítása tipikus probléma a kilökölapok és a szerszám ürege között, a szerszám mozgó oldalán elhelyezkedő lapok esetében:

$$\tau = \frac{F}{A}, \quad (6)$$

ahol τ a nyírófeszültség MPa-ban, F az erő N-ban, A pedig a felület mm²-ben [9].

A mozgóoldali felfogólap és a támasztólap között elhelyezett tartóoszlopok használatával a lapok hajlása jelentősen csökkenthető. Általában a támasztóoszlopokat a legjobb közvetlenül a szerszámüreg azon részei alatt elhelyezni, amelyek jelentős erőt fejtenek ki. A szerszámlapok közvetlen alátámasztásával a lapokat ért nyírófeszültségek és hajlító igénybevételek jelentősen csökkenthetők. Sajnos a támasztócsapok elhelyezése ütközhet más alkatrészekkel, beleértve a kilököket és a kidobószárat. Ezért a támasztócsapok különböző elrendezéseit és méreteit elemezni kell. Ha a szerszámlapok hajlítása kritikus kérdés, akkor a kidobószerszék elrendezését úgy lehet módosítani, hogy több nagyméretű támasztócsap legyen az ideális helyeken [9].

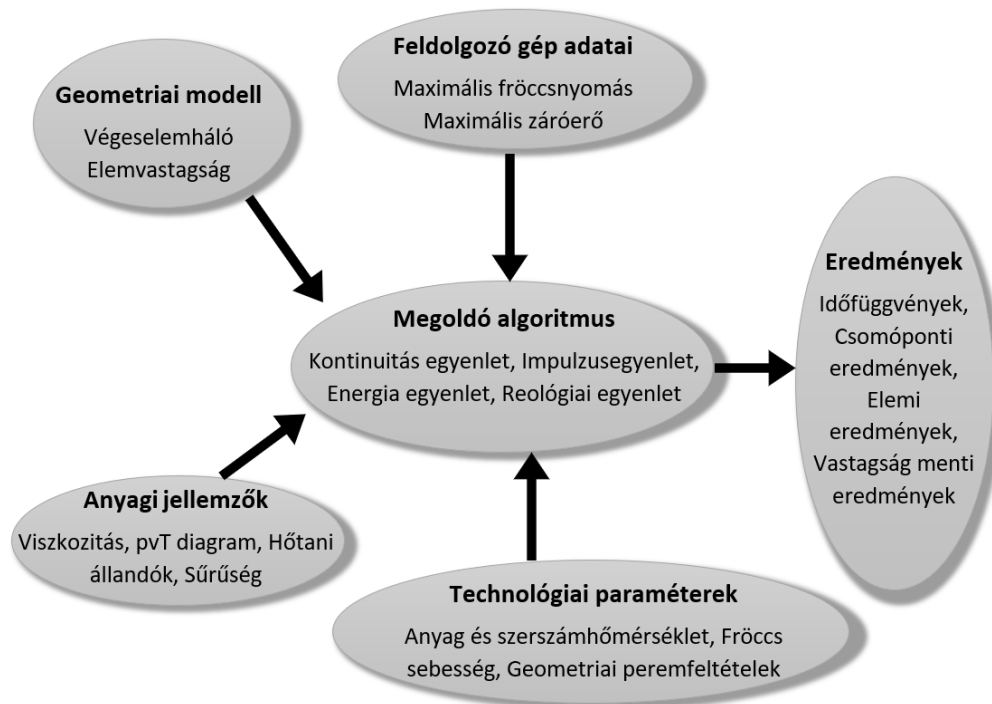
2.3. Numerikus modellezés

A fröccsöntési technológia numerikus modellezése során számítógép segítségével megoldunk egy egyenletrendszert a hozzá tartozó peremfeltételek és kezdeti feltételek figyelembevételével, amely a fröccsöntési folyamat matematikai modelljét alkotja. Általánosságban elmondható, hogy a mai szimulációk hatalmas mennyiségű számított adatot eredményeznek, amelyeket gyakran valamilyen konkrét, érdeklődésre számot tartó változó színes kontúrdiagramjaiként jelenítenek meg, mint például:

- kitöltési minták,
- nyomáseloszlások,
- zsugorodások,

- a vizsgált alkatrész vetemedése [10].

A fröccsöntés szimulációjához számos paraméterre van szükség, ilyen a geometria modell, feldolgozó gép adatai, a technológia paraméterek és az anyagtulajdonságok. A szimulációs programok működési vázlatát mutatja a 8. ábra.



8. ábra: A fröccsöntési szimulációs programok működési vázlata [7].

A geometria modelleket hálózásnak kell alávetni, hogy a program képes legyen számolni velük. Ezt többféleképpen lehetséges megoldani, lehet középsíkhálózás, lehet felületi hálózás és térfogati hálózást alkalmazni [6, 9].

Geometria peremfeltételek: nyomással kapcsolatos peremfeltételek a következők:

- Bármely át nem eresztő határon a nyomásgradiens a határra merőleges irányban nulla. Az át nem eresztő határok a szerszám szélei, a szerszámfalak és bármely szerszámbetét.
- Az ömledék q áramlási sebessége vagy a p nyomás azon a felületen van megadva, ahol az olvadék belép az üregbe.
- Feltételezve, hogy a nyomás a szerszámüregben atmoszférikus, a nyomás nulla az ömledékfronton [10].

Hőmérséklettel kapcsolatos peremfeltételek:

- Az ömledékfront hőmérséklete azonos minden pontban.
- A hőmérséklet minden szerszámhatáron definiált. Azonban megengedhető, hogy az egyes határfelületeken különböző hőmérsékleteket írjanak elő [10].

A fröccsöntés szimulációjához szükséges anyagtulajdonságok a végrehajtandó szimulációtól függenek. Az áramláselemzéshez (befröccsöntés, utónyomás és hűtés) a következőkre van szükség:

- viszkozitás modell,
- fajhő,
- hővezetési tényező,
- átmeneti hőmérséklet, ez az a hőmérséklet, amely alatt az ömledéknek annyira nagy lesz a viszkozitása, hogy szilárd testnek tekinthető,
- pVT adatok [10].

Amennyiben a szimulációs szoftver felhasználója zsugorodást és vetemedést kíván szimulálni, további alapanyag tulajdonságokra van szükség, mint például:

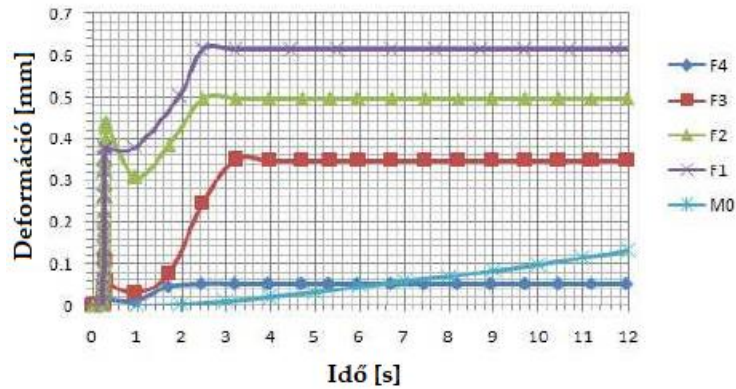
- rugalmassági modulus,
- nyírási modulus,
- Poisson tényező,
- hőtágulási együttható [10].

2.3.1. Szerszám és inzertdeformáció modellezési lehetőségei

A mag a szerszámnak azon része, amely az alkatrész belsejét alakítja ki. A hosszú konzolos maggal rendelkező szerszámokat karcsú, zárt végű üreges alkatrészek gyártására használják. Ha a befrocsöntési, utónyomási és maradék hűtési fázisok során a mag felületén a nyomáseloszlás nem feltétlenül egyenletes, az ilyen mag deformálódhat, így a kész darab nem lesz megfelelő geometriájú. A mag helyzetének térbeli eltérését magdeformációnak nevezzük [10].

A magdeformációs jelenségének szimulációjához egy folyadék-szilárd anyag kölcsönhatási probléma megoldására van szükség. A mag szerkezeti elemzése párosul a képlékeny áramlás elemzésével. A folyadéknyomás oldalirányú erőt fejt ki a szilárd mag felületére, ami a mag elhajlását okozza, a szilárd mag elmozdulása pedig hatással van a folyadékáramlásra. Az üregnek a mag deformációja miatti geometriai változásának számításához a szimuláció során újrarahálózásra van szükség. A legegyszerűbb megoldás az, hogy a számított csomóponti elmozdulás alapján csak a folyadék-mag határfelületen lévő csomópontok helyzete kerül újraszámolásra [10].

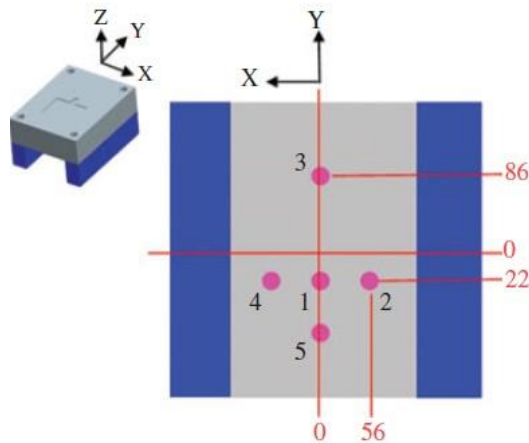
Guo és társai [11] munkájukban a megeltolódás jelenségét vizsgálták fröccsöntési vizsgálatokkal és Autodesk Moldflow Insight felhasználásával számolták is azt. Vizsgálták továbbá, a magdeformáció csökkentésének különböző megoldásait és ezeket hasonlították össze, melyik megoldás csökkenti leginkább ezt a jelenséget. A megoldások között szerepelt a jobb folyóképességű alapanyaggal való fröccsöntés, nagyobb merevségű szerszámalapanyag használata, a gát pozíciójának megváltoztatása a jobb anyagáramlás érdekében, illetve ezek kombinációja. Eredményeik alapján a legjobb eredményt a megoldások kombinációja hozott. Munkájukban egyéb megoldási javaslatot is tettek, de ezek eredményességét nem vizsgálták, úgy, mint a fröccssebesség növelése és a szerszám és az alapanyag hőmérsékletének optimalizálása [11]. Eredményeiket 9. ábra mutatja be.



9. ábra: Guo és társainak eredménye; M0 kontroll, F1 jobb folyókéességű alapanyag, F2 nagyobb merevségű szerszámalapanyag, F3 gát pozíció optimalizáció, F4 kombinált megoldás [11].

Vietri és társai [12] munkájukban egy olyan módszert mutattak be, amely figyelembe veszi a nyomásnak a viszkozitásra és az üreg deformációjára gyakorolt hatását a fröccsöntési szimulációs szoftver segítségével végzett nyomásprofilok előrejelzésére. Két amorf anyagot, egy polisztirolt (PS) és egy polikarbonátot (PC) fröccsöntve, két különböző vastagságú, téglalap alakú szerszámba az utónyomás változtatásával. Az áramlási útvonal mentén különböző pozíciókban mérték a nyomás alakulását. Ugyanezeket a vizsgálatokat a Moldflow Plastics Insight szoftver felhasználásával is szimulálták. Megállapították, hogy az egymást követő jeladó pozíciók közötti nyomásesések nagymértékben alulbecsültek, ha a szoftver adatbázisából vett paraméterekkel dolgoztak. Továbbá, mindkét anyag és minden gyártási paramétersorozat esetében a megjósolt üregnyomás túl gyorsan csökkent a hűtés során. A pontosabb előrejelzések elérése érdekében a nyomás viszkozitásra gyakorolt hatását a WLF-egyenletben (Williams–Landel–Ferry-egyenlet) a megfelelő paraméter értékének becslésével vezették be más anyagtulajdonságok kombinációjának segítségével. Végül egy olyan módszert javasoltak, amely figyelembe veszi az üreg megnagyobbodásának a nyomásprofilokra gyakorolt hatását [12].

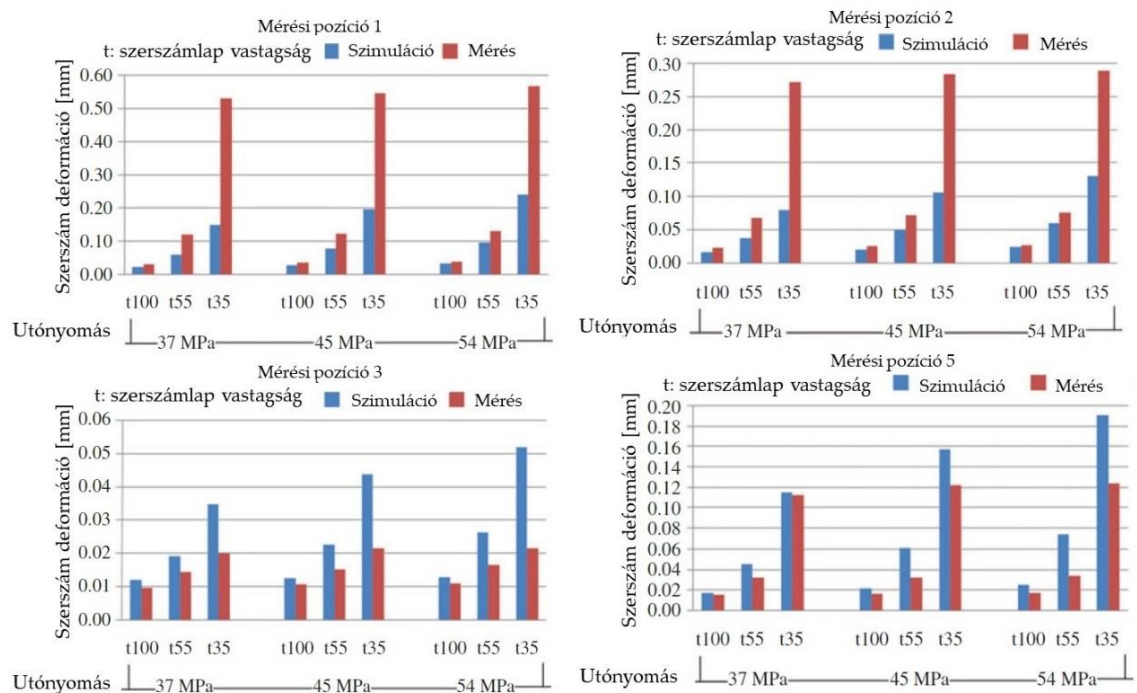
Huang és társai [13] egy hatékony megközelítést dolgoztak ki a valós idejű szerszámlaphajlítás mérésére, nevezetesen az formalap elmozdulásának mérésére, illetve számolták a folyamatot és összehasonlították a mért eredményekkel. A megjósolt üregnyomást ezután a későbbi szerszámlaphajlítás elemzés bemeneteként alkalmazták. A fröccsöntés során polimetil-metakrilátot (PMMA) használtak, amit egy 152 mm-es fényvezető lemezre fröccsöntöttek, egy 35 mm, 55 mm és 100 mm vastagságú formalappal szerelhető szerszámba. A megjósolt szerszám deformáció validálása érdekében induktív elmozdulásérzékelőt helyeztek a formalapok alá, és kísérleteket végeztek a szimulációval megegyező folyamatváltozókkal [13].



