



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

SZÉPLAKI PÉTER  
HAJAGOS SZABOLCS  
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA DOLGOZAT  
POLIMER INZERT FRÖCCSÖNTÉS KÖZBENI  
DEFORMÁCIÓJÁNAK VIZSGÁLATA ÉS SZIMULÁCIÓJÁNAK  
PONTOSÍTÁSA

Témavezető:

*Dr. Zink Béla*

adjunktus

Konzulens:

*Dr. Szabó Ferenc*

adjunktus

BUDAPEST, 2022



## NYILATKOZATOK

### *Elfogadási nyilatkozat*

Ez a Tudományos Diákköri Konferencia 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:

*témavezető*

### *Nyilatkozat az önálló munkáról*

Alulírott, Széplaki Péter (FKML8Y) és 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, 2022.11.07

*hallgatók*

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

Külön köszönjük Bartók Dávidnak a fröccsöntőgép használatában és a kísérletben való segédkezést és Krizsma Szabolcsnak a méréselőkészítésében való segítségét.

Emellett köszönjük a Polimertechnika Tanszéknek, hogy biztosították számunkra 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 .....                                         | iv  |
| Jelölések jegyzéke.....                                           | vii |
| 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. Additív gyártástechnológia, PolyJet technológia.....         | 11  |
| 2.3.1. Az additív gyártástechnológia alapjai .....                | 11  |
| 2.3.2. PolyJet technológia .....                                  | 13  |
| 2.4. Polimer inzertek.....                                        | 14  |
| 2.4.1. Inzertekre ható erőhatások .....                           | 14  |
| 2.5. Numerikus modellezés .....                                   | 17  |
| 2.5.1. Szerszám és inzertdeformáció modellezési lehetőségei ..... | 19  |
| 3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések .....            | 22  |
| 3.1. Felhasznált alapanyagok .....                                | 22  |
| 3.1.1. Fröccsöntési alapanyag.....                                | 22  |
| 3.1.2. Inzertek alapanyaga.....                                   | 22  |
| 3.2. Alkalmazott feldolgozó berendezések .....                    | 23  |
| 3.2.1. Fröccsöntőgép és szerszám .....                            | 23  |
| 3.2.2. Objet 30 Pro .....                                         | 24  |
| 3.2.3. TA Instruments DMA Q800 berendezés.....                    | 25  |
| 3.3. Alkalmazott vizsgálati eszközök.....                         | 25  |
| 3.3.1. Mérő számítógép .....                                      | 25  |
| 3.3.2. Adatfelvétel egység .....                                  | 26  |
| 3.3.3. Nyúlásmérő bélyeg .....                                    | 26  |
| 4. Kísérleti/fejlesztési rész .....                               | 27  |
| 4.1. Fizikai mérések.....                                         | 28  |
| 4.1.1. DMA mérés .....                                            | 28  |
| 4.1.2. Nyomásmérés a fröccsöntési ciklus közben.....              | 29  |
| 4.1.3. Mérés felépítés .....                                      | 33  |
| 4.1.4. Mérési eredmények kiértékelése .....                       | 34  |

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| 4.2. Numerikus számítások eredményei.....          | 37 |
| 4.2.1. Autodesk CFD 2023-as eredmények.....        | 38 |
| 4.2.2. Autodesk MoldFlow numerikus számításai..... | 40 |
| 5. ÖSSZEFOGLALÁS .....                             | 43 |
| 6. Felhasznált források .....                      | 44 |

## JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

### Latin betűk

| Jelölés        | Megnevezés, megjegyzés, érték                                  | Mértékegység   |
|----------------|----------------------------------------------------------------|----------------|
| f              | biztonsági tényező (fear factor)                               | -              |
| p              | nyomás (pressure)                                              | bar            |
| E              | rugalmassági modulus (                                         | MPa            |
| F              | erő (force)                                                    | N              |
| I              | másodrendű nyomaték (second moment of inertia)                 | m <sup>4</sup> |
| L              | szerszám magassága (height of the mold)                        | mm             |
| M              | monomer-egység móltömege (molecular weight of monomer unit)    | g/mol          |
| Q              | elsődleges nyomaték (first moment)                             | m <sup>3</sup> |
| T              | hőmérséklet (temperature)                                      | °C             |
| T <sub>g</sub> | üvegesedési átmenet hőmérséklet (glass transition temperature) | °C             |
| V              | térfogat (volume)                                              | m <sup>3</sup> |
| V              | nyíró erő (shear force)                                        | N              |

### Görög betűk

| Jelölés                 | Megnevezés, megjegyzés, érték                                                                                                    | Mértékegység       |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| $\alpha$                | lineáris hőtágulási együttható (linear thermal expansion)                                                                        | 1/K                |
| $\delta_{\text{nyomó}}$ | alakváltozás (deformation)                                                                                                       | mm                 |
| $\nu$                   | fajtérfogat (specific volume)                                                                                                    | cm <sup>3</sup> /g |
| $\pi$                   | az anyagra jellemző nyomáskorrekciós állandó (materials specific pressure correction constant)                                   | MPa                |
| $\sigma_D$              | kifáradási határ (fatigue volume)                                                                                                | MPa                |
| $\sigma_e$              | folyáshatár (yield stress)                                                                                                       | Mpa                |
| $\sigma_{\text{határ}}$ | határfeszültség (                                                                                                                | MPa                |
| $\sigma_{\text{Mises}}$ | von Mises feszültség (von Mises stress)                                                                                          | MPa                |
| $\omega$                | a makromolekula saját térfogatát figyelembe vevő korrekciós állandó (the correction constant for the macromolecule's own volume) | cm <sup>3</sup> /g |
| $\gamma$                | nyíró deformáció (shear strain)                                                                                                  | -                  |
| $\mu$                   | Poisson-tényező (Poisson's ratio)                                                                                                | -                  |
| $\tau$                  | csúsztató feszültség (shear stress)                                                                                              | MPa                |

## Rövidítések

| Rövidítés | Megnevezés                                                               |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------|
| 3D-s      | háromdimenziós (three dimensional)                                       |
| CAD       | Számítógéppel segített tervezés (Computer-Aided Design)                  |
| DMA       | dinamikus mechanikai vizsgálat (Dynamic Mechanical Analysis)             |
| DSC       | differenciális pásztázó kalorimetria (Differential Scanning Calorimetry) |
| FDM       | ömlődékrétegzéses technológia (Fused Deposition Modeling)                |
| LGP       | fényvezető lemez (Light Guide Plate)                                     |
| LOM       | rétegelt termékgyártás (Laminated Object Manufacturing)                  |
| PC        | polikarbonát (Polycarbonate)                                             |
| PMMA      | polimetil-metakrilát (Poly(methyl methacrylate))                         |
| PP        | polipropilén (polypropylene)                                             |
| PP        | polipropilén (polypropylene)                                             |
| PS        | polisztirol (Polystyrol)                                                 |
| RPT       | gyors Prototípusgyártás (Rapid Prototyping)                              |
| SLA       | sztereolitográfia (stereolithographic)                                   |
| SLS       | szelektív lézerszinterezés (selective laser sintering)                   |
| UV        | ultraibolya sugárzás (Ultraviolet light)                                 |
| WLF       | Williams–Landel–Ferry egyenlet                                           |



## 1. BEVEZETÉS

A polimerek mára a legtöbbet használt szerkezeti anyagok, ezért a műanyagipar (alapanyag-előállítás és feldolgozás) a gazdaság egyik meghatározó eleme. 2021-ban 391 millió tonna műanyagot állítottak elő vagy dolgoztak fel világszinten [1], Magyarországon közel 2,7 millió tonnát [2]. 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 [3]. A technológia szakaszos, ennek ellenére termelékeny, Magyarországon 2018-ban 328 000 tonna terméket állítottak elő, ezzel a technológiával [2].

A fröccsöntéssel előállított termékekbe lehetőség van inzerterek elhelyezésére, ezek előre, egy külön eljárással előállított alkatrészek a fröccsöntési ciklus elején, a befroccsöntés előtt kerülnek be a szerszámba. Ezek az inzerterek különböző céllal kerülhetnek be a termékbe, a legelterjedtebb ezek közül az inzerteres csavarkötés előállítása, de akár a szerkezet erősítésére is alkalmasak lehetnek az inzerterek. Alapanyaguk lehet fém, polimer, kerámia, illetve kompozit is, polimer esetében akár additív gyártástechnológiával előállított inzerterek is alkalmazhatóak. Ebben az esetben lehetőség van az építési irány megválasztására, ami hatással van az inzerter mechanikai tulajdonságaira és így közvetetten a termék mechanikai tulajdonságaira is.

A fröccsöntés során az inzerternek 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 [3]. Ezeknek a számításoknak fontos tényezője az alkalmazott állapotegyenlet, illetve a számításokra szánt idő nagysága is, mivel ezek nagyban befolyásolják a szimulációk pontosságát [4].

Dolgozatunk célja, hogy a korábban általunk mért inzerterdeformációk és a szimulált értékek közötti eltérés okát meghatározzuk. Ennek okán megnézzük, hogy a szimulációs programok által számolt nyomásviszonyok és az inzerterre ható erők pontosak-e, vagy az anyagmodellben keresendő e két érték közötti nagyságrendi eltérés. Mérések során meghatározzuk a legfontosabb peremfeltételeket és modellezési paramétereket. A numerikus számítások elvégzése után pedig összehasonlítjuk a mért eredményekkel, illetve, ha szükséges tovább pontosítjuk a modellt.