10. ábra: Mérési pozíciók Huang és társai munkájában

(1. pont közvetlenül a gát alatt, 2. pont a gáttól távol a távtartóléc közelében, 3. pont a formaüregén kívül, 5. pont a folyási út végén) [13]

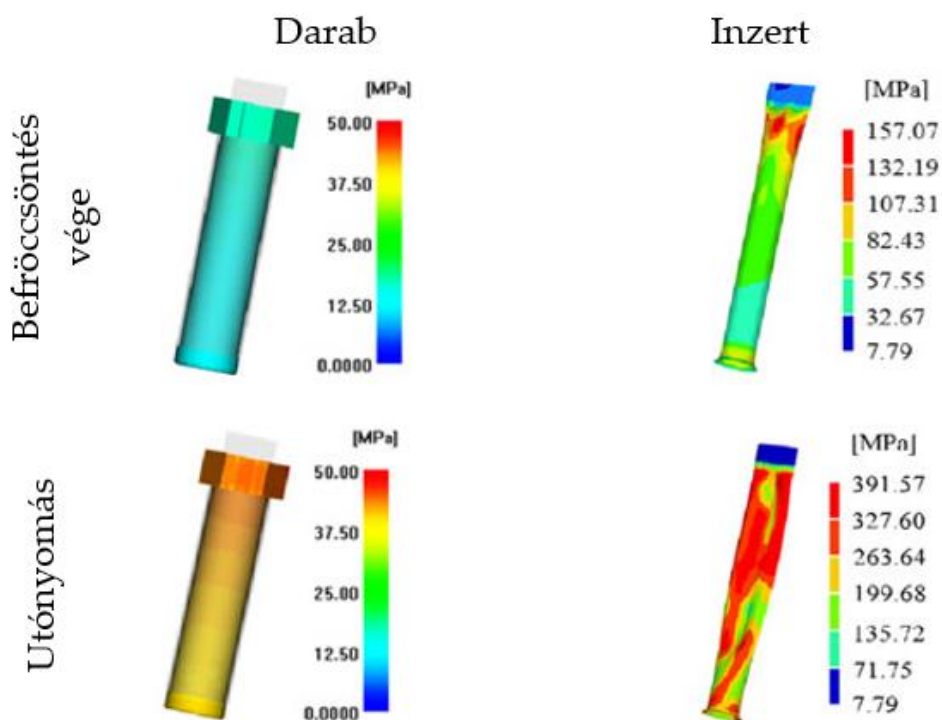
A számolt eredmények és a kísérleti adatok összehasonlítása azt mutatja, hogy az üreglemez vastagságának csökkentésekor a szerszám deformációja jelentősen megnő, és az alkatrészvastagság növekedését eredményezi. Ezenkívül az utónyomás növekedése a szerszám deformációjának növekedését okozta. Azonban közölt eredményeik alapján a nyomás nem befolyásolja szignifikánsan a deformációt [13]. Eredményeiket a 11. ábra mutatja be.



11. ábra: Huang és társainak eredményei [13].

Park és társai [14] az elektromos dugók inzertes fröccsöntését vizsgálták mivel ezeknek az alkatrészek fröccsöntési nyomás okozta képlékeny alakváltozása nem jósolható meg a hagyományos fröccsöntési elemzési módszerekkel. Munkájukban komplex elemzést végeztek a betétdarabok képlékeny alakváltozásának előrejelzésére.

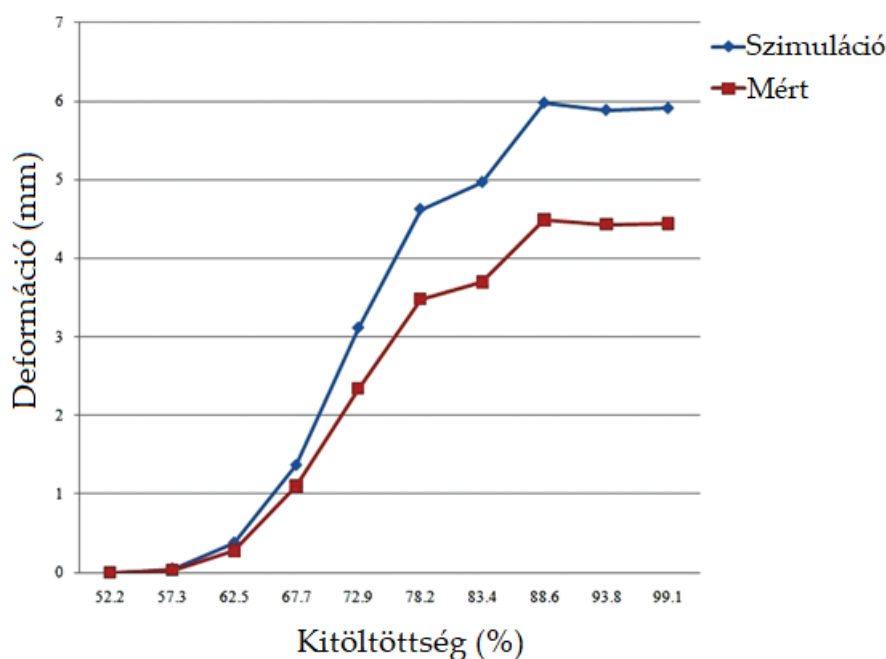
A fröccsöntési folyamat során kialakuló fröccsöntési nyomást Autodesk Moldflow 2016 felhasználásával számították ki, és a szerkezeti elemzéshez ezt adták meg peremfeltételként. A megfelelő fröccsöntési feltétel megtalálása érdekében megvizsgálták a folyamatparaméterek, például a fröccsöntési idő, az ömledék hőmérséklet és az utónyomás hatását a fröccsnyomásra és az inzertek alakváltozására. Az elemzés eredményét összehasonlították az inzertes fröccsöntési kísérlettel, a két módszer jó összhangban volt egymással így az elemzés megbízhatósága megerősítést nyert. Továbbá, a több üregből álló tápdugó szerszámban az elosztócsatorna átmérőjét optimalizálták, hogy megakadályozzák az inzertek deformálódását a lineárisan elrendezett fészkekben történő kiegyensúlyozatlan kitöltése miatt [14]. Eredményeiket a 12. ábra mutatja be.



12. ábra: Park és társainak szimulációs eredményei[14].

Colton és társai [15] additív gyártással előállított fröccsöntő szerszám deformációját mérték, analitikusan és numerikusan is számították. Munkájukban az egész ciklusra vonatkozóan vizsgálták a fellépő termikus és mechanikai terheléseket. Ehhez egy üreges testet létrehozó szerszámot készítettek és ennek vizsgálták a deformációját. A befröccsöntés hő- és nyomásállapotának meghatározására a C-Mold programot használták. Ezután ANSYS-t használva meghatározták a feszültségi állapotot. A kilökés modellezéséhez ProE és ANSYS szoftvert használtak. ANSYS-ban hőmérséklet analízist végeztek, hogy megkapják a tranziens hőmérséklet-eloszlást a szerszámon belül. Ezeket a termikus eredményeket használták a szerkezeti elemzés bemeneteként a kilökéskor fellépő feszültségi állapot meghatározásához. Eredményeik alapján a numerikus számítás által a befröccsöntéskor fellépő deformáció körülbelül 30%-kal kisebb a ténylegesen mért deformációtól [15].

Chen és társai [16] szerszám mag deformációját vizsgálták oly módon, hogy az ömledékteret a mag elfelezte és a meglövés a mag egyik oldalán történt. Így az ömledékáramlás során kialakuló nyomás deformálja a magot. A kísérlet során nagysebességű kamerás felvételeket készítettek, majd a numerikus számításokat is végeztek Moldex3D és ANSYS segítségével. Moldex3D segítségével a kitöltést vizsgálták, illetve meghatározták a nyomáseloszlást, ez a nyomáseloszlás szolgált peremfeltételként az ANSYS-ban végzett mechanikai számításnak, így kiszámítva a mag deformációját. Numerikus számításuk túlbecsüli a mért deformációt annak ellenére, hogy a viszkoelasztikus tulajdonságot nem vették figyelembe [16]. A 13. ábra mutatja az általuk mért és számított deformációt a kitöltöttség függvényében.



13. ábra: Chen és társainak eredménye [16].

Davoudinejad és társai [17] tanulmányukban fotopolimerizációs módszerrel előállított szerszámbetéteket vizsgáltak. Vizsgálták a fröccsöntési paraméterek hatását a betétek teljesítményére (élettartam, repedéskeletkezés és -terjedés, szerszámfelület minőség). A szerszámbetéteket háromdimenziós optikai méréssel elemezték és értékelték a különböző felületi jellemzőket. A COMSOL Multiphysics FE-szoftverrel háromdimenziós termomechanikai fázisváltozást tartalmazó modellt készítettek. A betét meghibásodásának lehetséges okait mind a fröccsöntési kísérletek, mind a numerikus modell segítségével azonosították. A kifejlesztett modell képes volt a szerszámban keletkező hőindukált deformációk előrejelzésére is, és annak azonosítására, hogy ez a jelenség végül hol vezethet a szerszámbetét alakjának hibáihoz. A betétet három különböző hőmérsékleten -25°C , 50°C és 100°C – vizsgálták. Eredményeik alapján a kezdeti szerszámhőmérséklet volt a legjelentősebb tényező, amely befolyásolta a repedésterjedési sebességét. Lényegesen hosszabb szerszámélettartamot figyeltek meg a 25°C -os szerszámhőmérséklet esetében. A szimulációk esetében a legnagyobb hőfeszültséget a betét függőleges szélei körül

kapták, amely összhangban van a fizikai mérések során tapasztalt repedések helyével. A betét hőmérsékletének növelésével annak folyáshatára csökkent, ami a törékremenetele nagyobb valószínűségét eredményezte. A betét alakváltozását is számolták, és a legnagyobb torzulást a 100°C-os hőmérsékleten érték el [17].

2.4. Irodalmi összegzés, kritikai elemzés és célkitűzések

Fröccsöntés alapvető gyártástechnológia a polimerfeldolgozásban, mivel gyors gyártást tesz lehetővé annak ellenére, hogy szakaszos technológia. A fröccsöntés során fellépő nyomás és erő nagy igénybevételt helyez a fröccsöntő szerszámokra, amelynek komoly hatásai lehetnek mind a szerszámmra, mind a kész termék minőségére nézve.

A fröccsöntés során lehetőség van előgyártmányok elhelyezésére is, ezeket sokféle célból helyezik el a fröccsöntés előtt a szerszámba, egyik ilyen cél a késztermék erősítése. Ezeknek az előgyártmányoknak el kell tudnia viselni a fröccsöntés közbeni mechanikai és termikus igénybevételeket.

Az additív gyártástechnológiával előállított előgyártmányok használata erősítő szerkezetként kevésbé kutatott terület. Azonban az additív gyártástechnológiával készült szerszámbetétek deformációs vizsgálatára számos példa található. Ezek elemzésével lehetőség nyílik az előgyártmányok fröccsöntés közbeni viselkedésének megismerésére. Ezekben a kutatásokban a szerszám deformáció nem csak mérésre került, hanem numerikus számításra is és az eredmények összehasonlításából a legtöbb esetben a numerikus számítás alábecsülte a tényleges deformációt.

A kifejezetten fröccsöntés szimulációs programok sok esetben nem képesek ilyen komplex folyamatok elemzésére, ezért legtöbb esetben kapcsolt szimulációkat alkalmaznak több program felhasználásával. Azonban sok esetben nem térnek ki a szerzők, arra, hogy felhasznált programból hogyan exportálták ki az adatokat és hogy importálták be azokat más programba.

Az irodalomkutatás alapján a következő célokat tűztem ki:

- additív gyártástechnológiával előállított inzertek fröccsöntés közbeni deformációs folyamatának megismerése,
- numerikus számítások elvégzése az inzert deformációkra nézve, illetve ezeknek az esetleges pontosítása.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

Az ismételhetőség és átláthatóság érdekében ebben a fejezetben összegyűjtöttem azokat az anyagokat és eszközöket, amelyeket a mérések során felhasználtam.