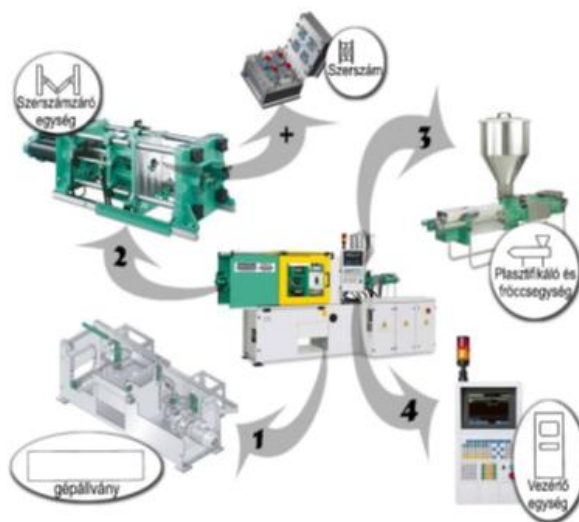
## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Ebben a fejezetben bemutatjuk 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 közel tetszőleges 3D-s terméket. A fröccsöntés alapelve, hogy a viszkózusan 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 [3].

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 [5].

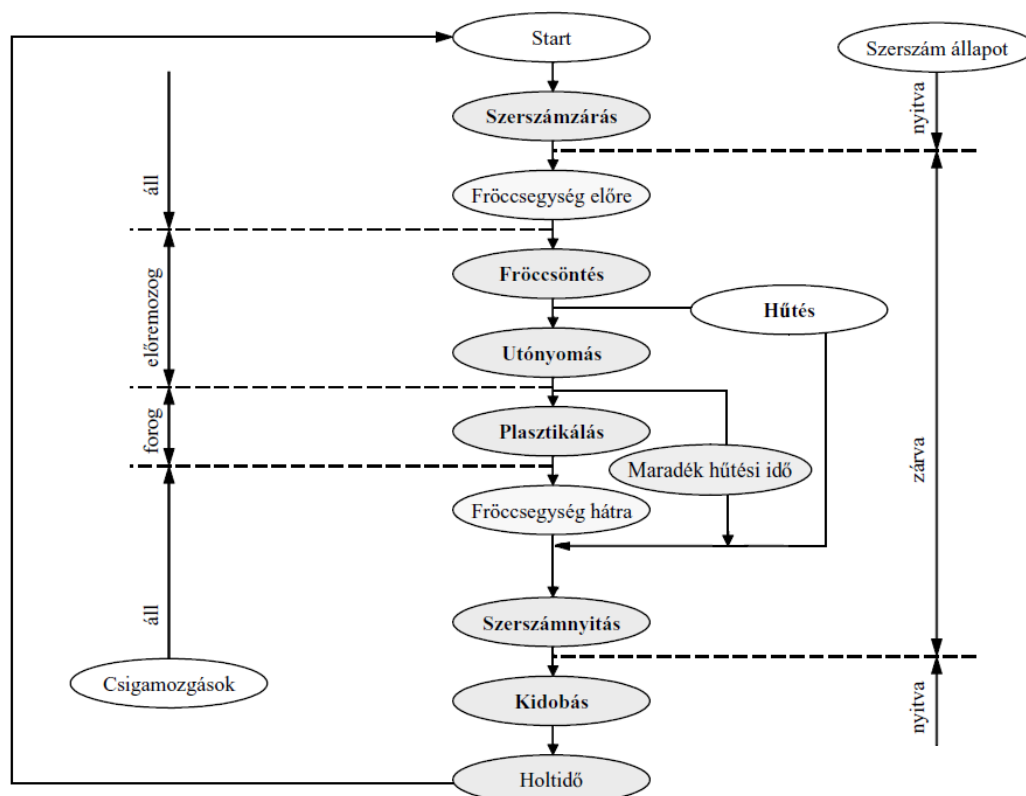


**1. ábra:** A fröccsöntő gép részegységei (1) gépállvány, 2) szerszámzáró egység, 3) fröccsaggregát, 4) vezérlő egység, +) szerszám) [5]

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 viszkózusan folyós állapotba hozzák, ezt nevezik plasztifikálásnak. A második folyamatban történik a befroccsöntés ez az alakadás folyamata. A végső folyamat pedig az alakrögzítés, azaz amikor a zárt szerszámban

kontrolláltan lehűtik az alapanyagot, amíg az olyan állapotba kerül, hogy biztonságosan el lehessen távolítani a szerszámból [5].

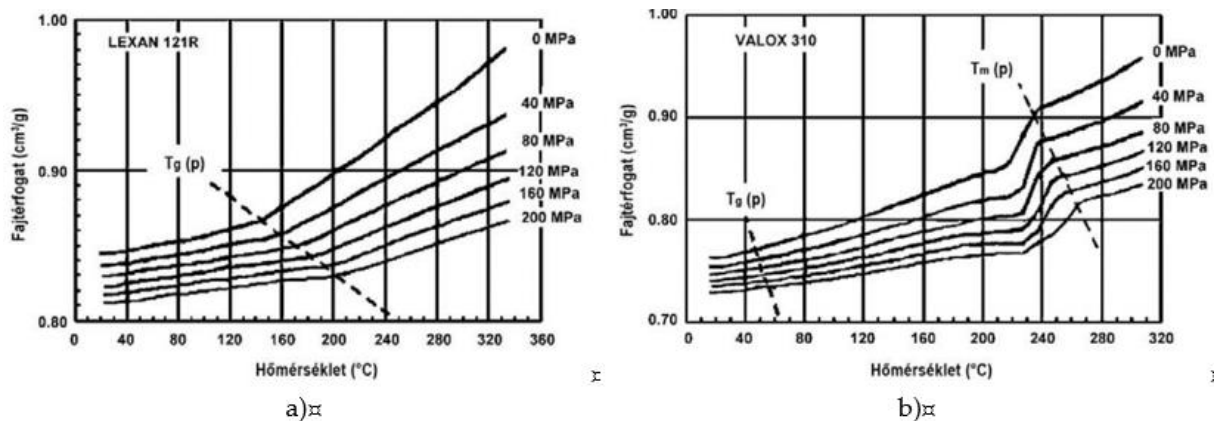
Egy fröccsöntési ciklus kétféleképpen lehet jellemezni, az egyik a mechanikai mozgáselemek tükrében, a másik az állapothatározók függvényében. Az első esetben a ciklus 6 szakaszból áll, amelynek kezdete a szerszámzárás. A második lépésben a fröccsegység előre mozdul és rázár a szerszámmra, a harmadik 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 szerszámhoz 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 anyag előállítás, 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 befroccsöntés 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 [3]. A 2. ábrán látható a fröccsöntés folyamata ezekkel a szakaszokkal.



2. ábra A fröccsöntés folyamata [6]

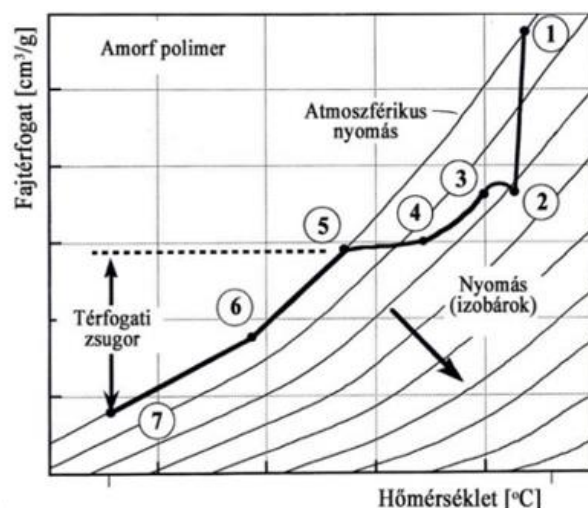
A másik módszer az állapothatározók függvényében vizsgálja a fröccsöntési ciklust. Ezek az állapothatározók: a nyomás (p), a hőmérséklet (T) és a fajtérfogat (v), amiknek

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[7]

A fröccsöntési folyamatot a p-v-T diagram (4.ábra) alapján vizsgálva is 6 szakaszra lehet bontani. Az első szakaszban (egyés és kettes pont között) történik a befroccsöntés, ahol a nyomás nő, ahogy az ömledék kitölti a szerszámüreget. A második szakaszban (kettes és hármas 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 anyagtöbblet bejuttatásával. Ezután a termék hűlése következik először állandó fajtérfogaton (négyes ötös pont között), majd ahogy eléri az atmoszférikus nyomást, állandó nyomáson (ötös 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, amíg el nem éri a környezeti hőmérsékletet [4].



4. ábra A fröccsöntési folyamat p-v-T diagramja [5]

Az állapothatározók 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,  $\pi$  anyagfüggő nyomáskorrekciós állandó és  $\omega$  térfogat jellegű korrekciós állandó [3].

## 2.2. Fröccsöntő szerszámok

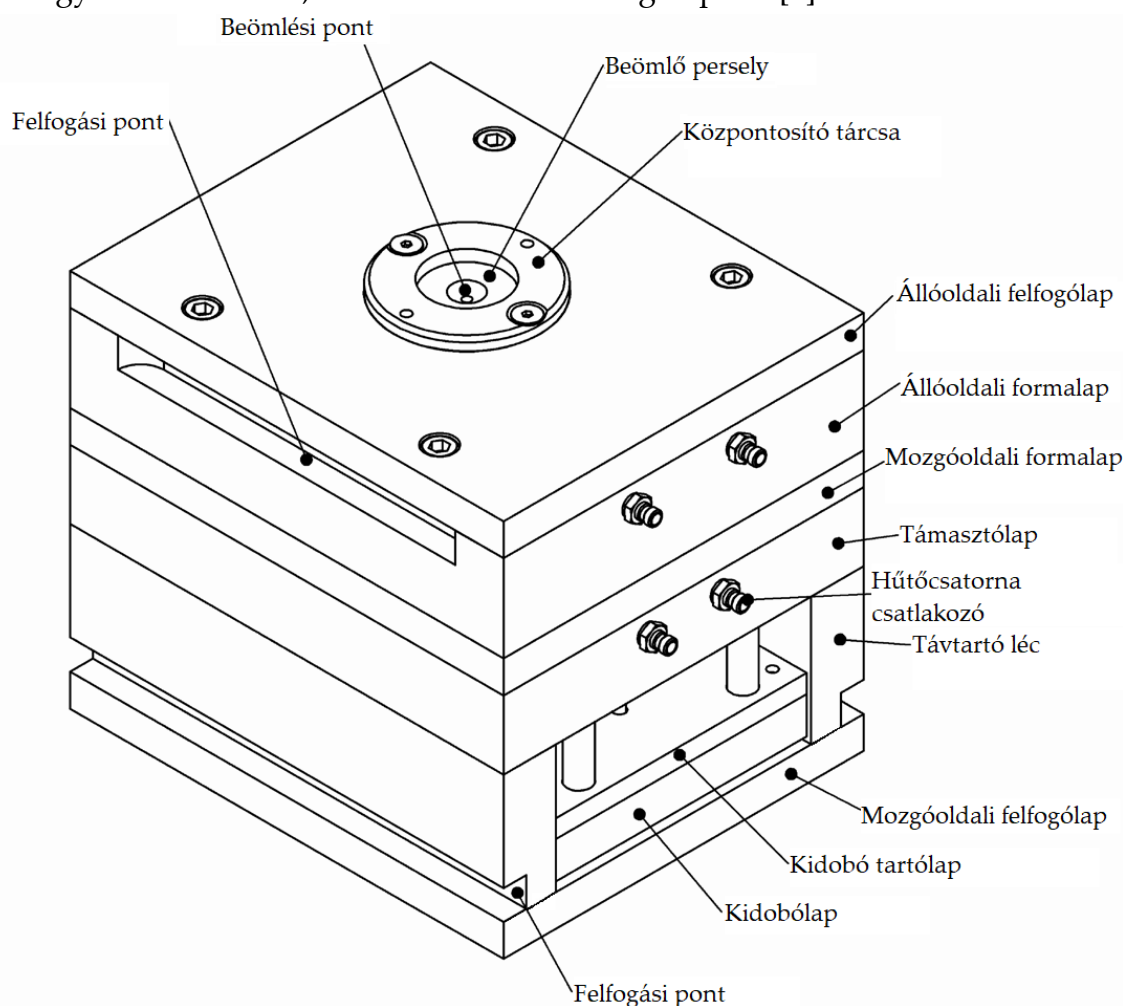
A fröccsöntőszerszám egy olyan komplex rendszer, aminek több követelménynek kell megfelelnie a fröccsöntés során. Az egyik legfontosabb követelménye, hogy a polimerömléket a szerszámüregben tartsa és ezáltal a polimerömlék megfelelően kitöltse a szerszámüreget, így létrehozva a kész terméket. A másik 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 [8].

### 2.2.1. A fröccsöntő szerszámok szerkezeti felépítése

Egy fröccsöntő szerszámnak nagyon sok alkatrésze van szüksége, hogy a vele támasztott követelményeknek és feladatokat eleget tegyen. Nagyon sok technikai megoldású szerszám létezik, az egyik legegyszerűbb a kétlapos, hidegcsatornás szerszám [8].

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 gépen, az állóoldali formalap, ebben helyezkedik el a formabetét, általában a csésze oldal,

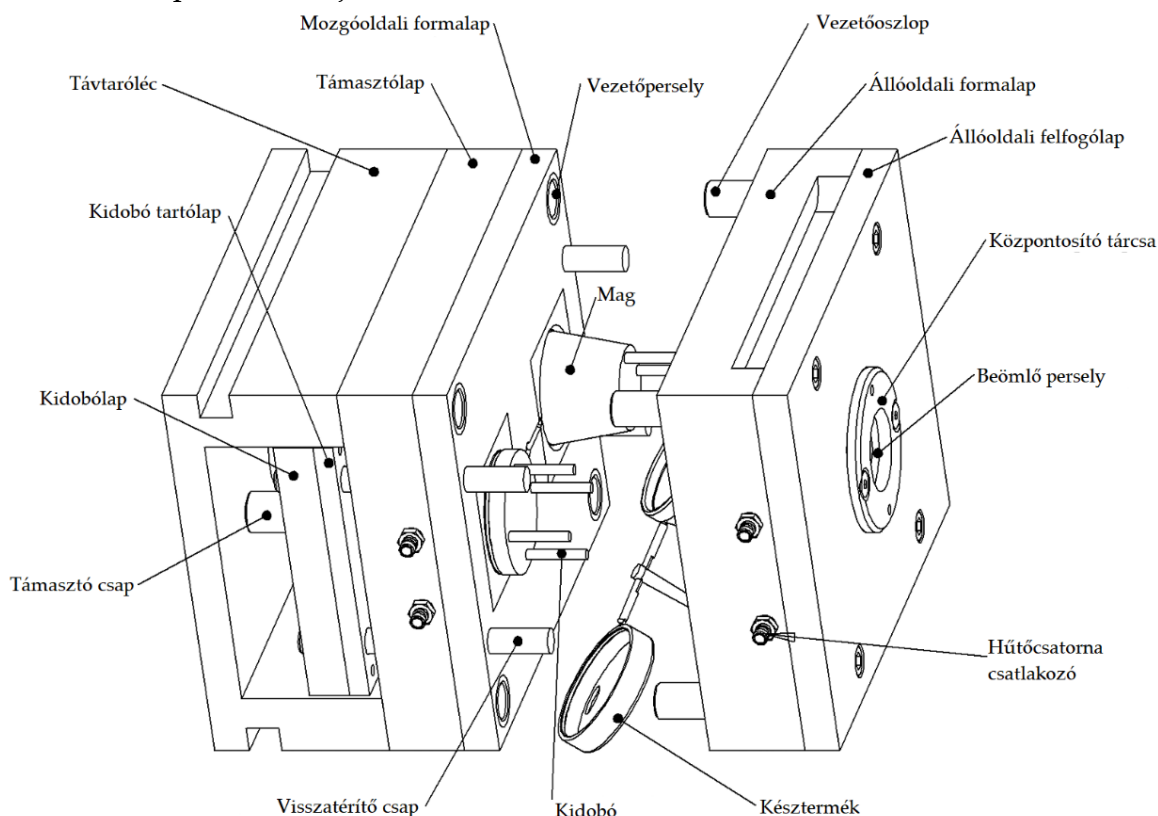
utána következik a mozgóoldali szerszámbetét, amiben szintén a formabetét helyezkedik el, de ez a mag betét, ez az elrendezés lehetővé teszi, hogy a mozgóoldali betétre zsugorodjon rá a termék és így könnyen eltávolítható legyen. Ezután egy támasztólap következik, erre a lapra nem minden esetben van 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 [8].



**5. ábra:** Kétlapos fröccsöntő szerszám részei zárt állapotban [8]

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 befroccsöntés 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 [8].

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



6. ábra: Kétlapos fröccsöntő szerszám részei nyitott állapotban [8]

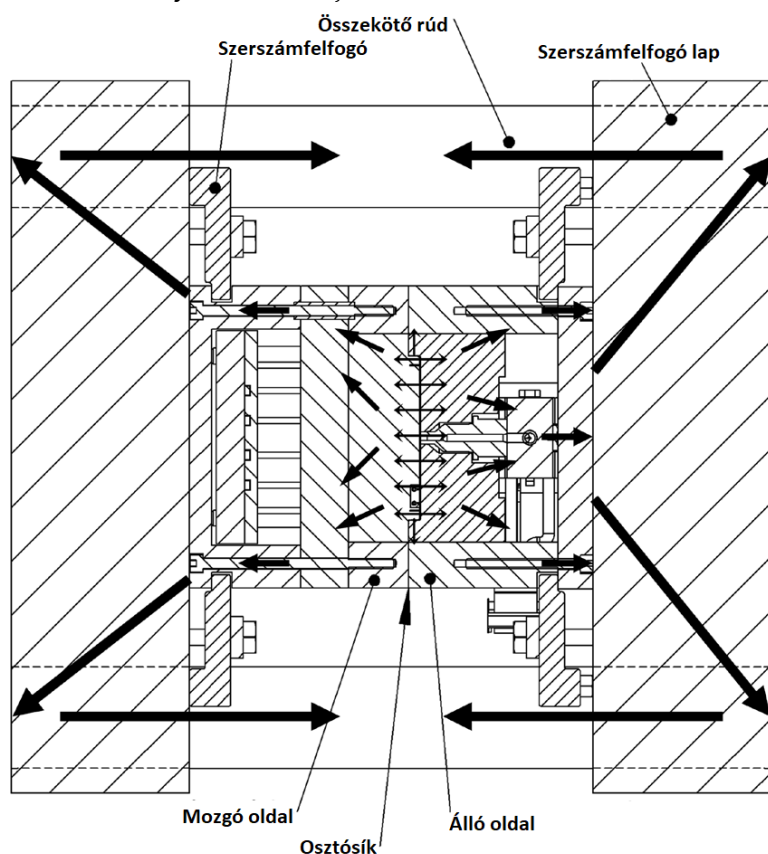
Kidobáskor a gép kidobórendszere előre mozdítja a kidobólapot és a hozzátartozó kidobókat, így eltávolítva a terméket a szerszámból. A kidobórendszer további elemei a visszatérítő csapok, amelyek átmérője sokkal nagyobb, mint a kidobóké, illetve hosszabbak is, ezekre, azért van szükség, hogy ha a kidobáskor 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 [8].