3.1. Felhasznált alapanyagok

Ebben az alfejezetben összegyűjtöttem a mérés során használt alapanyagokat és azoknak a tulajdonságait.

3.1.1. Fröccsöntési alapanyag

A fröccsöntés során a MOL Petrolkémia Zrt. Tipplen H 145 F típusú polipropilénjét (PP) használtam. Ez egy alacsony molekulatömegű, jó folyóképességű PP, melynek az ajánlott feldolgozási hőmérséklete 190-235 °C. Az anyag tulajdonságai az 1. táblázatban található meg.

Anyagtulajdonságok	Mennyiség
Folyásindex (230 °C /2,16 kg) [g/10 min]	29
Rugalmassági modulus (hajlításból) [MPa]	1800
Rugalmassági modulus (húzásból) [MPa]	1750
Húzószilárdság [MPa]	39
Nyúlás folyáshatárnál [%]	8
Izod ütőszilárdság (bemetszett) [kJ/m ²]	3
HDT; 0,45 MPa [°C]	128
Rockwell keménység [R skála]	104

1. táblázat: Tipplen H145 F PP anyagjellemzői.

3.1.2. Inzertek alapanyaga

Az inzertek a PolyJet technológiából adódóan fotopolimerből készültek, a felhasznált alapanyag márkaneve FullCure 835. A gyártási technológiából adódóan támaszanyagára is szükség volt, aminek a márkaneve FullCure 705. Az inzert és a szerszámbetét alapanyagának tulajdonságai a 2. táblázatban találhatók meg.

Anyagtulajdonságok	Mennyiség
Szakító szilárdság [MPa]	50-65
Szakadási nyúlás [%]	10-25
Rugalmassági modulus [MPa]	2000-3000
Hajlító szilárdság [MPa]	75-110
Hajlítási modulus [MPa]	2200-3200
HDT; 0,45 MPa [°C]	45-50
HDT; 1,82 MPa [°C]	45-50
Vízfelvétel [%]	1,1-1,5
T _g [°C]	52-54
Shore keménység (D)	83-86
Rockwell keménység	73-76
Sűrűség [g/cm ³]	1,17-1,18

2. táblázat: FullCure 835-ös fotopolimer anyagjellemzői.

3.2. Alkalmazott feldolgozó berendezések

Ebben az alfejezetben összegyűjtöttem a mérések során felhasznált eszközöket és azok paramétereit.

3.2.1. Fröccsöntőgép és szerszám

A méréseket egy Arburg Allrounder 470 A 1000-290-es fröccsöntőgépen végeztem (14. ábra). A gép 1000 kN záróerővel és 290 J fröccsmunkával rendelkezik és 470 mm az oszloptávolsága. Maximális adagsúlya 97 g.



14. ábra Arburg Allrounder 470 A 1000-290-es fröccsöntőgép [18].

A tanszéken rendelkezésre állt egy üvegbetétes fröccsöntő szerszám (15. ábra), aminek a segítségével megoldható volt, hogy a fröccsöntési ciklus során is meg tudjam figyelni az inzerterek deformációját. Maga a szerszám egy pneumatikus kidobó rendszerrel van felszerelve, hűtőkör viszont nincs kialakítva benne.



15. ábra Üvegbetétes fröccsöntőszerszám.

3.2.2. *Objet 30 Pro*

A szerszámbetét és az inzerterek Objet 30 Pro segítségével készültek (16. ábra). A gép által használt alapanyag a korábban bemutatott Fullcure 835, támaszanyagnak a Fullcure 705-t használja. A berendezés 0,028 mm-es rétegvastagsággal dolgozik egy 300x200x150 mm-es építési térben és akár 0,1 mm-es pontossággal is dolgozhat [19].



16. ábra Objet 30 pro [20].

3.3. Vizsgálati módszerek

Ebben az alfejezetben összegyűjtöttem a mérés során használt olyan berendezéseket, amelyekkel méréseket vagy méréshez szolgáló adatokat rögzítettem.

3.3.1. TA Instruments DSC Q2000 berendezés

Ahhoz, hogy megismerjem a szerszámbetét alapanyagának üvegesedési hőmérsékletét, illetve fajhőjének változását a hőmérséklet függvényében egy differenciál pásztázó kalorimetriai analízisnek (DSC- differential scanning calorimetry) vetettem alá. Ezt egy TA Instruments DSC Q2000 berendezésen (17. ábra) végeztem, amelynek a hőmérséklettartománya $-90-550^{\circ}\text{C}$ között van.



17. ábra: DSC berendezés [21].

3.3.2. TA Instruments DMA Q800 berendezés

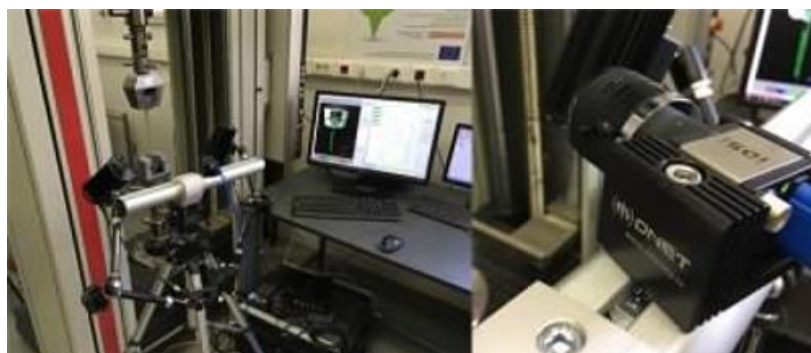
Ahhoz, hogy megismerjem a szerszámbetéthez használt alapanyag tulajdonságainak hőmérsékletfüggését, dinamikus mechanikai analízisnek (DMA- dynamic mechanical analysis) is alávettem. Ezt egy TA Instruments DMA Q800 berendezésen (18. ábra) végeztem, amelynek a hőmérséklettartománya $-145-600^{\circ}\text{C}$ között van, frekvenciatartománya $0,01-200\text{ Hz}$ között van, illetve maximális terhelése 18 N .



18. ábra: DMA berendezés [22].

3.3.3. *Mercury Monet DIC*

A felvételek kiértékeléséhez egy Mercury Monet DIC (19. ábra) berendezést akartam használni, azonban a géphez használt 5 megapixeles kamera nem volt megfelelő felbontása a képek elkészítéséhez.



19. ábra Mercury Monet DIC [23].

3.3.4. *Fényképezőgép és objektív*

A videófelvételek rögzítésére egy Nikon D600 típusú fényképezőgépet és egy Nikon AF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G típusú objektívet használtam (20. ábra).



a)



b)

20. ábra a) Nikon D600 kamera
b) Nikon AF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G objektív [24].

3.3.5. Számítógép

A numerikus számításokhoz használt számítógép egy ASUS X556U típusú laptop (21. ábra). A laptop specifikációja:

- processzor: Intel Core i7-7500U,
- memória: 8GB DDR4 RAM,
- videokártya: Nvidia GeForce 940MX,
- operációs rendszer: Windows 10 Home 64 bites operációs rendszer



21. ábra: A számításokhoz használt számítógép [25].

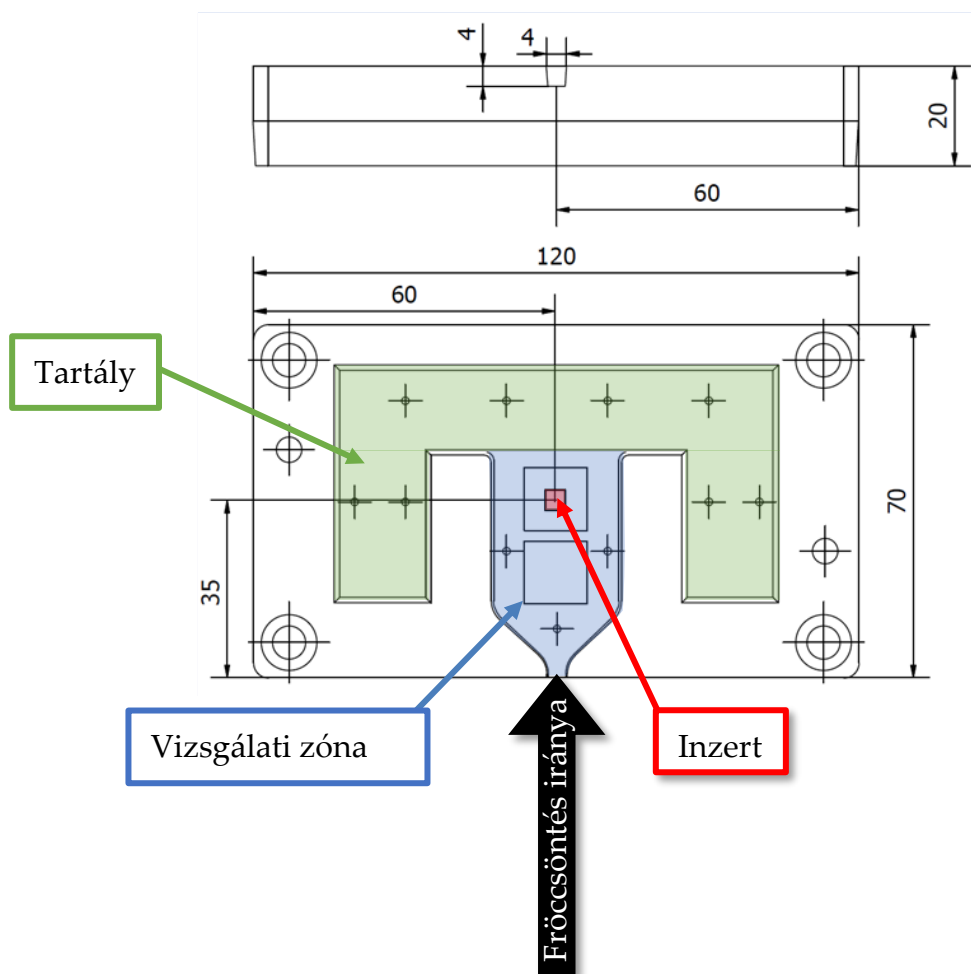
4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

Ebben a fejezetben bemutatom a kutatásom során végzett munkámat, a kísérlet megtervezésétől, az alkatrészek kialakításától, egészen a mérések elvégzéséig, illetve a kapott eredmények kiértékeléséig.

4.1. A szerszám és az inzeretek kialakítása

Munkám során olyan előgyártmányokat (továbbiakban inzeretek) vizsgáltam, amelyek additív gyártástechnológiával készültek és a kész alkatrész erősítésére szolgálnak. Ezeket az inzereteket a fröccsöntési ciklus során mind mechanikai mind termikus terhelések is érik és ezeknek ellen kell tudnia állni, ahhoz, hogy megfelelően tudja erősíteni a kész alkatrészt. Fő célom az inzereteket ért mechanikai terhelések megismerése és numerikus számítása. A numerikus számítások felhasználásával könnyen megismerhető a fröccsöntési ciklus során lejátszódó folyamatok így az ilyen inzeretek tervezéséhez nagy segítséget nyújtanak.

A szerszámberakítás-kialakítás adott volt számomra BSc szakdolgozatom alapján [26]. A kész konstrukciót mutatja be a 22. ábra.



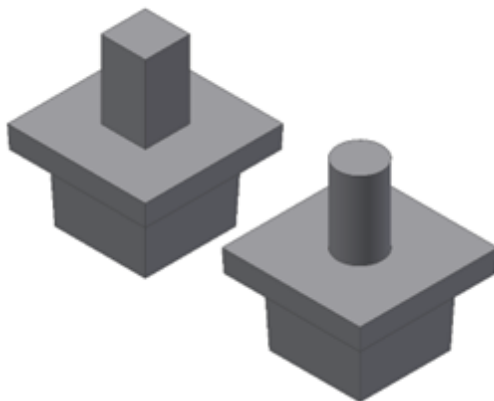
22. ábra: A szerszám kialakítás és egy négyzetes inzert behelyezve.

Kis beömlési pont és a vizsgálati zóna között finom átmenetet alakítottam ki, annak érdekében, hogy az instacioner áramlást elkerüljem, amely nehezíti a mérés kiértékelést. Vizsgálati zóna utáni tartály rész csak is a vizsgálati idő meghosszabbítása céljából alakítottam ki. A könnyű eltávolíthatóság érdekében kilökő furatokat alakítottam ki, illetve oldalferdeséggel láttam el a szerszámbetét falát és az inzertr tartórészt is.

A mérésem elve a következő, az inzertr az ömledéktérbe helyezve az érkező ömledék nyomása eldeformálja azt. Ahhoz, hogy ezt a folyamatot megfelelően tudjam vizsgálni megfelelő inzertr geometriákra is szükségem van. A számítások egyszerűsítése érdekében egyszerű geometriákat vizsgáltam, amelyek esetében a legfőbb igénybevétel a nyírás volt. Ilyen egyszerű geometriák a négyzet alapú hasábok és a kör keresztmetszetű rudak. A 3. táblázat és a 23. ábra az általam vizsgált inzertrket foglalja össze.

Keresztmetszet geometriája	Jellemző méret[mm]	Magasság [mm]	Keresztmetszet [mm ²]
Négyzet [a x a]	2	7	4
	4	7	16
	6	7	36
Kör [d]	2	7	3,14
	4	7	12,57
	6	7	28,27

3. táblázat: Inzertrk jellemzői méretei és keresztmetszeteinek méretei.



23. ábra: A vizsgálat során használt inzertrk geometriája.