A 6.ábrán egy kétfészkés szerszám látható, azonban a költségcsökkentés és a gyorsaság miatt ennél több fészkekkel rendelkező szerszámot használnak. Nagy termék esetében azonban egyfészkés 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 elosztócsatornát egy szigetelő réteggel veszik körül, ami így nem engedi megszilárdulni azt. 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 lépésben kerül eltávolításra [8].

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 [8].

### 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. Az 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 [8].



7. ábra: A fröccsöntés során fellépő feszültségek

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 igénybevétel ébred benne. 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 [8].

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 tönkremennek, 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:

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

ahol  $\sigma_{\text{határ}}$  a határfeszültség,  $\sigma_e$  a folyáshatár,  $f$  a biztonsági tényező,  $\sigma_D$  a kifáradási határ [8].

Fröccsöntő szerszámok esetében azonban sokkal jelentősebb hiba lehet az alakváltozás. Ennek oka az, hogy nagy hajlító igénybevétel estén az osztósíokban 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 [8].

Az alakváltozás csökkentésének legegyszerűbb módja a lapok vastagságának növelése, ez abból következik, hogy a vastagság növelésével nő a szerszám lap 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 [8].

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 szerszámmázó erő miatt. Ebben az esetben a feszültséget a (3) egyenlettel lehet kiszámolni:

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

ahol  $\sigma$  a feszültség MPa-ban,  $F$  az erő N-ban,  $A$  pedig a keresztmetszete mm<sup>2</sup>-ben. A deformációt pedig az egyszerű Hooke-törvénnyel lehet kiszámolni (4)

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

ahol az  $\varepsilon$  a deformáció mm/mm-ben,  $\sigma$  a feszültség MPa-ban,  $E$  pedig a rugalmassági modulus MPa-ban [8].

Az alakváltozást pedig az (5) egyenlettel lehet kiszámolni:

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

ahol az  $\delta_{nyomó}$  az alakváltozás mm-ben,  $\varepsilon$  a deformáció mm/mm-ben,  $L$  pedig a szerszám magassága mm-ben [8].

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  $\tau$  a nyírófeszültség MPa-ban,  $F$  az erő N-ban,  $A$  pedig a felület mm<sup>2</sup>-ben [8].

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 szerszámok közvetlen alátámasztásával a nyírófeszültségek és a támasztócsapok közeli hajlítás jelentősen csökken. Sajnos a támasztócsapok elhelyezése ütközhet más alkatrészekkel, beleértve a kilököket és a kidobószárat. Ezért a támasztócsapok különböző elrendezéseit és méreteit elemezni kell. Ha a szerszámok hajlítása kritikus kérdés, akkor a kidobószerkezet elrendezését úgy lehet módosítani, hogy több nagyméretű támasztócsap legyen az ideális helyeken [8].

## 2.3. Additív gyártástechnológia, PolyJet technológia

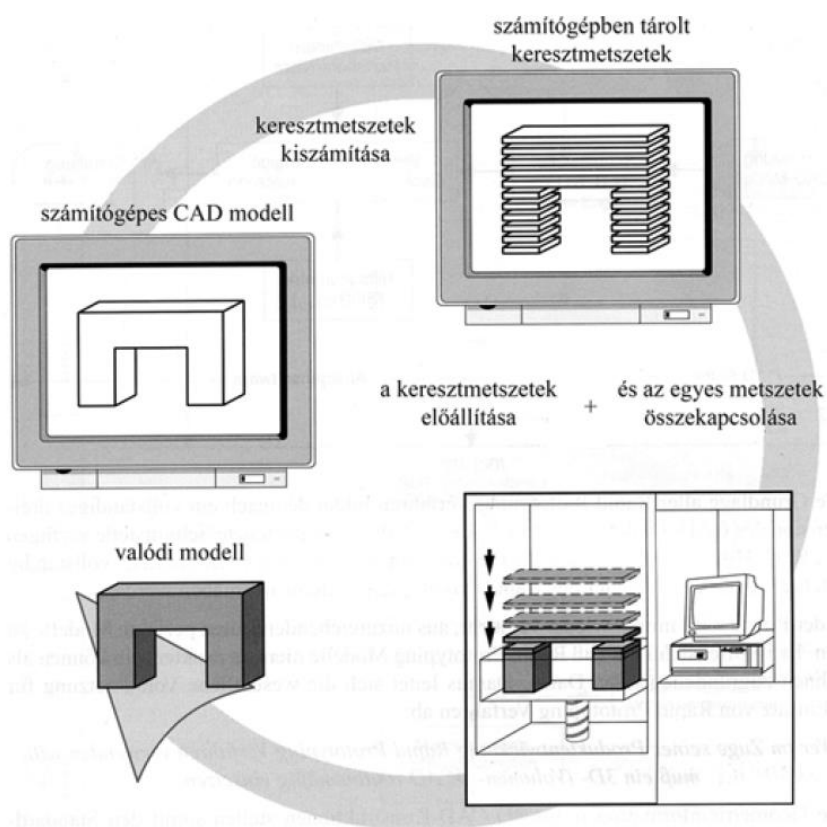
Az additív gyártástechnológia egy rendkívül összetett és szerteágazó tudomány, amelynek rengeteg fajta és féle megoldása van a termékek legyártására. Ezek közül a legáltalánosabb és legjobban elterjedt az ömledékrétegezési technológia (Fused Deposit Modeling, FDM), amelyet 1988-ban a Stratasys két alapítója, Scott and Lisa Crump fejlesztett ki.

### 2.3.1. Az additív gyártástechnológia alapjai

Az additív gyártástechnológia egy igen különleges és rengeteg potenciált magában hordozó gyártási módszer. Rengeteg dologban eltér a korábban már alkalmazott technológiáktól, de a legnagyobb különbséget az jelenti, hogy a míg egy klasszikus

gyártástechnológia során, mint például az esztergálás vagy marás, egy nagyobb térfogatú előgyártmányból indulunk ki, és anyagot kell eltávolítani, ami ezek után hulladékként kezelendő, addig ennél a technológiánál erre nincs szükség. Azonban az additív gyártástechnológiánál anyaghozzáadással épül fel a kívánt geometria, így a konstrukciójából adódóan nem, vagy csak minimális hulladék képződik, ami nagy előny a hagyományos technológiákkal szemben [9].

Az additív gyártástechnológia másik különlegessége, hogy a munkafolyamatok elvégzéséhez szükség van egy digitális 3 dimenziós (3D) modellre a gyártandó termékről, nem elegendő egy 2 dimenziós (2D) rajz [9]. Ezt a modellt a gyártás előtt síkokra szeletelik egy tetszőleges program segítségével, majd síkonként, rétegenként építik fel a valóságban a modellt (8.ábra). Az additív gyártástechnológia alapvetően 3 nagy ágazatra különíthető el, attól függően, milyen alapanyaggal dolgoznak. Beszélhetünk részecske, lap és folyadék alapú technológiákról. A részecske alapú technológiák esetében a felhasznált alapanyagot kötőanyag segítségével tartják egyben, vagy bizonyos esetekben megolvasztják azt, így elérve a kívánt geometriát. Előbbire a 3D nyomtatás, utóbbira a Szelektív lézerszinterezés (SLS) egy klasszikus példa [3].



8. ábra Az additív gyártástechnológia folyamatábrája [3]

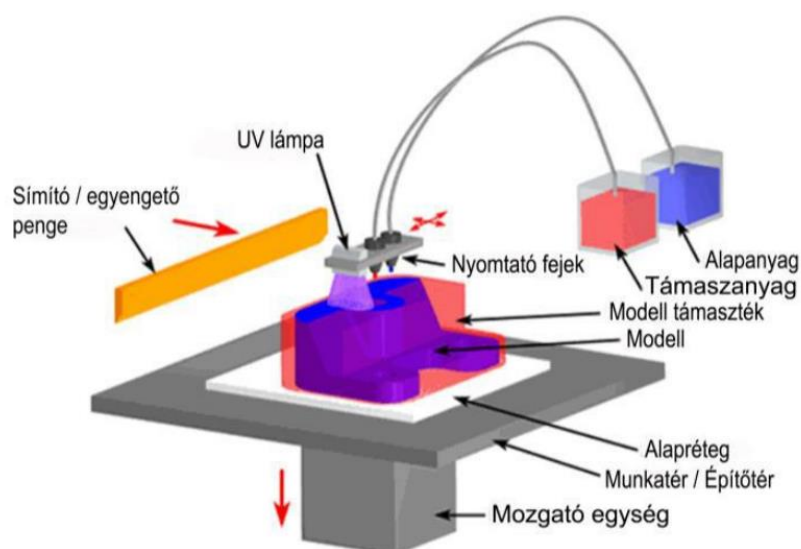
Amennyiben lap geometriájú alapanyaggal dolgoznak, abban az esetben a kötőanyag a rétegek között helyezkedik el, ezzel megadva a termék szilárdságát. A legáltalánosabb példa erre a Magyarországon első additív technológiaként megjelenő

rétegelt termékgyártás (Laminated Object Manufacturing, LOM). Ennek a gyártási eljárásnak az esetében az egyes rétegeket papírlapokból vágják ki lézerek segítségével és ragasztják össze, így felépítve a kívánt geometriát. Ennek a technológiának azonban nagy hátránya, hogy nagy mennyiségű hulladék keletkezik [3,9].

A legnépszerűbb additív gyártással dolgozó gépek a harmadik fajta, folyadék alapanyaggal dolgoznak, ez lehet fotopolimer és termoplasztikus polimer. Az első esetben a térhálósodást és a szilárd halmazállapotot valamilyen hő- vagy fénysugárzás váltja ki az anyagból, míg utóbbi esetében az eredetileg szilárd alapanyagot hő segítségével megolvasztják, felviszik a termékre, majd ott ismét lehűtik vagy hagyják lehűlni, amivel ismét megszilárdítják, immár a kívánt alakban. Előbbire a PolyJet, utóbbira az ömledékrétegezéssel technológia a legáltalánosabb példa.

### 2.3.2. PolyJet technológia

Ahogy korábban megemlítettük, PolyJet technológia egy fotopolimerrel dolgozó technológia, amely egy UV fényre szilárduló alapanyag segítségével építkezik rétegről rétegre. Az alapanyag folyékony mivoltából adódóan a merevségről és a stabilitásról nem lehet beszélni, így ennél a technológiánál szükség van támasztásra, amit szintén egy fotopolimerrel oldanak meg (9.ábra). Ennek a gyártási eljárásnak a nagy előnye, hogy ez a támaszanyag vízzel oldható, a gyártás után könnyen eltávolítható, aminek köszönhetően a kész termék megtisztítása egyszerű folyamat és a termék felülete se sérülhet ennek folyamán. További előny, ami a kiértékeléseket és a numerikus számításokkal való modellezést nagyban megkönnyíti, hogy ez a technológia teljes térkitöltéssel állítja elő a kívánt terméket, így tömör testként lehet kezelni a modellezésnél [10].



9. ábra A PolyJet technológia felépítése [9]

Ennek ellenére teljesen anizotróp testről továbbra sem lehet beszélni, mivel még mindig egy rétegről rétegre való építkezéssel készül az adott munkadarab. Ezt persze, hogy milyen szinten kell figyelembe venni és mennyire hangsúlyos ez egy termék tervezésénél nem egyértelmű. Kęsy és Kotliński munkája alapján [11] jelentős és fontos faktor az építési irány. Az általuk lefolytatott mérések során PolyJet próbatesteket vizsgáltak húzó igénybevételre és ott eltéréseket tapasztaltak az építési irány függvényében. Persze meg kell jegyezni, hogy egy fröccsöntési folyamat során inkább a hajlító és a nyíró terhelés a jellemző, így ezen eredményeket nem lehet teljes egészében átemelni. Ezzel szemben áll Colton és társainak a megállapítása [12], akik szerint bár van jelentősége az építési iránynak, azonban ez olyan csekély, hogy ez nem egy elsődleges szempont a tervezés esetében ilyen technológiánál.

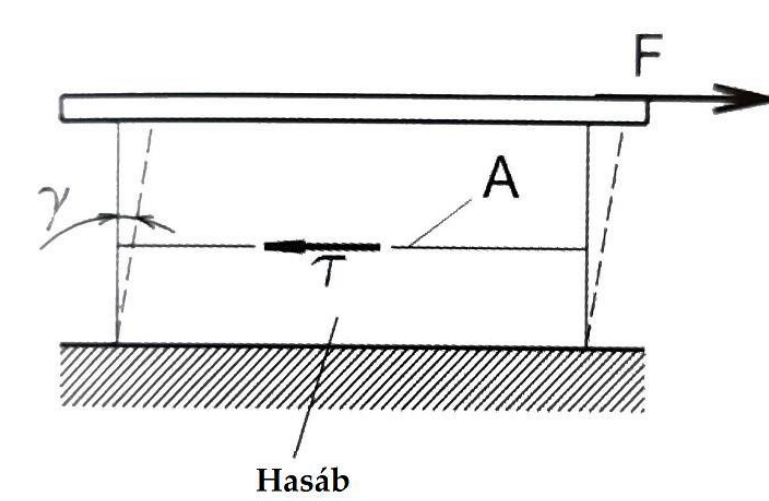
## 2.4. Polimer inzertek

A fröccsöntött termékek a gyártási technológiából adódóan rendkívül sokszínű formájúak és célúak lehetnek. Előfordulnak olyan termékek is ebből adódóan, amelyek tartalmazznak valamilyen előgyártmányt magukba. Ezek lehetnek erősítő szálak vagy menetes kialakítások, hogy stabilabban lehessen csavarkötést létrehozni a termékkel. Az ilyen előgyártmányokat összefoglaló nevükön inzerteknek nevezik.

Ezek az inzertek az esetek jelentős hányadában fémből készülnek, ami a termék működésére, mechanikai tulajdonságaira igen előnyösen hat, azonban az újrahasznosítást nagy mértékben megnehezíti és drágítja, mivel a teljes körű újrafeldolgozáshoz ezeket az fém elemeket el kell távolítani az adott termékből. Ennek kiküszöbölésének érdekében lehetne polimer inzerteket alkalmazni, azonban a mai ipari körülmények között ez még nem egy elterjedt megoldás. Annak okán, hogy ez a terület még igen gyerekcipőben jár és a kutatások még aktívan folynak és/vagy nem publikusak az eredményeik, az irodalmi forrásai is igen limitáltak a témának. Ennek ellenére azonban vannak olyan gyors prototípusgyártással (Rapid Prototyping, RPT), illetve fém inzertekkel történő kutatások, amelyeken keresztül egy tisztább képet lehet kapni a polimer inzerteket ért erőhatásokról és az általuk elszenvedett deformációról.

### 2.4.1. Inzertekre ható erőhatások

Az általunk kialakított inzertek amódon lettek kialakítva, hogy a fröccsöntési ciklus során nyíró igénybevételnek vannak kitéve elsősorban. A terhelés a geometriából adódóan egy hasáb nyírására vezethető vissza (10.ábra), és mivel a PolyJet technológiának köszönhetően tömör testként tudtuk őket nyomtatni, ezért tekinthetünk rájuk egy izotróp lineárisan rugalmas testként. Ennek köszönhetően alkalmazható rájuk a Hooke-törvény nyírásra vonatkoztatott formulája [13].



10. ábra Nyíró igénybevételnek kitett hasáb sematikus ábrája [14]

A legáltalánosabb alakot az egyszerűsített Hooke-törvényből [13] származtathatjuk, amely esetében az alábbi lineáris összefüggést kapjuk (7):

$$\tau = G \cdot \gamma, \quad (7)$$

ahol  $\tau$  a csúsztató feszültség,  $\gamma$  a nyíró deformáció  $G$  pedig a csúsztató rugalmassági modulus („shear modulus”). A csúsztató rugalmassági modulus meg kell jegyezni, hogy nem egy független anyagjellemző, hiszen mind a rugalmassági modulustól ( $E$ ), mind a Poisson-tényezőtől ( $\mu$ ) függ az értéke az alábbi módon (8):

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (8)$$

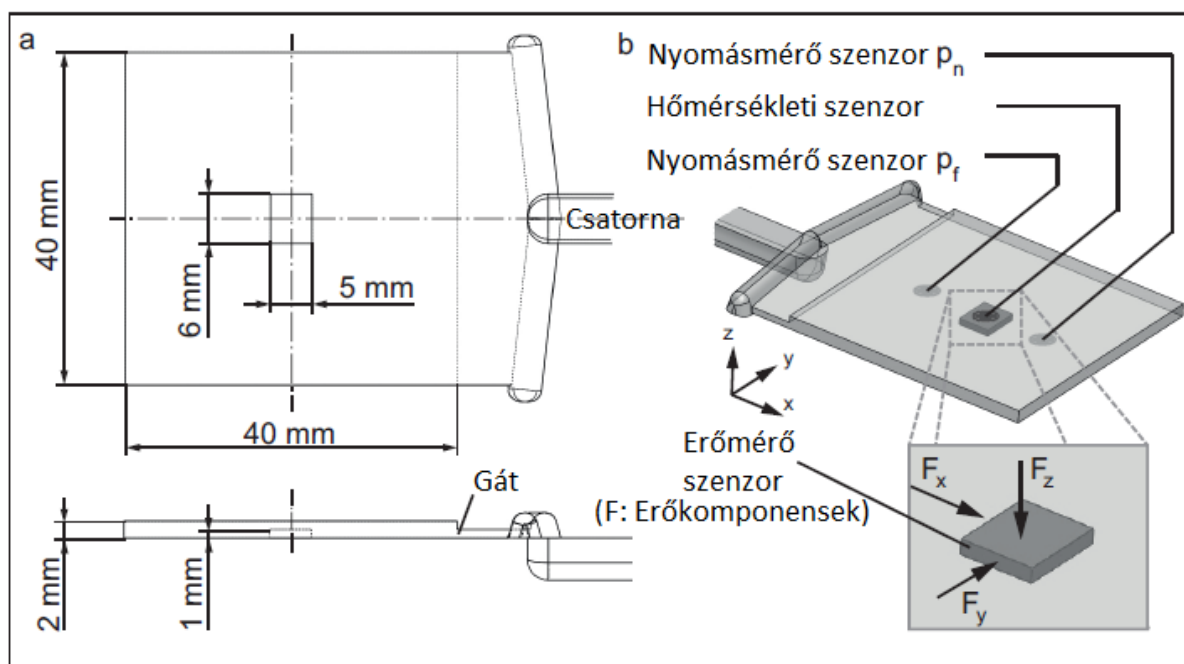
A nyíró igénybevétel számítására ömledékáramban Rahmati és Dickens munkájában [15] találhatunk egy formulát, akik hasonló inzert kialakításra az alábbi összefüggést írták fel (9):

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot a}, \quad (9)$$

ahol  $V$  a nyíró erő,  $Q$  semleges tengelytől kifele eső rész statikai nyomatéka a súlyponti tengelyre,  $I$  a másodrendű nyomaték  $a$  pedig keresztmetszet szélessége [13,15].