4.2. Fizikai mérések

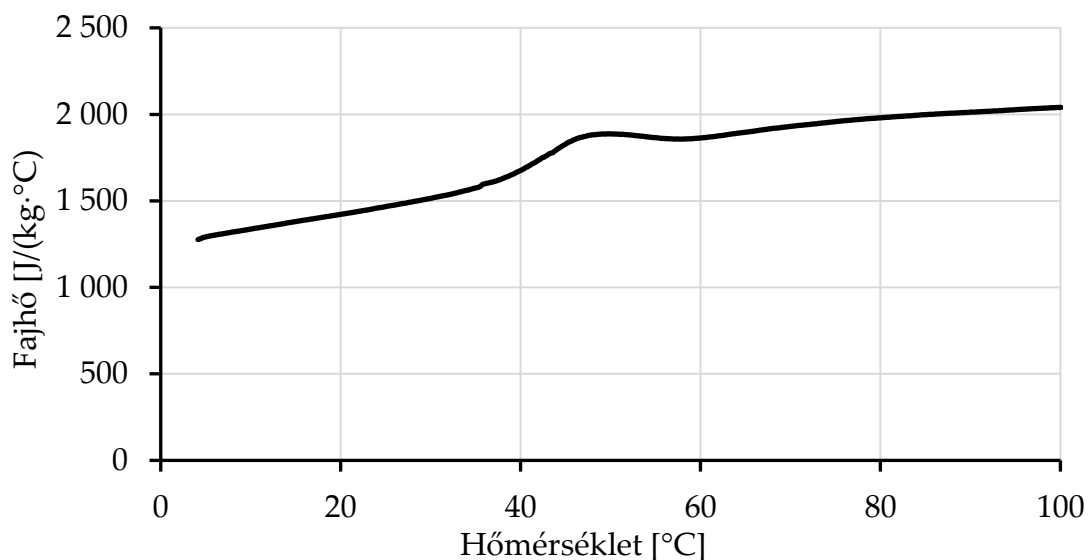
Ebben az fejezetben a fizikai méréseket részletezem.

4.2.1. DSC mérés

Differenciál pásztázó kalorimetriát végeztem az inzert alapanyagán, annak érdekében, hogy meghatározzam a fajhő hőmérsékletfüggését, amelyet a numerikus szimulációk során használhattam fel. A mérés során a következő paramétereket alkalmaztam:

- mérési ciklus: egyszeri felfűtési program,
- minta tömege: 10,2 [mg],
- hőmérséklettartomány: 0- 220 [°C],
- fűtési sebesség: 10 [°C/min],
- nitrogén gáz közeg, gázáramlás: 50 [ml/perc].

A mérés után a fajhőt ábrázoltam a hőmérsékletfüggvényében, ezt mutatja a 24. ábra.



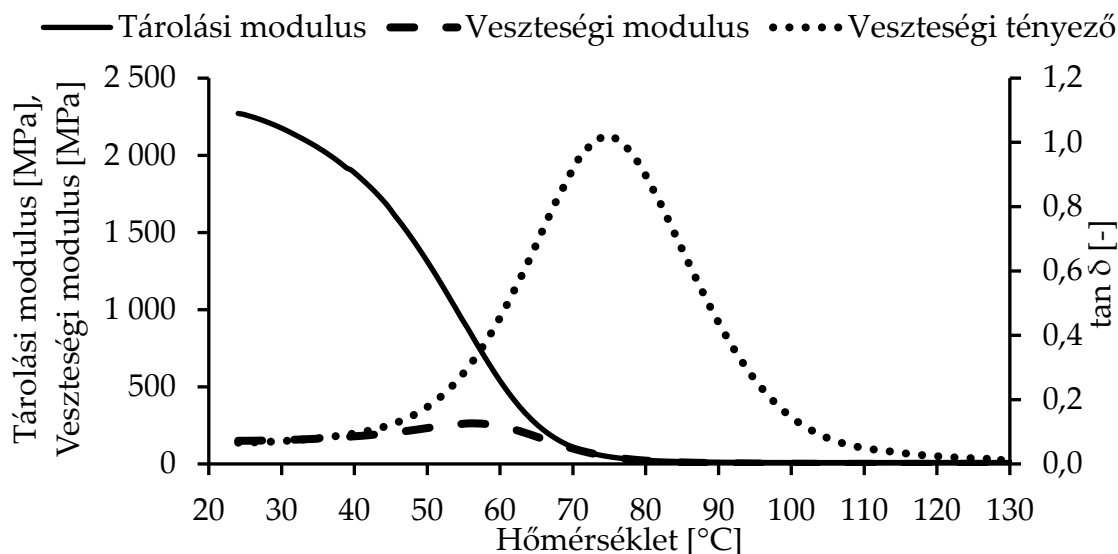
24. ábra: A FullCure 835 alapanyag fajhője a hőmérséklet függvényében.

4.2.2. DMA mérés

Dinamikus mechanikai analízist végeztem az inzert alapanyagán, ahhoz, hogy meghatározzam a tárolási modulus hőmérsékletfüggését. A mérés során a következő paraméterek alkalmaztam:

- hőmérséklettartomány: 24- 130 [°C],
- felfűtés sebessége: 5 [°C/perc],
- mintára ható feszültség frekvenciája: 1 [Hz],
- amplitúdó: 10 [μm],
- mérőfej: dual cantilever,
- próbatest méretei: 35x10x4 [mm].

A mérés után ábrázoltam a tárolási és veszteségi modulust, illetve a veszteségi tényező értéket is a hőmérséklet függvényében ezt mutatja a 25. ábra .



25. ábra: A FullCure 835 alapanyag tárolási és veszteségi modulusa, illetve veszteségi tényezője a hőmérséklet függvényében.

A mérés kiértékelése során meghatároztam a T_g hőmérsékletet, ez a veszteségi modulus maximális értékéhez tartozó hőmérséklet adja meg, ami esetemben 56°C.

4.2.3. Inzertek valós viselkedésének meghatározása

Ahhoz, hogy a numerikus számításokat ellenőrizni tudjam és összehasonlíthassam az inzertek valós viselkedésével, ennek érdekében fizikai méréseket is el kellett végeznem. Ehhez a korábban ismertetett fröccsöntőgépet használtam, a deformáció meghatározásához a digitális képkorreláció (DIC- digital image correlation) módszerét használtam. Ennek lényege, hogy a vizsgált folyamatot kamerával figyeljük és a vizsgálati darabot egyedi kontrasztos mintázattal látjuk el. Erre azért van szükség mivel a kiértékelő szoftver a felvételek alapján számítja ki az előre meghatározott pont elmozdulását, oly módon, hogy a vizsgált pont és annak környezetében lévő pontok szürkeárnyaltos intenzitásértékeit keresi a következő képen. A módszer lehetőséget ad előre felvett videók elemzésére és valós idejű mérésre is [27].

A mérés során nem volt lehetőségem a valós idejű mérésre, ennek legfőbb oka, hogy nem sikerült kalibrálni a felvevő készüléket. A kalibrációt az erre a célra használt táblát kell használni, amin egy pontrács található, amin adott távolságban helyezkednek el a pontok. Azonban a kalibráció több okból sem sikerült elvégezni, egyrészt az üvegbetét túl kicsi volt és így a túl kevés pont látszódott, illetve a szerszám a ferde osztósíkja miatt [27].

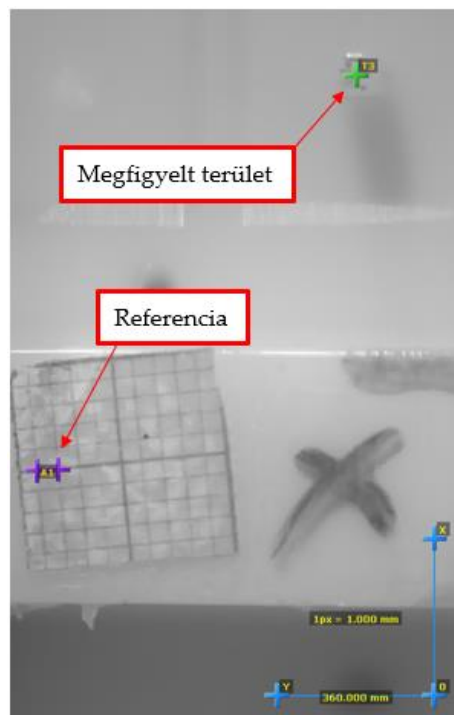
A fröccsöntés során a korábbiakban ismertetett MOL Petrolkémia Zrt Tipplen H145F típusú PP-jét használtam. A fröccsöntés paraméterei a következők voltak:

- fröccssebeség: 40 [cm³/s],

- fröccsnyomás: 600 [bar],
- ömledékhőmérséklet: 200 [°C],
- hűtési idő 140 [s].

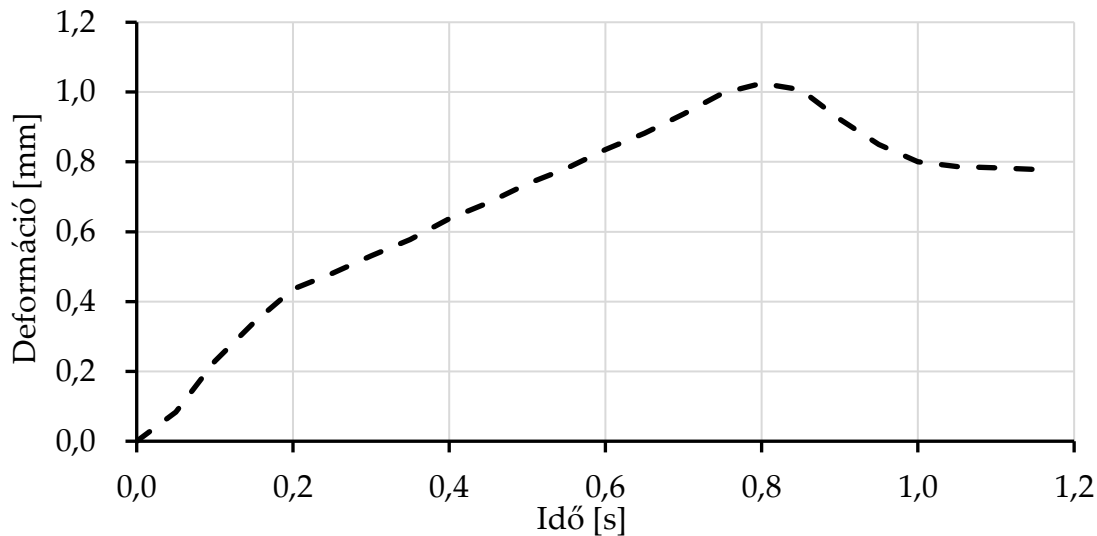
Utónyomást nem alkalmaztam, mivel az nem ad plusz információt az inwert deformációjával kapcsolatban, de a szerszámbetétet terheli és így csökkenti annak élettartamát [27].

Az inwertek mintázattal való ellátása után lehetet elkezdeni a mérést. A fröccsöntési kísérletek során a Nikon D600 típusú fényképezőgép segítségével vettem fel a folyamatot, majd a DIC program segítségével kiértékeltem a felvételeket. Első lépéseként egy referencia értéket kellett meghatározni, ennek érdekében a szerszámbetétre ragasztottam egy meghatározott nagyságú és négyzetráccsal ellátott papírt. Második lépés a vizsgálati terület kiválasztása, aminek az elmozdulását határozza meg a program (26. ábra) [27].



26. ábra: A DIC vizsgálat során kijelölt referencia és vizsgálati terület [27].

A program lefuttatása után az adatokat kiexportáltam, és Excel program segítségével ábrázoltam azokat. Három fröccsöntési ciklust végeztem és ezeket átlagoltam, ezt az átlaggörbét mutatja be 27. ábra [27].



27. ábra: DIC által mért deformációk átlaggörbéje [27].

A görbe több szakaszra is bontható. Az első szakaszban gyorsan nő a deformáció, ez a befröccsöntésnek az a szakasza, ahol az alapanyag elkezd érintkezni az inzerttel, de még nem veszi teljesen körbe, a második szakaszban ugyan tart még a befröccsöntés azonban a deformáció növekedésének sebessége lecsökken, mivel az inzert mögé ömledék kerül. A harmadik szakaszban csökken a deformáció, mivel a befröccsöntés után nyomáskeresés következik be [27].

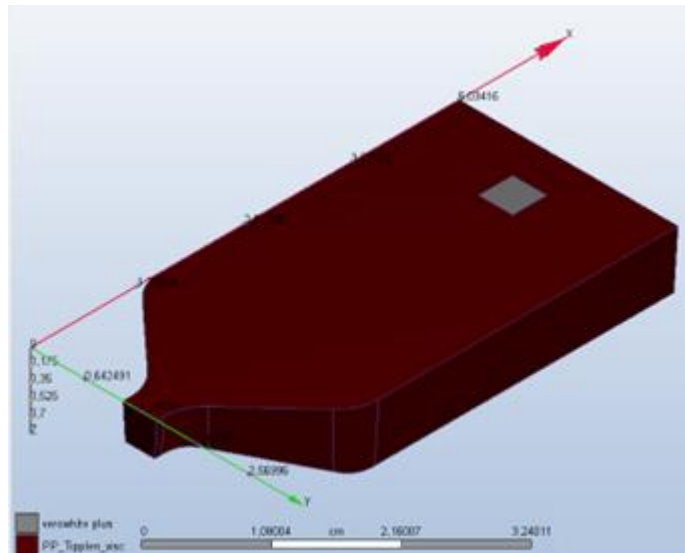
4.3. Numerikus számítások eredményei

Ahhoz, hogy megértsem az inzertek deformációs viselkedését szükséges tudnom, hogy milyen erőhatások érik az inzertet a ciklus során. Ennek érdekében numerikus számításokat végeztem több különböző szoftverben. Az inzertet érő erők meghatározása után pedig az inzertek deformációját határoztam meg Moldex3D és ANSYS felhasználásával.

4.3.1. Inzertre ható erők numerikus számítása

Az inzerteket érő erők meghatározásához két különböző szimulációs programot is használtam. A számításokat részletesen a 4 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzertre írom le, de a többi inzert esetében hasonlóan jártam el.

Az első numerikus számításokat az Autodesk CFD 2023-ban végeztem el. Első lépésként Autodesk Inventor segítségével modelleztem az ömledékteret, illetve az áramlási térben lévő inzertet, hogy az alapul szolgáljon ezeknek a számításoknak. Ezt a modellt STEP fájlként exportáltam majd importáltam a CFD szoftverbe (28. ábra). A szimulációk során egyszerűsített áramlási teret használtam. A betét tartály részét a számítások egyszerűsítése és gyorsítása miatt levágtam.



28. ábra: Egyszerűsített ömledéktér az Autodesk CFD 2023-ban a 4 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzeret esetében.

A szoftver lehetőséget ad arra, hogy megadjam, az anyagtulajdonságokat, mint a sűrűség, hővezető képesség, fajhő, viszkozitás, amelyek közül az utolsó kettőt a hőmérséklet függvényében tudtam figyelembe venni. A polimer ömledéket fluid-ként, az inzeret solid-ként definiáltam. Az ömledéktér alapanyagtulajdonságai, amit a Moldex3D adatbázisból importáltam ki az alábbiak voltak:

- sűrűség: $0,7 \text{ g/cm}^3$,
- hővezetési tényező: $0,145 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,
- kompressziós modulus: $200\,000 \text{ psi}$,
- hőmérsékletfüggő a fajhő,
- viszkozitás.

Az inzeret alapanyagtulajdonságai pedig:

- sűrűség: $1,17 \text{ g/cm}^3$,
- fajhő: $1467 \text{ J/(kg}\cdot\text{°C)}$,
- hővezetési tényező: $0,25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

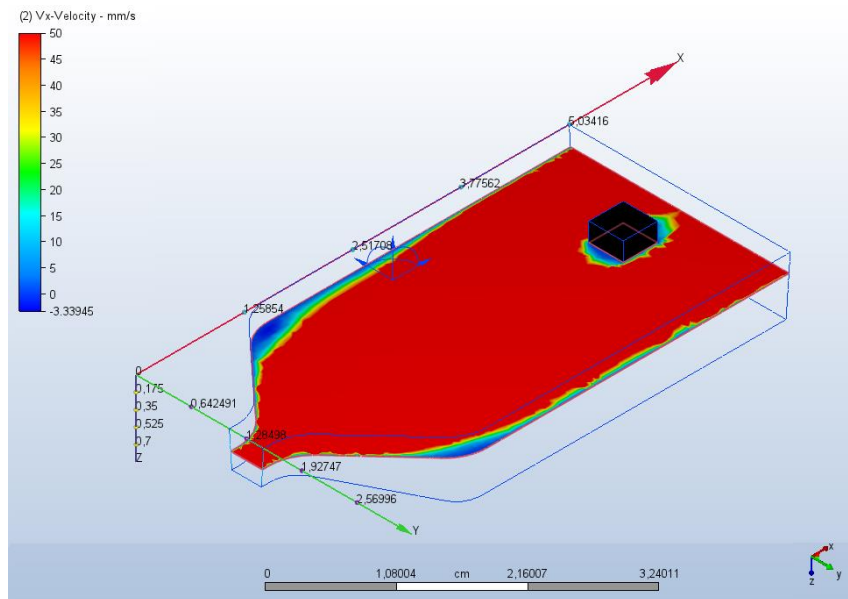
Ezek után minden egyes felületre meghatároztam a szükséges peremfeltételeket:

- az áramlási tér belépő felületén: térfogatáram $40 \text{ cm}^3/\text{s}$,
- az áramlási tér kilépő felületén: nyomás 0 ,
- az áramlási tér palástfelületein: sebesség minden irányban 0 ,
- az inzeret felületén: sebesség minden irányban 0 .

Kezdeti értéként pedig az egyes térfogatoknak a kezdőhőmérsékletét adtam meg:

- áramlási térben: hőmérséklet 200°C ,
- inzeret teljes térfogatában: 25°C .

A következő lépés a modell hálózása volt. Ezt automatikus hálózással végeztem el. A felületi finomítás: kikapcsolva, a hézag finomítás: kikapcsolva. Ezek után tudtam a számításokat elvégezni, amely során az áramlást lamináris, stacioner áramlásként modelleztem. Az x irányú sebességeloszlást mutatja a 29. ábra.

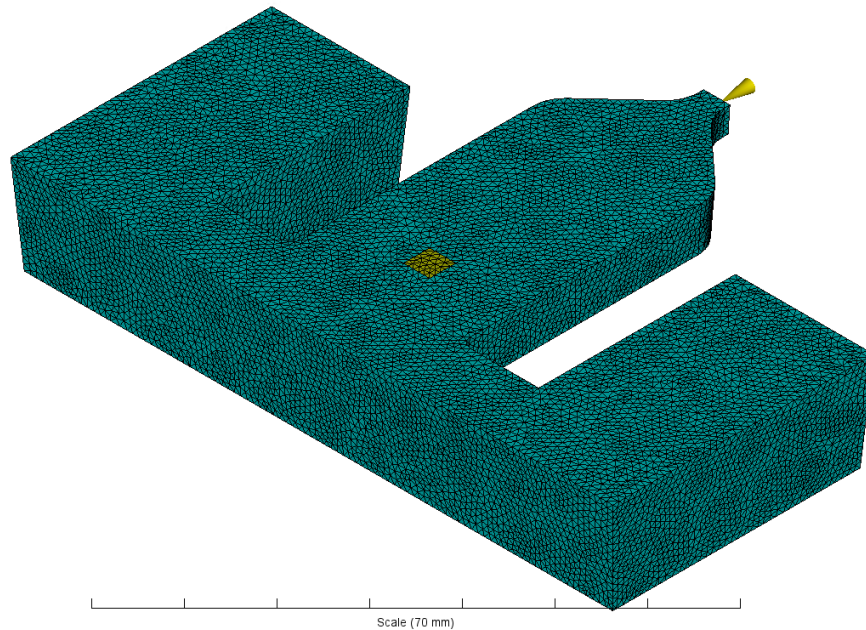


29. ábra: Az x irányú sebességeloszlás az Autodesk CFD 2023-ban a 4 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzert esetében.

Az ezekkel a kezdeti és peremfeltételekkel lefutott számítások alapján, a 4 mm oldalhosszúságú inzertet a fröccsöntési ciklus során 13,59 N nagyságú erő éri.

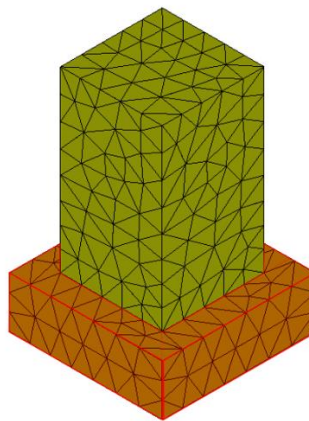
Az Autodesk CFD 2023 után az Autodesk Moldflow Insight 2021-ben segítségével is modelleztem a folyamatot. A program lehetőséget ad egy úgynevezett core shift analysisra, amely felhasználásával a szerszáminzertek deformációját is tudom számolni, valamint bennük ébredő feszültségeket is meg tudom határozni.

Ennek első lépése során az egész ömledékteret importáltam az inzerttel együtt, majd hálózta, ezúttal tetragonális 3D-s elemekkel. A hálózás során 0,99 mm oldalhosszúságú elemeket használtam. Az inzert és az ömledékteret külön részként kezeltem és a hálózás során figyeltem arra, hogy a két rész találkozásánál az elemek pontosan találkozzanak egymással. Így 700 ezer darab elemet kaptam. A hálózás eredményét a 30. ábra mutatja.



30. ábra: A modelltér a hálózás után a 4 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzeret esetében.

Ezek után kényszereztem a modellt, az inzeret alsó, nagyobb oldalhosszúsággal rendelkező része nem ér bele az ömledéktérbe, itt alkalmaztam a megfogást. Fixed constrain-t használtam, ami meggátolja a csomópontok elmozdulását és elfordulását is, ügyelve arra, hogy az inzeret és a talprész csatlakozásánál lévő csomópontokat ne fogjam meg. A 31. ábra ezt a megfogott részt ábrázolja.



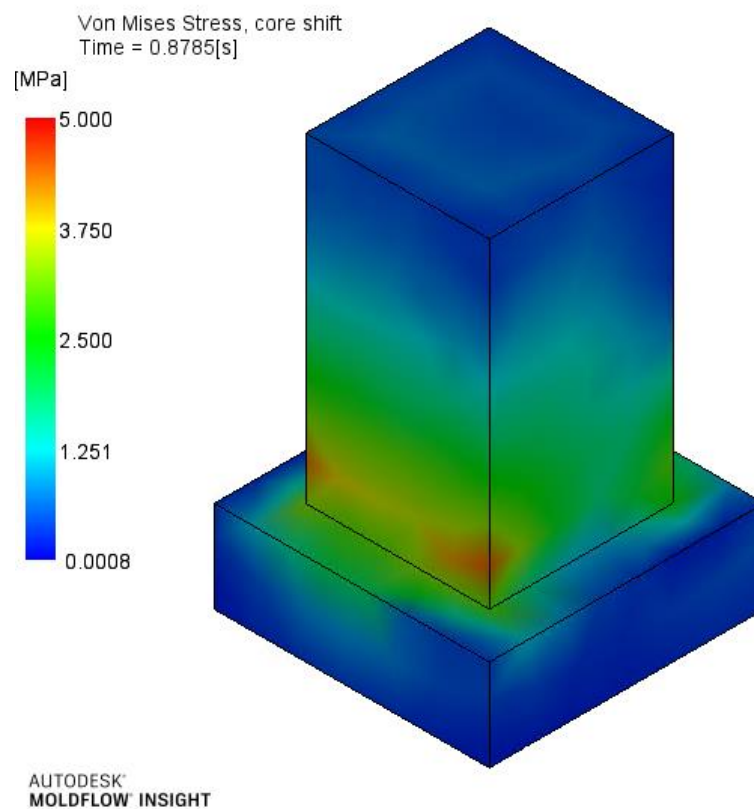
31. ábra: A 4 mm oldalhosszúságú négyzet alakú inzeret kényszerezése Autodesk Moldflow Insight programban, a piros terület a megfogott rész.

Utolsó lépésként megadtam az anyagtulajdonságokat, a fröccsöntési paramétereket és lefuttattam az analízist. Az alapanyagtulajdonságokat mind a fröccsöntésre használt polimerre, mind az inzerre megadtam. A fröccsöntésre használt polimer esetében a program adatbázisában nem volt megtalálható, így itt is a Moldex3D programból importáltam ki. Az inzeret alapanyagának tulajdonságait én vittem be a programba,

úgy, mint a sűrűség (1,17 g/cm³), fajhő (1467 J/kg°C), rugalmassági modulus (2500 MPa), Poisson-tényező (0,37) [28]. Az alkalmazott analízis típusa Fill volt, mivel utónyomást nem használtam a korábbi mérések során és így a számítási idő is kevesebb volt. A fröccsöntési paraméterek pedig a következők voltak:

- szerszámhőmérséklet: 25°C,
- ömledékhőmérséklet: 200°C,
- fröccssebeség: 40 cm³/s,
- az átkapcsolás 99%-os kitöltöttségnél történik meg,
- Core shift analízis a befröccsöntési szakaszban is aktív,
- Core shift analízis 5%-os kitöltöttségi lépésként történik meg

A Core shift analízis von Mises feszültség eloszlás eredményét szemlélteti a 32. ábra.



32. ábra: Von Mises feszültség eloszlás Autodesk Moldflow Insight 2021-ben a 4 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzert esetében.

A kapott maximális feszültség és a Navier képlet felhasználásával [29] átszámítottam a maximális feszültséget erőre az alábbi módon:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_h}{K_z} = \frac{F_{\max} \cdot \frac{b}{2}}{\frac{a^3}{6}} \rightarrow F_{\max} = \frac{a^3 \cdot \sigma_{\max}}{3b} = \frac{4^3 \cdot 4,4}{3 \cdot 7} = 13,65 \text{ [N]} , \quad (7)$$

ahol $\sigma_{\max}$ a leolvasott maximális feszültség MPa-ban, M_h a hajító nyomaték MPa-ban, K_z pedig a keresztmetszeti tényező mm³-ben, $F_{\max}$ a keresett erő N-ban, a keresztmetszet rövidebb oldalának hossza mm-ben, b az inzert magassága mm-ben. Ebből átszámolva

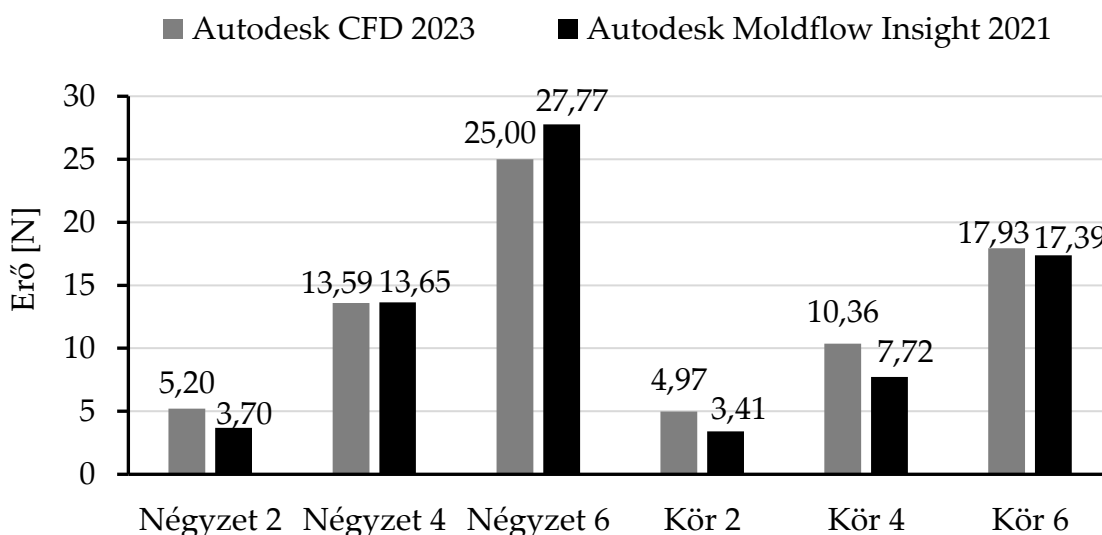
a program által számított maximális erő hozzávetőlegesen 13,65 N. Ez az eredmény hasonló, mint a CFD-ben kapott érték, illetve a valós eredményekhez [30].