Ennek az erőhatásnak a mérése egy igen nehéz és összetett feladat. A legjobb eredményt talán Heinle és Drummer érte el [16], akik ki akarták deríteni, milyen erőhatások hatnak az ilyen inzertekre, annak érdekében, hogy kalkulálható legyen tervezéskor, például érzékeny elektronikai eszközök esetében, pontosan mit is kell kibírnia egy ilyen elemnek, hogy az később is működőképes legyen [16].

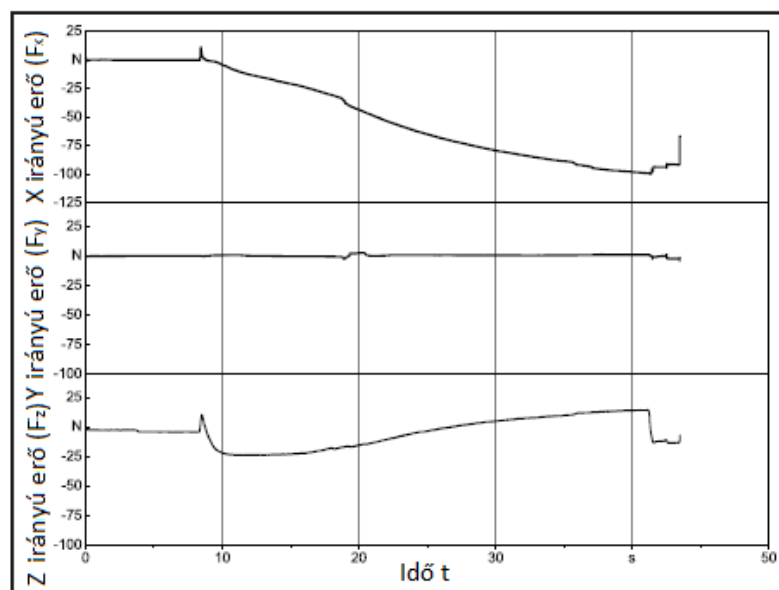
Méréseik során két nyomásmérő szenzort, egy hőmérséklet mérő szenzort és egy erőmérő szenzort alkalmaztak, ahogy azt a 11. ábra mutatja.



Elképzeléseik és modellezéseik szerint az inzertet, jelen esetben erősmérő szenzort egy nyomásmező vesző körbe, aminek következtében egy dinamikusán változó terhelés fogja érni a testet, mégpedig nem csak az ömledékáramnak az irányából, hanem mindenfelől [16]. Ennek a szemléltetését segíti a 12. ábra.

Az ebben a cikkben bemutatott eredmények azt bizonyítják, hogy ez a mérési koncepció olyan adatokat szolgáltat, amelyek koherensek értelmezhetőek, és így

alapját képezhetik a további vizsgálatoknak. E területen végzett munkájuk remek kiindulási alapként szolgálhat. Arra a következtetésre jutottak Heinle-ék, hogy az ehhez hasonló összetett fröccsöntési folyamatot nagy körültekintéssel, megfelelő tervezéssel és gyártással kell végezni. Nemcsak az erő nagysága, hanem az kitöltés és annak időtartama is lényeges. Megállapították, hogy a kitöltési fázisban volt abszolút értékben a legnagyobb az erő, majd a hűtési fázisban ez egy állandó értékre állt be (13.ábra) [16].



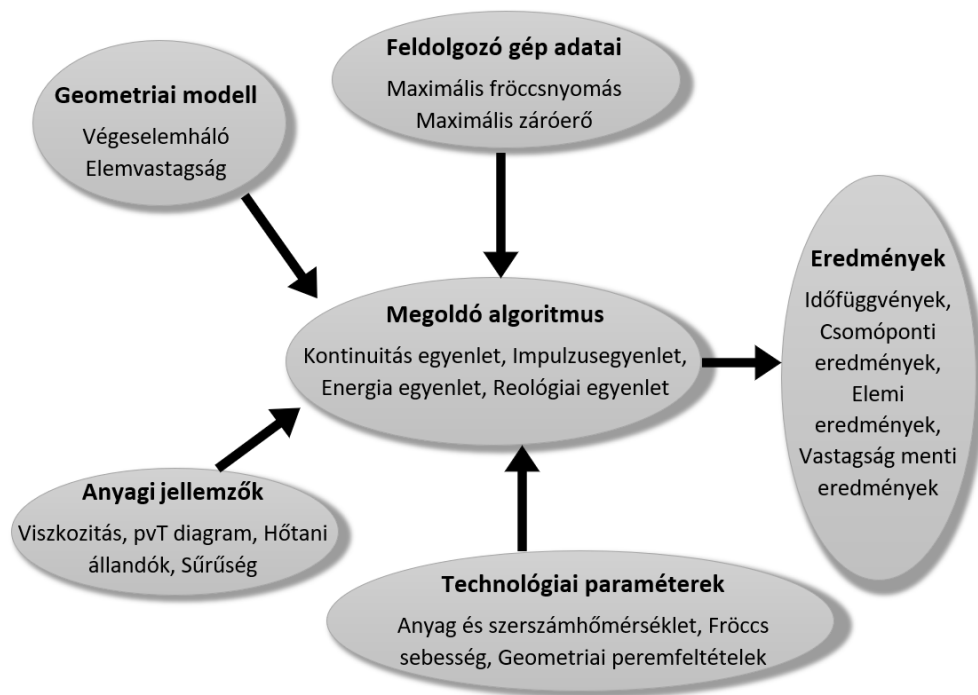
13. ábra Erőlefutások a fröccsöntési ciklus során Heinle és Drummer mérései során [16]

## 2.5. Numerikus modellezés

A fröccsöntés szimulációja 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 [17].

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.



14. ábra: A fröccsöntési szimulációs programok működési vázlatja [6]

A geometria modelleket hálózásnak kell alávetni, hogy a program képes legyen számolni velük. Ezt többféleképpen lehetséges, lehet középsíkhálózás, lehet felületi hálózás és térfogati hálózás [6,17].

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 szerszám betét.
- Az olvadék  $q$  áramlási sebessége vagy a  $p$  nyomás azon a felületen van megadva, ahol az olvadék belép az üregbe.
- Feltételezve, hogy a nyomásadat atmoszférikus, a nyomás nulla az ömledékfronton [17].

Hőmérséklettel kapcsolatos peremfeltételek:

- Az üreg vastagságán keresztüli hőmérsékletprofilt arra a felületre írják elő, amelyen keresztül az ömledéket befecskendezik.
- A hőmérsékletet minden szerszámhatáron előírják. Azonban megengedhető, hogy az egyes határfelületeken különböző hőmérsékleteket írjanak elő [17].

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

- viszkozitás,
- fajlagos hőkapacitás,
- hővezető képesség,
- áramlásmentes vagy átmeneti hőmérséklet,
- pvT adatok [17].

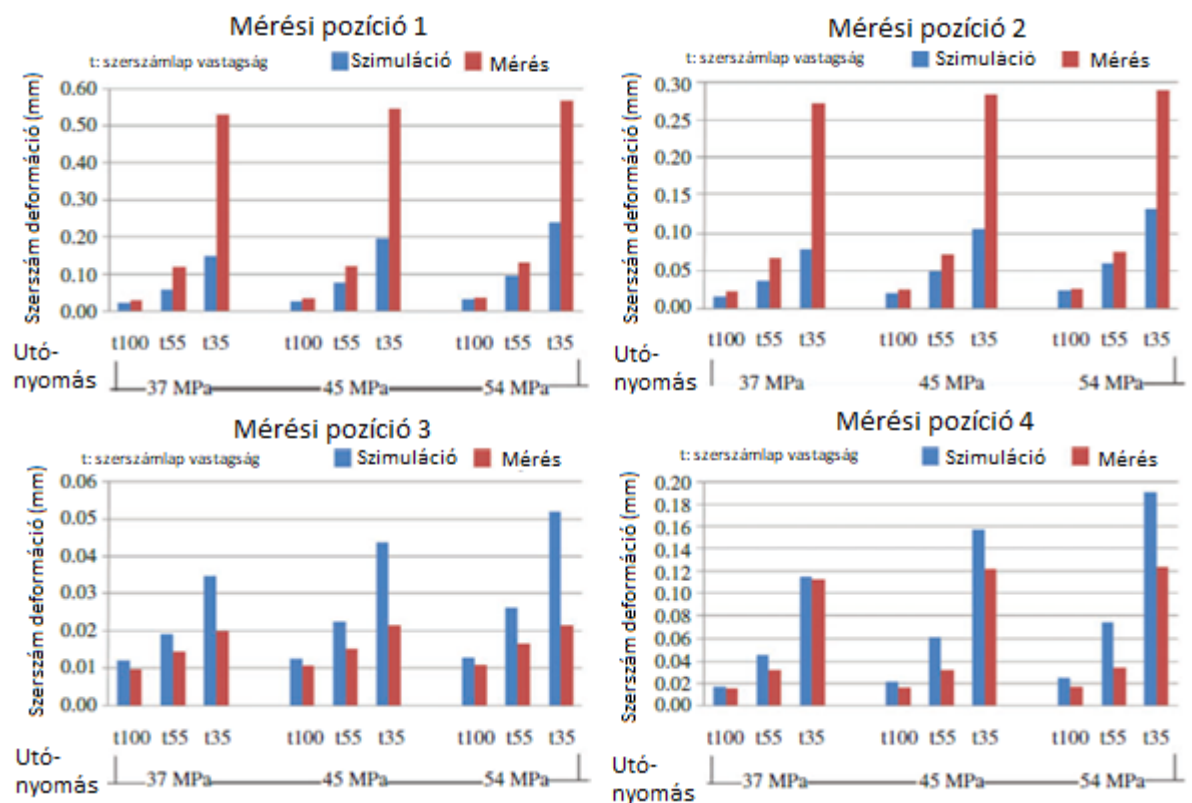
Amennyiben a szimulációs szoftver felhasználója zsugorodást és vetemedést kíván szimulálni, további tulajdonságokra van szükség, mint például:

- rugalmassági modulus,
- nyírási modulus,
- hőtágulási együttható [17].