Ezután mindegyik inzerattípusra lefuttattam a számításokat mindkét program esetében. Minden alapanyagtulajdonságot, minden peremfeltételt és minden hálózási paramétert változatlanul hagytam. A kör keresztmetszetű inzeretek esetében a (7) összefüggés a következőképpen alakul:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_h}{K_z} = \frac{F_{\max} \cdot \frac{b}{2}}{\frac{D^3 \cdot \pi}{32}} \rightarrow F_{\max} = \frac{D^3 \cdot \pi \cdot \sigma_{\max}}{16 \cdot b}, \quad (8)$$

ahol $\sigma_{\max}$ a leolvasott maximális feszültség MPa-ban, M_h a hajító nyomaték MPa-ban, K_z pedig a keresztmetszeti tényező mm³-ben, $F_{\max}$ a keresett erő N-ban, D az inzeret átmérője mm-ben, b az inzeret magassága mm-ben.

A programokkal számított erőértékeket összehasonlítottam egymással, minden keresztmetszet esetében. Az eredmények összehasonlítását a 33. ábra mutatja be.



33. ábra: Inzereteket érő maximális erők különböző szimulációs programok esetében.

Az eredményekről elmondható, hogy a két program közel azonos értékeket számol. Azonban a kör keresztmetszetű inzeretek, különösen a kisebb átmérők esetében a Moldflow értékei kisebbek voltak, amelynek több oka is lehet, az egyik lehetséges ok az, hogy az elem nagyság túl nagy volt, így a kör keresztmetszet leképezése nem megfelelő, a másik lehetséges ok az analitikus képlet közelítő jellege miatti hiba.

4.3.2. Inzeretek deformációs viselkedésének numerikus számítása

Széplaki [31] dolgozatában Autodesk Moldflow Insight 2019 programban már vizsgálta az ilyen inzeretek fröccsöntés közbeni deformációját. Dolgozatában több sebességgel és több fajta keresztmetszetű inzerettel dolgozott. Eredménye alapján az Autodesk Moldflow Insight 2019 sem a hőmérsékletfüggő alapanyagtulajdonságokat, sem az üvegbetét és az inzeret érintkezését sem képes kezelni, így a mért és számított

eredményei között egy nagyságrendi eltérés volt megfigyelhető. Ebből kiindulva első számításaimat ANSYS 2021 R2-ben végeztem el, megvizsgálva a hőmérsékletfüggés és az érintkezés hatását.

Mivel a céloom jelen esetben a hőmérsékletfüggés és az érintkezés hatásának vizsgálata volt, csak a 2 mm oldalhosszúságú négyzet alakú inzertert vizsgáltam. Mivel az ANSYS 2021 R2 nem kifejezetten fröccsöntési folyamat modellezésére szolgál, emiatt szükség volt egy ilyen célú szoftverre is. Erre szolgál a Moldex3D 2021 szimulációs program. Tehát első lépésként ebben a programban modelleztem a folyamatot. A modellt importálás után hálóztam tetraéderes elemekkel, az elemnagyságot 0,3 mm-re állítottam. Ezek után mind az ömledéktérnek, mind az inzertert alapanyagának megadtam az alapanyagtulajdonságait. A fröccsöntéshez használt Tipplen H145F PP-nek az alapanyag tulajdonságai rendelkezésre álltak a Moldex3D saját alapanyag-adatbázisában, a FullCure 835-é azonban nem, azokat meg kellett adni. Miután az alapanyagtulajdonságokat hozzárendeltem az adott modellrészhez, megadtam a fröccsöntési paramétereket, ezek ugyanazok voltak, mint a fizikai, valós mérések esetében, azaz a befroccsöntési sebesség $40 \text{ cm}^3/\text{s}$, ömledékhőmérséklet 200°C , inzertert hőmérséklete a kezdeti időpillanatban 23°C . Ezek után lefuttattam a szimulációt, majd áttértem az ANSYS 2021 R2-re.

Itt első lépésként csak magát az inzertert geometriát importáltam be STEP fájl formátumként, majd ezután hálóztam a modellt. A hálózást 3D elemekkel végeztem és az elemméretet 0,3 mm-re állítottam, majd egy konvergencia analízist is végeztem. Így a közel 13000 darab elemet kaptam. Második lépésben az anyagmodelleket állítottam fel, az első anyagmodell esetében az anyag tulajdonságai nem függtek a hőmérséklettől, míg a második esetében igen.

A következő anyagtulajdonságnak vizsgáltam a hőmérsékletfüggését: rugalmassági modulus. A fahő és hővezetési tényező [28] illetve a lineáris hőtágulási tényezőt [28] állandó értéken hagytam.

Ezután egy termikus tranziens analízist futtattam. Terhelés fajtája konvekció, a szoftverben ez azt jelenti, hogy a folyadékkal jelen esetben a polimer ömledékkel találkozó felületeken konvektív hőátadás történik. Ehhez a számításhoz meg kellett adni a kezdőhőmérsékletet és a terhelés hőmérsékletét, a kezdőhőmérsékletet 23°C -ra, míg a terhelés hőmérsékletét 200°C -ra állítottam, még egy paramétert kellett megadni a számításhoz a hőátadási tényező, ezt $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ -re határoztam meg. Így megkaptam az inzertert hőmérséklet eloszlását a folyamat során.

Ezután egy statikus mechanikai analízist végeztem el. Ehhez az egyik peremfeltétel az előző bekezdésben tárgyalt termikus analízis volt, az inzerltre ható mechanikai terhelést pedig a Moldex3D-ben végzett számítások alapján határoztam meg oly módon, hogy az egyes időpillanatokban mindegyik oldalon meghatároztam a maximális terhelést és ezt az értéket adtam meg, mint időfüggő felületre ható nyomásterhelés. Ezek a terhelések felületre ható nyomások, az inzertertnak az az oldallapja, amit először elér az ömledék kapja a legnagyobb terhelést, míg az ezzel

szemközti oldallap kapja a legkisebbet, az ömledékárammal párhuzamos lapok pedig a kettő közötti terhelés ér. Ezeket a terheléseket foglalja össze a 4. táblázat.

Idő [s]	Terhelések [MPa]		
	Előlap	Hátoldal	Oldallapok
0	0	0	0
0,05256	0,24821	0	0,00775
0,10512	0,47268	0,00497	0,23719
0,15768	0,55144	0,0888	0,31011
0,21024	0,58774	0,11491	0,34113
0,2628	0,61181	0,13242	0,36183
0,31536	0,64487	0,15745	0,39112
0,36792	0,67199	0,17998	0,416
0,42048	0,69675	0,20111	0,43928
0,47304	0,71955	0,22093	0,46102
0,5256	0,74243	0,24105	0,48279
0,57816	0,76248	0,25867	0,50187
0,63072	0,77482	0,26954	0,51374
0,68328	0,79016	0,28301	0,52838
0,73584	0,80938	0,30055	0,54707
0,7884	0,83314	0,32264	0,57006
0,84096	0,8607	0,34865	0,59697
0,89352	0,88761	0,37436	0,62334
0,94608	0,91958	0,40529	0,65494
0,99864	2,7644	2,3491	2,5506

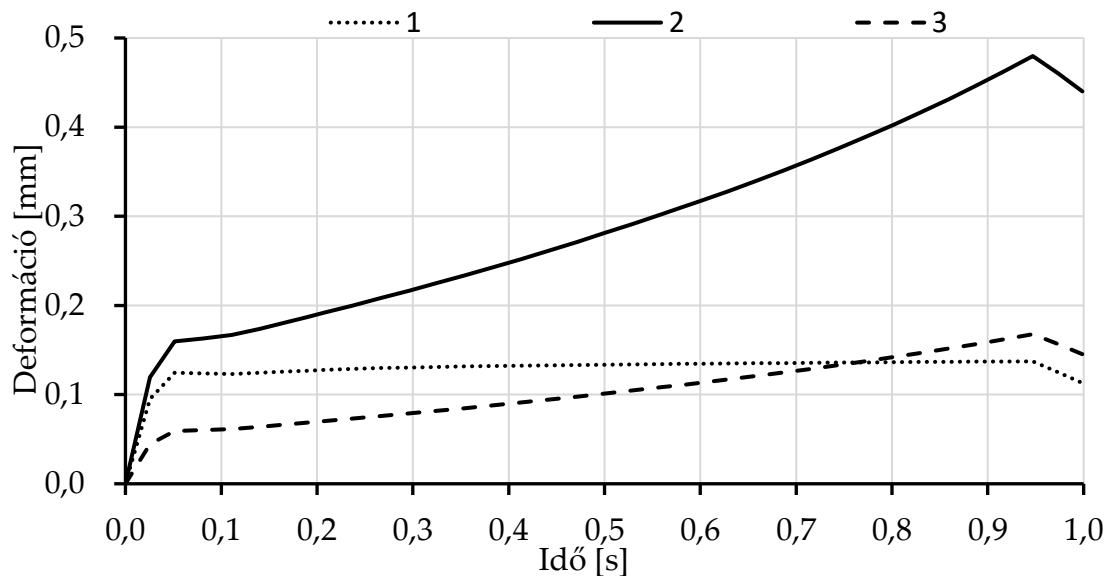
4. táblázat: Az inzertet érő nyomások ANSYS 201 R2-ben a 2 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzert esetében

További peremfeltétel az üvegbetét korlátozó tényezője az inzert tetején. Ezt az úgynevezett frictionless support segítségével vizsgáltam, ez annyit jelent, hogy az így kijelölt felület nem képes normál irányban elmozdulni, illetve deformálódni. Ez jelen esetben azt jelenti, hogy frictionless supporttal az inzert az üvegfülülettel érintkező felülete nem képes elválni az üvegtől a folyamat során, míg enélkül az inzert képes kihajolni. Utolsó lépésként az inzert befogott részét kényszereztem le. A vizsgált eseteket az 5. táblázat foglalja össze az egyes szimulációk esetében.

Sorszám	Anyagmodell	Kapcsolat az üvegbetéttel
1	hőmérséklettől független	nincs frictionless support
2	hőmérsékletfüggő	nincs frictionless support
3	hőmérsékletfüggő	frictionless support

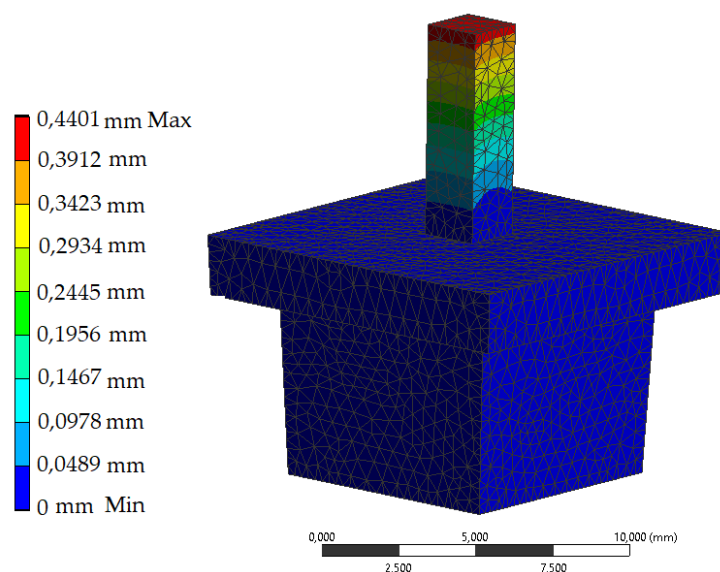
5. táblázat: Szimulációk peremfeltételei ANSYS 2021 R2 program esetében

A számítások lefuttatása után az eredményeket összehasonlítottam egymással, ezt mutatja a 34. ábra.



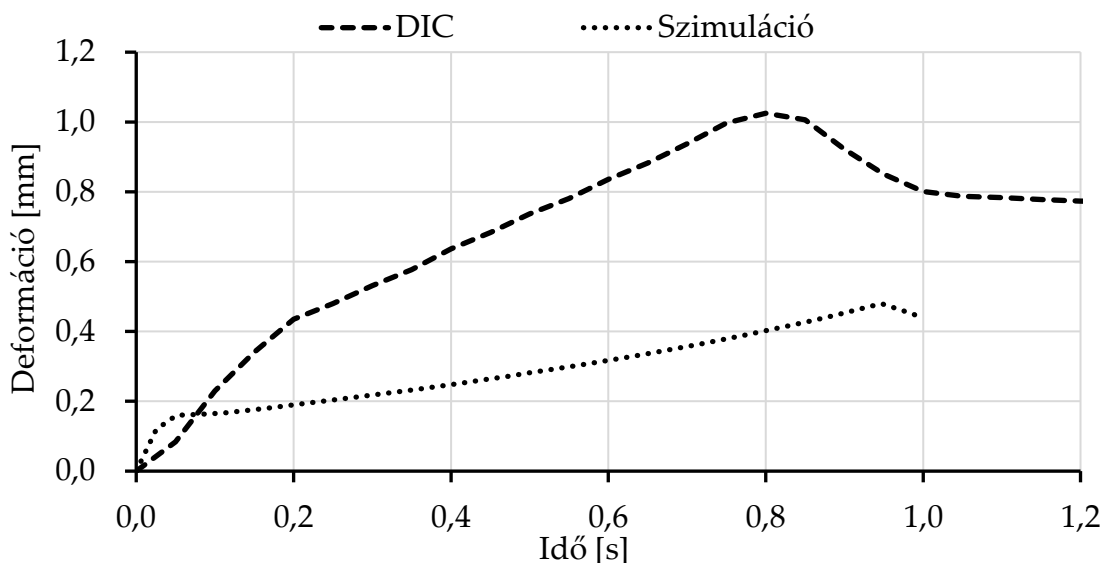
34. ábra: Szimulációk eredményei különböző anyagmodellek esetén ANSYS 2021 R2-ben.

A görbéket megvizsgálva látszik, hogy a deformáció három szakaszra osztható. Az első szakasz egy rövid meredeken felfutó szakasz, a második egy hosszabb, de laposabban felfutó szakasz, a harmadik szakaszban pedig a visszarugózás látható. Azonban az eredményekben nagy eltérés mutatkozik, annak ellenére, hogy a számítások során az inzertekre ugyanazok a terhelések hatottak. Például az „1” sorszámú szimuláció esetében a második szakaszban a deformáció nem nő, hanem állandó értékű. Így elmondható, hogy a megfelelő anyagmodell és peremfeltételek meghatározása fontos lépés a numerikus számítások során. A 35. ábraán a legnagyobb maximális deformációt mutató „3” sorszámú szimuláció eredményei láthatóak.



35. ábra: A „2” számú szimuláció deformációs eredményei a 2 mm oldalhosszúságú négyzetes inzert esetében.

Ezek után összehasonlítottam az inzert valós viselkedését a leginkább hasonlító „2” sorszámú numerikus számítás eredményeivel. Az összehasonlítást a 36. ábra mutatja be.



36. ábra: Az inzertek deformációjának mért és számított eredményeinek összehasonlítása.

A két eredmény összehasonlításából látható, hogy a szimuláció jellegre helyes eredményt adott, azonban a maximális deformáció értéke fele akkora, mint a DIC-val meghatározott maximális deformáció. Az eltérésnek több oka is lehet, első, hogy bár az ANSYS-ban lehetséges hőmérsékletfüggő anyagmodelleket felépíteni, azonban a modell érzékeny az anyagjellemzőkre, és a legkisebb módosítás is komoly változásokat okozhat az eredményekben. Emellett azt is figyelembe kell venni, hogy a nyomást másik szimulációs programból (Moldex3D) importáltam, így az nem teljesen pontos, mivel ezeket az értékeket a program által számolt deformáció mértéke is befolyásolja.

Ugyancsak probléma adódik a termékek gyártási technológiájából. Egy additív gyártástechnológiával készült termék esetében nem fogunk tudni teljesen tökéletes névleges méretet elérni, így az előfeszítettség nem lesz azonos az ugyanolyan névleges magasság ellenére sem, ami jelentősen megváltoztathatja a darab viselkedését, nagy mértékben csökkentik a modellezés pontosságát. Az inzertek építési iránya sem mindegy, mivel az additív gyártástechnológiával készült termékek anizotróp anyagok, ami annyit tesz, hogy különböző irányokban nem ugyanazok az anyagjellemzőik. Emellett természetesen a termék vastagsága is változhat, ami szintén eltérést okozhat a mért és a számolt deformációk között.

További bizonytalansági tényező emellett, hogy egy ilyen folyamat mérése meglehetősen nehezen megoldható, főleg csak indirekt módon, és emiatt könnyen előfordulhat, hogy a felvételeken mért deformáció is pontatlan, ami miatt, mint viszonyítási alap sem teljesen pontosak az adatok a szimulációk precízségének megállapításához. Egy ilyen probléma lehet, hogy a szerszám és a kamera nem

derékszöget zárnak be egymással vagy például az üveglap fénytöréséből adódó pontatlanság, így csökkentve a DIC mérés pontosságát.

Minden eddigiből következik, hogy a numerikus számítások során a peremfeltételek emiatt bizonytalanok, ami miatt a számítási eredmények pontossága megkérdőjelezhető. A számítások segítségével természetesen egy bizonyos pontossági fokig lehet becsléseket és előrejelzéseket adni egy adott folyamatról azonban ahhoz, hogy teljesen pontos értékeket kapjak, sajnos a valós méréseket is el kell végezni, és még ebben az esetben is lehetnek bizonytalanságok az eredményekben.

Mindent összefoglalva, az ANSYS segítségével jobb eredményeket sikerült elérnem a deformáció pontos értékét tekintve, mivel már nem nagyságrendi eltérés jelentkezett a valós és számított deformációk között. A modellem emellett alkalmas a deformációk jellegét és előzetes tendenciáit megbecsülni, amely egy előrelépés korábbi vizsgálathoz képest.

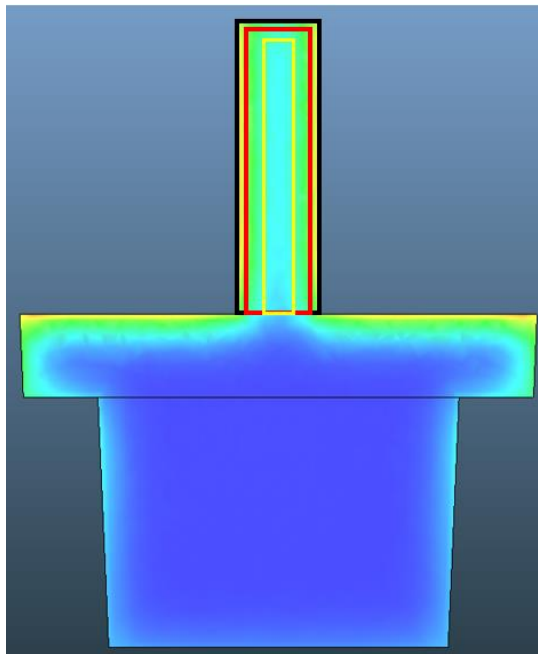
4.3.3. Anyagmodell pontosítása

A másik ok amire visszavezettem a valódi és a numerikusan számolt deformáció eltérését az az anyagmodell pontatlansága. Ennek érdekében a korábbi ANSYS 2021 R2-ben végzett számításaimat pontosítottam az anyagmodell módosításával. Ahogyan korábban így itt is a DSC és DMA analízisek segítségével meghatározott anyagtulajdonságokat használtam a számítások során. Tehát hőmérsékletfüggően adtam meg a rugalmassági modulust, a fajhőt és a hővezetési tényezőt. Azonban a lineáris hőtágulási együtthatót most is konstans értékűnek adtam meg [28].

A terheléseket tekintve ugyanazt a Moldex3D számításokat használtam, mint korábban. A Moldex3D-ben lehetőség van a csomóponti adatok kiexportálására ANSYS programhoz, egy interfészen keresztül. Itt lehetőség van a Moldex3D-ben lévő csomópontok és azok adatainak kiexportálására, de akár az ANSYS által lehálózott modell csomópontjaira is képes adatokat mappelni. Az én esetemben az inzert hőmérsékletét és nyomásértékeit exportáltam ki. Azonban mindkét esetben csak a hőmérsékletadatok importálása volt sikeres, a nyomásadatoké nem. Ugyan a hőmérséklet adatok importálása sikeres volt, de ANSYS 2021 R2-ben olyan hőmérséklet adatok és olyan helyen jelentek meg, ami nem felel meg a valóságnak, így ezt a funkciót nem tudtam alkalmazni, a hőmérséklet és nyomás adatokat másképp kellett megadnom.

Az inzert hőmérsékletének megadásához új modellt hoztam létre, ennek a modellnek a lényege az, hogy az inzert rétegekből áll és az egyes rétegekben található elemeknek a hőmérséklete azonos egy-egy időpillanatban, azaz a különböző rétegnek a hőmérsékletlefutása különböző. Ez a modell a térfogati hőmérséklet eloszlás kezelésének egy egyszerűsített módja, így a valóságot jobban tudom modellezni. Azonban mivel az egyes rétegeknek a hőmérséklete állandó, így egyelőre a modell nem képes kezelni azt, hogy melyik oldalt éri el hamarabb az ömledék. A rétegek

számát, méretét és hőmérsékletét a Moldex3D-ben végzett számítások alapján adtam meg. Ezeknek a rétegeknek a hőmérsékletét exportáltam ki minden egyes időpillanatban és ezeket hőterhelésként adtam meg ANSYS-ban. A 2 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzeret esetén 3 réteget határoztam meg, ezt mutatja a 37. ábra.

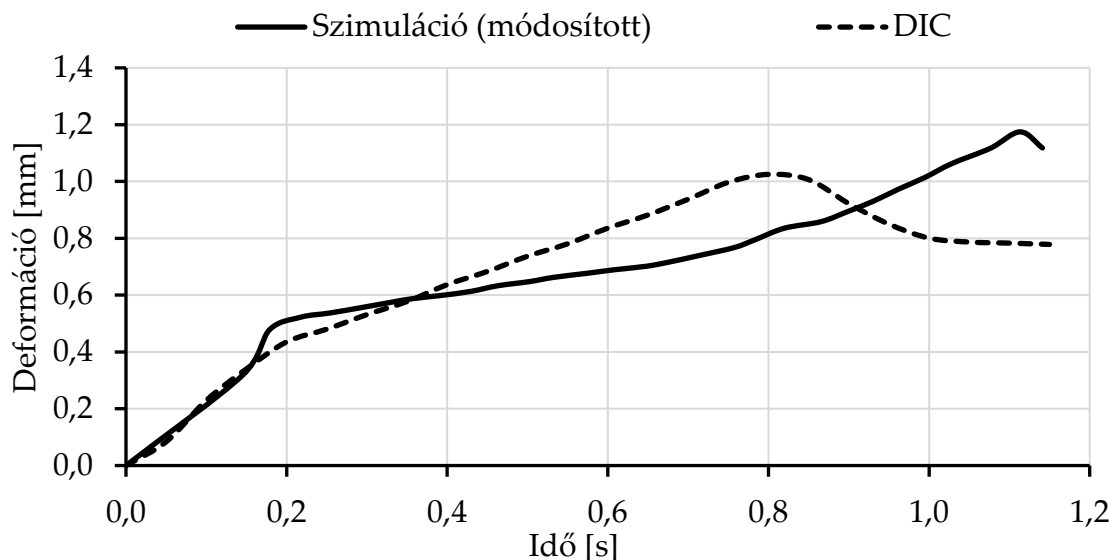


37. ábra: A 2 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzeret hőmérsékleteloszlása a fröccsöntési irányra merőlegesen a szimmetria síkban

Az egyes rétegeket külön testként modelleztem, és ANSYS-ban külön hálóztam be. Azonban a program képes kezelni ezt és úgy hálózza be az egyes részeket, hogy összekapcsolódnak, így a mechanikai analízisnél ezek a modellrészek együtt mozognak el, így a deformációs számítást ez a réteges szerkezet nem befolyásolja.

A nyomásterhelések esetében is másképp jártam el most nem a maximális terhelést használtam, mint felületre ható nyomás, hanem minden egyes időpillanatban, több pontban meghatároztam a nyomást és ezek átlagát használtam, mint időfüggő felületre ható nyomás terhelés. A nyomásadatokat a Melléklet tartalmazza.

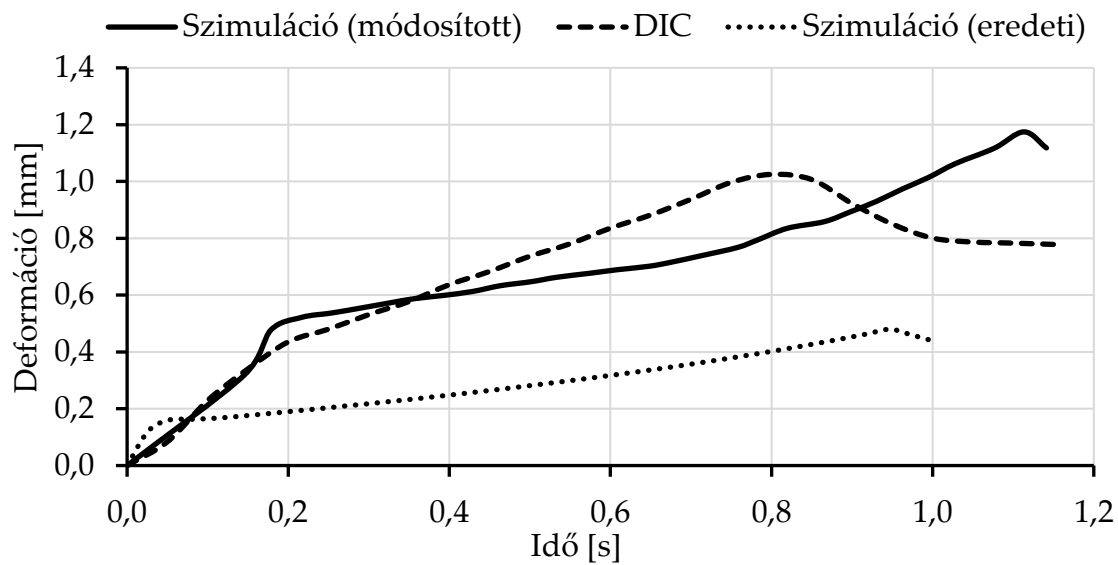
Egyéb lépés, úgy, mint a hálózás és egyéb peremfeltételek azonosak a korábbi számítással. A számítás lefuttatása után, szintén összehasonlítottam a DIC által mért deformációval az itt kapott deformációt. Ezt mutatja a 38. ábra.