#### 2.5.1. Szerszám és inzertdeformáció modellezési lehetőségei

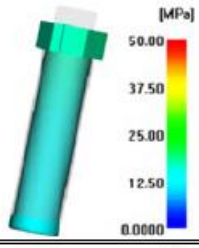
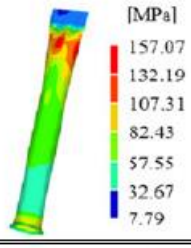
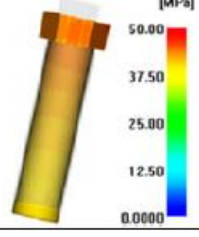
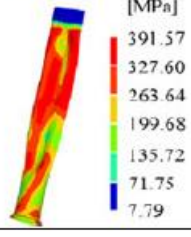
Vietri és társai [18] munkájukban egy olyan módszert mutattak be, amely figyelembe veszi a nyomásnak a viszkozitásra és az üreg deformációjára gyakorolt hatását a fröccsöntési szimulációs szoftver segítségével végzett nyomásprofilok előrejelzésére. Két amorf anyagot, egy polisztirolt (PS) és egy polikarbonátot (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 segítségével 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 körülmény 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 [18].

Huang és társai [19] egy hatékony megközelítést dolgoztak ki a valós idejű szerszámlap hajlítás mérésére, nevezetesen az formalap elmozdulásának mérésére, illetve szimulálták a folyamatot és összehasonlították a mért eredményekkel. A megjósolt üregnyomást ezután a későbbi szerszámhajlítási elemzés bemeneteként alkalmazták. A fröccsöntés során polimetil-metakrilátot (PMMA) használtak, amit egy 152 mm-es fényvezető lemezre (LGP) 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. A szimulált 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 [19].



15. ábra: Huang és társainak eredményei [19]

Park és társai [20] 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 a fröccsöntési elemző szoftver számította 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 a belső csövek alakváltozására. Az elemzés eredményét összehasonlították az inzertes fröccsöntési kísérlettel, a két módszer jó összhangban volt egymással így az elemzés megbízhatósága megerősítést nyert. A szimulációs eredményeiket a 16.ábra mutatja. Továbbá, a több üregből álló tápdugó szerszámban az elosztócsatorna átmérőjét optimalizálták, hogy megakadályozzák a belső csövek deformálódását az lineárisan elrendezett fészkekbe történő kiegyensúlyozatlan kitöltése miatt [20].

|                    | Darab                                                                             | Inzert                                                                              |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Befröccsöntés vége |  |  |
| Utónyomás          |  |  |

16. ábra: Park és társainak szimulációs eredményei[20]

### 3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

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

#### 3.1. Felhasznált alapanyagok

Ebben az alfejezetben összegyűjtöttük 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) használtuk. Ez egy alacsony molekulatömegű, jó folyóképességű PP, melynek az ajánlott feldolgozási hőmérséklete 190-235 °C.

| 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 <sup>2</sup> ] | 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, egészen pontosan FullCure 835-ből. Természetesen a gyártási technológiából adódóan egy támaszanyagra is szükség volt, ami jelen esetben a FullCure 705 volt.

| 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 <sub>g</sub> [°C]          | 52-54     |
| Shore keménység (D)          | 83-86     |
| Rockwell keménység           | 73-76     |
| Sűrűség [g/cm <sup>3</sup> ] | 1,17-1,18 |

**2. táblázat:** FullCure 835-ös fotopolimer anyagjellemzői

### 3.2. Alkalmazott feldolgozó berendezések

Ebben az alfejezetben összegyűjtöttük 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 végeztük (17.ábra). A gép 1000 kN záróerővel és 290 J fröccsmunkával rendelkezik és 470 mm az oszloptávolsága. Maximális adagsúlya 97 g.



**17. ábra** Arburg Allrounder 470 A 1000-290-es fröccsöntőgép [21]

A tanszéken rendelkezésre állt egy üvegbetétes fröccsöntő szerszám (18.ábra), aminek a segítségével megoldható volt, hogy a fröccsöntési ciklus során is meg tudjuk figyelni az inzerterek deformációját. Maga a szerszám egy pneumatikus kidobó rendszerrel van felszerelve, hűtőkör viszont nincs kialakítva benne.



18. ábra Üvegbetétes fröccsöntőszerszám

### 3.2.2. *Objet 30 Pro*

A szerszámbetét és az inzerterek Objet 30 Pro segítségével készültek (19.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 0,1 mm-es pontossággal dolgozik.



19. ábra Objet 30 pro [22]

### 3.2.3. TA Instruments DMA Q800 berendezés

Ahhoz, hogy megismerjük a szerszámbetét alapanyagának tulajdonságainak hőmérsékletfüggését egy dinamikus mechanikai analízisnek (DMA) is alávetettük. Ezt egy TA Instruments DMA Q800 berendezésen végeztük, amelynek a hőmérséklettartománya  $-145-600^{\circ}\text{C}$  között van, frekvenciatartománya  $0,01-200\text{ Hz}$  között van, illetve maximális terhelése  $18\text{ N}$ .



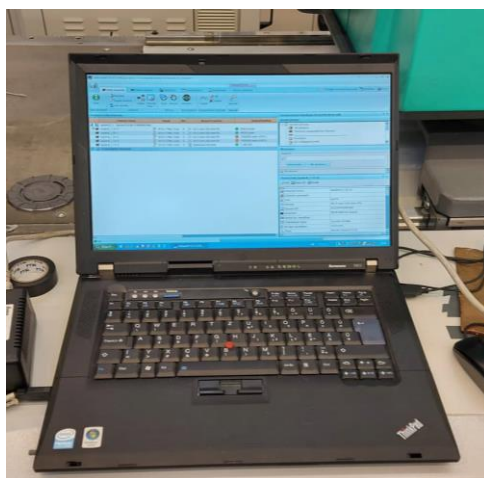
20. ábra: DMA berendezés [23]

## 3.3. Alkalmazott vizsgálati eszközök

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

### 3.3.1. Mérő számítógép

A méréseket egy, a tanszéken található ThinkPad típusú laptopon rögzítettük



21. ábra Mérésre használt tanszéki laptop

### 3.3.2. Adatfelvevő egység

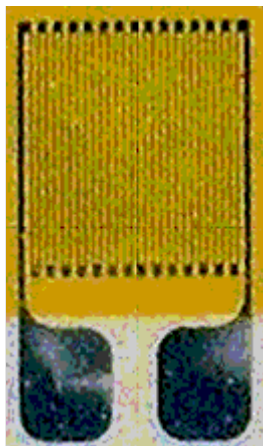
Az adatok felvételre és számítógépre való továbbítását egy Spider8 6000/DC típusú adatmérővel hajtottuk végre.



22. ábra Spiders 6000/DC típusú adatrögzítő egység

### 3.3.3. Nyúlásmérő bélyeg

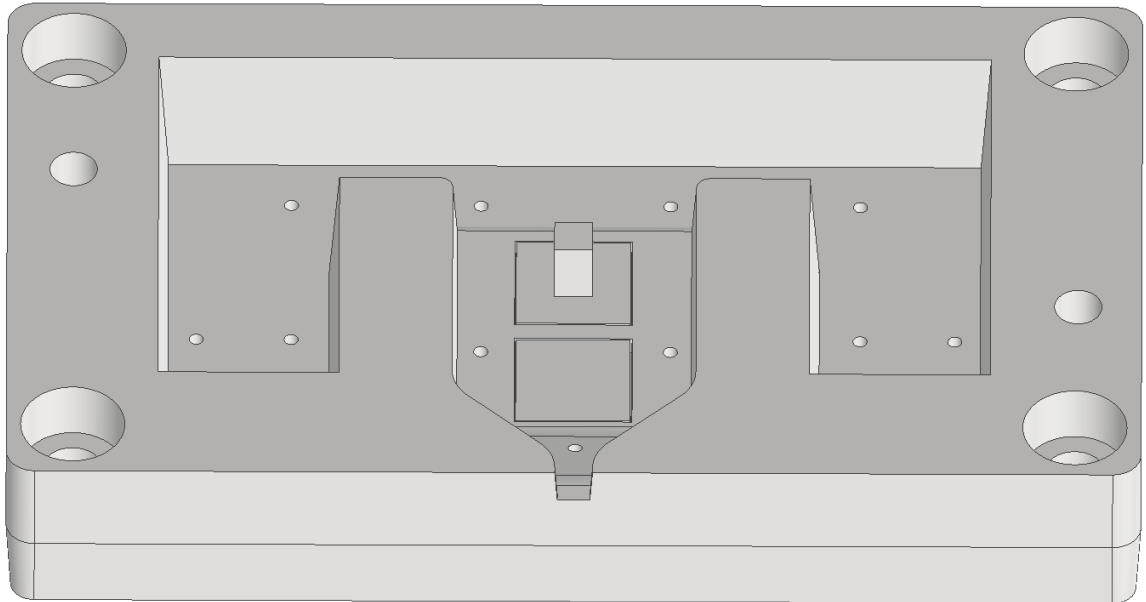
A méréseket két, KMT-LIAS-06-1,5-350-5E típusú 350  $\Omega$  ellenállású, 1,5\*2,5 mm nagyságú nyúlásmérő bélyeg segítségével hajtottuk végre.