38. ábra: Az inzertek deformációjának mért és számított eredményeinek összehasonlítása javított anyagmodell esetén.

Az eredmények alapján elmondható, hogy sikerült javítani a numerikus számítások eredményén. Itt is megtalálhatóak az egyes szakaszok, a kezdeti szakasz jó egyezést mutat, csak a későbbi időpillanatokban tér el jelentősebben a két görbe. A két görbe időbeli szétcsúszását okozhatja, egyrészt numerikus hiba, például a program nem tudta tartani az előírt kitöltési sebességet, de ez a jelenség a fröccsöntő gép esetében is előfordulhat, mivel a csigát fel kell gyorsítani és nem egyből a beállított értéken kezd el forogni, de egyéb szabályozás technikai okok miatt is lehetséges ez. A maximális deformációról elmondható, hogy közel esnek egymáshoz a mért és számolt értékek, mivel a DIC által mért maximális deformáció 1,025 mm míg a javított modell esetében ez 1,175 mm.

Összehasonlítva a két numerikus számítás eredményei a DIC által mért deformációval (39.ábra) még jobban látható a javulás mértéke. A maximális deformációk közötti eltérés az eddigi 0,55 mm-ről 0,15 mm-re csökkent, ami 27%-os javulás jelent.



39. ábra: Inzert deformáció mért és számított eredményeinek összehasonlítása a 2 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzert esetében.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

5.1. Magyar nyelvű összefoglaló

Diplomamunkám során először irodalomkutatás végeztem a fröccsöntéssel kapcsolatban azon belül is a szerszámok felépítéséről és a szerszámokat ért igénybevételekről a fröccsöntési ciklus során. További irodalomkutatást végeztem a fröccsöntés numerikus modellezése témakörében, külön figyelmet fordítva a szerszám és inzert deformációt figyelembe véve.

Az irodalomkutatás után egy adott szerszámbetét és inzert geometriákon fröccsöntési kísérletek végeztem, hogy a későbbiekben össze tudjam hasonlítani a numerikus számítások eredményeit az inzertek valós viselkedésével. Ezután az inzert anyagául szolgáló FullCure 835 fotopolimeren DSC és DMA vizsgálatokat végeztem, annak érdekében, hogy meghatározzam az alapanyag viselkedését magas hőmérsékleten.

A numerikus számítások során több programot is használtam úgy, mint Moldex3D, Autodesk CFD, Autodesk Moldflow Insight és ANSYS. Ahhoz, hogy megismerhessem az inzertek viselkedést a fröccsöntési cikluson belül, numerikus számítások segítségével meghatároztam az inzerteket érő erőket. Ehhez Autodesk CFD és Autodesk Moldflow Insight programokat használtam. Ezután számítottam numerikusan az inzertek deformációs viselkedését is. A számítások első lépéseként Moldex3D segítségével magát a kitöltés szimuláltam, így megkapva az inzerteket érő mechanikai terheléseket. Ezután ANSYS segítségével meghatároztam a termikus viszonyokat, majd a Moldex3D-ben kapott terheléseket használva meghatároztam az inzert deformációját. A nyomás terhelések, amelyek időfüggőek felületen ható nyomások és ezek értékei a felületen számított maximális nyomás nagyságával egyenlő. Az első számítás során vizsgáltam a hőmérsékletfüggő alapanyagtulajdonságok hatását és a szerszám korlátozó tényezőjét is. Az eredmények alapján jelentős eltérést tapasztaltam a számított és mért inzertdeformációban. Ennek számos oka lehet, többek között az anyagmodell pontatlansága.

Az anyagmodell pontosítása érdekében a Moldex3D-ben található interfész segítségével importáltam ki a csomóponti nyomás és hőmérséklet adatokat. Ez azonban nem vezetett sikerre, mivel az importálás során olyan értékek is megjelentek, amik nem felelnek meg a valóságnak. Így egy új modellt hoztam létre, amely szerint az inzertet rétegekre bontottam és ezeknek a rétegeknek azonos a hőmérsékletük egy-egy időpillanatban. A nyomás terhelések esetében nem a maximális nyomást vettem alapul, hanem több pont átlaga alapján határoztam meg az egyes felületekre ható nyomásokat. Ennek segítségével pontosabb eredményeket kaptam, a maximális deformáció közel azonos, mindössze 0,15 mm-rel tér el a mért és a számított eredmény azonban az ideje még eltér, így ez további vizsgálatra szorul. Ennek ellenére elmondható, hogy sikeresen tudtam pontosítani a modellen.

5.2. Idegennyelvű összefoglaló

In my thesis I first conducted a literature review on injection moulding, in particular on the design of moulds and the stresses on moulds during the injection moulding cycle. Further literature research was conducted on numerical modelling of injection moulding, with special attention to tool and insert deformation.

After the literature review, I performed injection moulding experiments for a given mould insert and insert geometry in order to compare the results of numerical calculations with the real behaviour of the insert in the future. Next, I performed DSC and DMA tests on the FullCure 835 photopolymer, which is the material of the insert, in order to determine the temperature dependent behaviour of the material.

For the numerical calculations I used several programs such as Moldex3D, Autodesk CFD, Autodesk Moldflow Insight and ANSYS. To understand the behaviour of the inserts within the injection moulding cycle, I used numerical calculations to determine the forces on the inserts. To do this, I used Autodesk CFD and Autodesk Moldflow Insight. Then I also calculated numerically the deformation behaviour of the inserts. As a first step of the calculations, I simulated the filling itself using Moldex3D to obtain the mechanical loads on the inserts. Then, using ANSYS, I determined the thermal conditions and then, using the loads obtained in Moldex3D, I determined the deformation of the insert. The compressive loads, which are time-dependent, are surface pressures and their values are equal to the magnitude of the maximum pressure calculated on the surface. In the first calculation, I also investigated the effect of temperature-dependent material properties and the limiting factor of the tool. The results show a significant difference in the calculated and measured insert deformation. This could be due to several reasons, including inaccuracy of the material model.

In order to refine the material model, I again used the Moldex3D and ANSYS programs, but this time I imported the nodal pressure and temperature data using the interface in Moldex3D. However, this did not lead to success, as during the import process, values appeared that did not correspond to reality. Thus, I created a new model where the insert was divided into layers and these layers had the same temperature at a single time instant. For the pressure loads, I did not take the maximum pressure as a basis but determined the pressure acting on each surface based on the average of several points. This enhanced the accuracy of the results, the maximum deformation is almost the same, only 0.15 mm difference between the measured and calculated result but the time is still different, so this needs further investigation. Nevertheless, I was able to successfully refine the model.

5.3. További megoldásra váró feladatok

További megoldásra váró feladatok a többi geometriák numerikus modellezése, az üveglap és az inzeret kapcsolatának további vizsgálata súrlódásos kontakt segítségével, a Moldex3D és ANSYS közötti adatátviteli problémák feltárása és javítása, illetve az inzeretek gyártási pontatlanságának számításokban való bevitele.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Ashby M. F.: Materials selection in mechanical design, Butterworth-Heinemann, Oxford, harmadik kiadás (2005)
- [2] Plastics Europe: Plastics- the Facts 2021, Analysis of European plastics production, demand and waste data, Brussels. (2022).
- [3] <http://polimerek.hu/2019/08/09/magyarorszag-muanyagipara-2018-ban/> (2022.12.05.)
- [4] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimerteknika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest (2006).
- [5] Dunai A., Macskási L.: Műanyagok fröccsöntése, Lexica Kiadó, Budapest (2003).
- [6] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Polimerteknika Tanszék: Hőre lágyuló polimerek fröccsöntése című laborsegédlet (2019).
- [7] Kovács J. G.: Fröccsöntött termékek tervezése és szimulációja. PhD értekezés. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gépszerkezettani Intézet (2007)
- [8] Fischer J. M.: Handbook of molded part shrinkage and warpage, Plastics Design Library, Norwich (2003)
- [9] Kazmer D. O.: Injection Mold Design Engineering, Carl Hanser Verlag, Munich, második kiadás (2016)
- [10] Kennedy, P.; Zheng, R.: Flow analysis of injection molds, Carl Hanser Verlag, Munich, második kiadás (2013)
- [11] Guo Z. Z., Li Y., Zhao X. J.: The analysis of core shift in injection mold and its optimization based on AMI. Advanced Materials Research, **189–193**, 2879–2883 (2011).
- [12] Vietri U., Sorrentino A., Speranza V., Pantani R.: Improving the predictions of injection molding simulation software. Polymer Engineering and Science, **51**, 2542–2551 (2011).
- [13] Huang C. C., Truong T. C., Chen S. H.: An effective approach to measuring real-time mold deflection during injection molding. Journal of Polymer Engineering, **31**, 549–560 (2011).
- [14] Park H., Cha, B., Cho S., Kim D., Choi J. H., Pyo B. G., Rhee B.: A study on the estimation of plastic deformation of metal insert parts in multi-cavity injection molding by injection-structural coupled analysis. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **83**, 2057–2069 (2016).
- [15] Colton J. S., Crawford J., Pham G., Rodet V.: Failure of rapid prototype molds during injection molding. CIRP Annals, **50**, 129–132 (2001).
- [16] Chen Y. C., Liao Y. J., Tseng S. C., Giacomini A. J.: Core deflection in plastics injection molding: Direct measurement, flow visualization and 3d simulation. Polymer - Plastics Technology and Engineering, **50**, 863–872 (2011).

- [17] Davoudinejad A., Bayat M., Pedersen D. B., Zhang Y., Hattel J. H., Tosello G.: Experimental investigation and thermo-mechanical modelling for tool life evaluation of photopolymer additively manufactured mould inserts in different injection moulding conditions. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **102**, 403–420 (2019).
- [18] <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=181&l=m> (2022.12.05.)
- [19] <https://www.stratasys.com/en/3d-printers/printer-catalog/objet30-printer/> (2022.12.05.)
- [20] <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=193&l=m> (2022.12.05.)
- [21] <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=76&l=m> (2022.12.05.)
- [22] <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=77&l=m> (2022.12.05.)
- [23] <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=162&l=m> (2022.12.05.)
- [24] https://www.nikon.hu/hu_HU/product/nikkor-lenses/auto-focus-lenses/fx/single-focal-length/af-s-vr-micro-nikkor-105mm-f-2-8g-if-ed (2022.12.05.)
- [25] <https://notebookspecialista.hu/laptop-notebook/asus/asus-vivobook-x556uq-dm592t-barna-notebook-90nb0bh1-m07500-32334-adatlap> (2022.12.05.)
- [26] Hajagos Sz.: Fröccsöntött termékben elhelyezett inzerterek hőtani vizsgálata, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2020).
- [27] Széplaki P.; Hajagos Sz.: Polimer inzerter fröccsöntési ciklus közbeni deformációjának mérése és modellezése, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2021).
- [28] Krizsma Sz., Suplicz A.: Comprehensive in-mould state monitoring of Material Jetting additively manufactured and machined aluminium injection moulds. *Journal of Manufacturing Processes*, **84**, 1298–1309 (2022).
- [29] Béda Gy.: Szilárdságtan. Műegyetemi kiadó, Budapest (1996)
- [30] Széplaki P., Hajagos Sz.: Polimer inzerter fröccsöntés közbeni deformációjának vizsgálata és szimulációjának pontosítása, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2022).
- [31] Széplaki P.: Fröccsöntött termékben elhelyezett inzerter deformációjának vizsgálata, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2020).

7. MELLÉKLET

Idő [s]	Terhelések [MPa]		
	Előlap	Hátoldal	Oldallapok
0	0	0	0
0,14531	0,014692	0,309	0
0,178341	0,1995	0,45693	0
0,216564	0,25897	0,5047	0,016386
0,254036	0,27829	0,52452	0,033503
0,290319	0,28769	0,53509	0,040011
0,326602	0,29584	0,54487	0,045937
0,357442	0,30479	0,55548	0,053399
0,39123	0,32471	0,5763	0,073701
0,4284	0,3665	0,61978	0,11407
0,46323	0,41661	0,67428	0,16086
0,502305	0,45431	0,71285	0,19697
0,532389	0,46738	0,7273	0,20878
0,575225	0,48355	0,74469	0,22415
0,608163	0,49288	0,75519	0,23272
0,647564	0,50452	0,76788	0,24371
0,674124	0,50938	0,77358	0,24795
0,715011	0,51705	0,782	0,25526
0,757903	0,52805	0,79407	0,26557
0,782696	0,53917	0,80507	0,27702
0,819628	0,61826	0,88818	0,35265
0,865401	0,61368	0,88121	0,35085
0,897579	0,62588	0,89373	0,36301
0,930247	0,6394	0,90755	0,37647
0,96193	0,66626	0,93533	0,40257
0,994694	0,66831	0,93689	0,40536
1,02799	0,69928	0,96813	0,43614
1,07648	0,71065	0,98019	0,44715
1,1134	0,72838	0,99789	0,46502
1,14121	0,80569	1,0481	0,56823

6. táblázat: Az inzertet érő nyomások ANSYS 201 R2-ben a 2 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzert esetében javított anyagmodell esetében