23. ábra KMT-LIAS-06-1,5-350-5E típusú nyúlásmérő bélyeg [24]

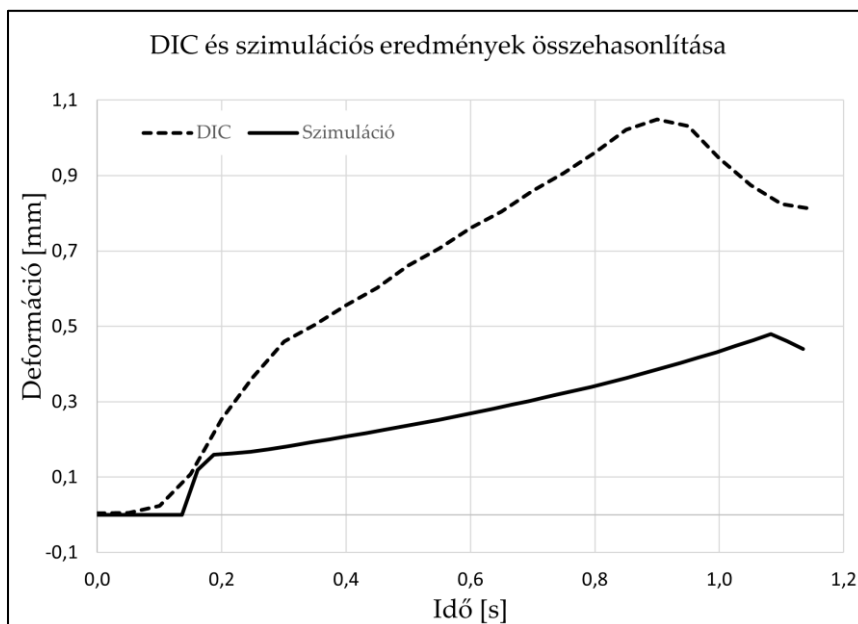
#### 4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

A korábbi munkánk során a polimerinzertek fröccsöntés közbeni deformációját mértük és szimuláltuk. A mérési konstrukciót a 24. ábra mutatja be.



**24. ábra** A korábbi mérésekhez használt szerszámbetét és inzer

A mérés lényege, hogy a beömlőcsatornán érkező anyag a felső ömledéktérben megüti a négyzetes hasáb inzeret, ami ennek hatására deformálódik. Ezt a deformációt mértük digitális képkorreláció segítségével (DIC, Digital Image Correlation), majd ugyanezt a folyamatot szimuláltuk Ansys 2021 r2-ben. Az alsó tartály rész a folyamat megnyújtása miatt került bele a konstrukcióba. A ciklus minden esetben 10 másodperces késleltetéssel, 1000 bar-os nyomáson történt, utónyomás nélkül 140 másodperces hűtési szakasszal. A befröccsöntési sebesség  $40 \text{ cm}^3/\text{s}$  volt. A két módszer eredményei között nagyságrendi eltérést tapasztaltunk. Ezt az eltérést mutatja be a 25. ábra.



25. ábra: Korábbi munkánk során mért és szimulált inzert deformáció

Jelen munkánk során ennek az eltérésnek az okát tárjuk fel. Ezt két lehetséges okra vezettük vissza, az egyik a nyomásviszonyok és ebből származó erők pontatlan számítása, a másik a szimuláció során használt anyagmodell pontatlansága. Ezért a célunk a nyomásviszony és erőhatások mérése, illetve az anyagmodell pontosítása.

## 4.1. Fizikai mérések

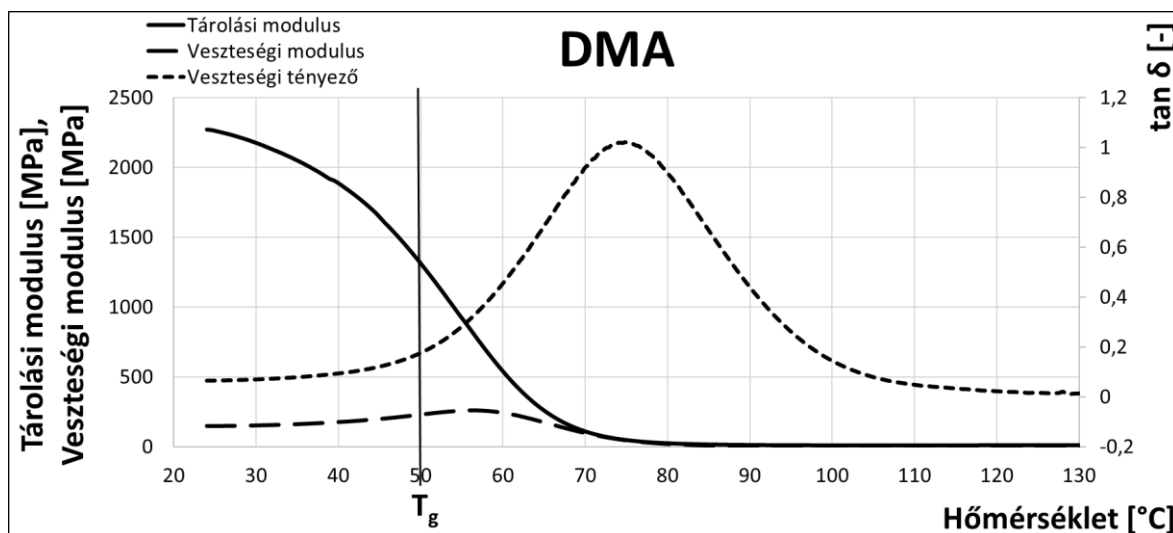
Ebben az fejezetben a fizikai méréseket részletezzük.

### 4.1.1. DMA mérés

Dinamikus mechanikai analízist végeztünk az inzert alapanyagán, ahhoz, hogy megismerjük a viselkedését nagyobb hőmérsékleten. A mérés során a következő paraméterek alkalmaztuk:

- Hőmérséklettartomány: 24- 130 [°C],
- Felfűtés sebessége: 5 [°C/perc],
- Mintára ható feszültség frekvenciája: 1 [Hz],
- Amplitúdó: 10 [μm],
- Mérőfej: dual cantilever,
- Próbatétel méretei: 35x10x4 [mm].

A mérési eredményt a 26. ábra mutatja.

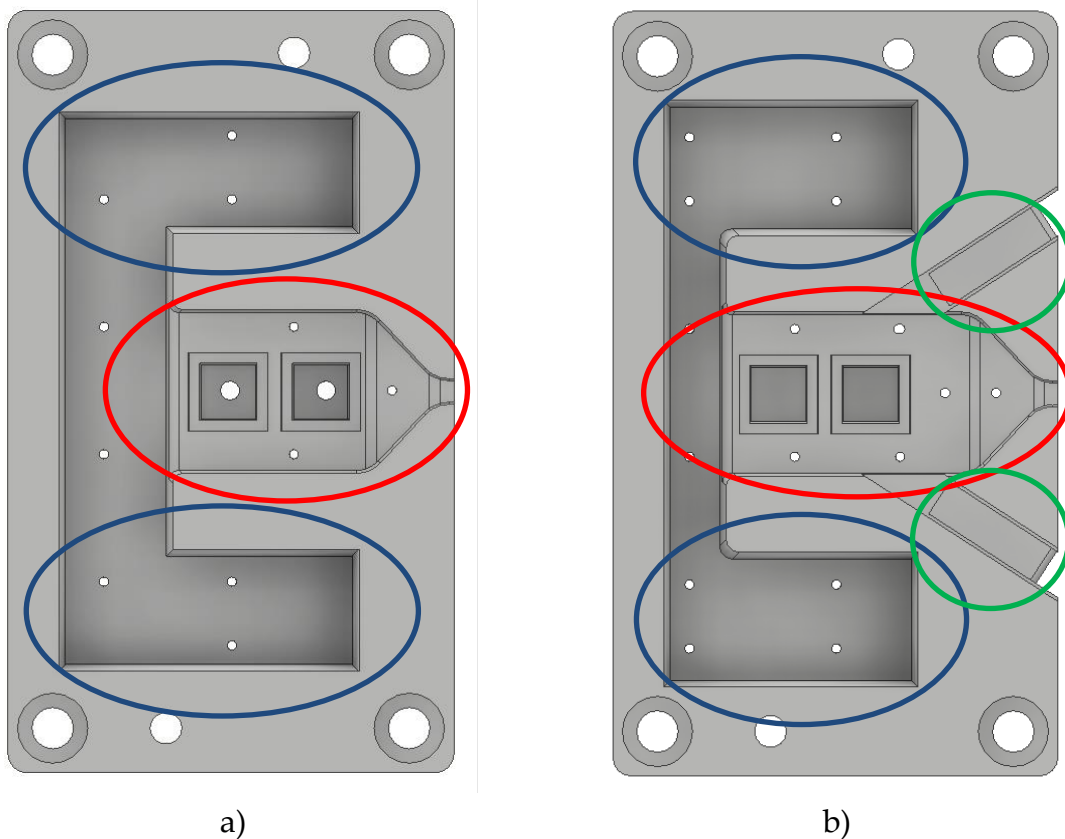


26. ábra: A DMA mérés eredményei

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

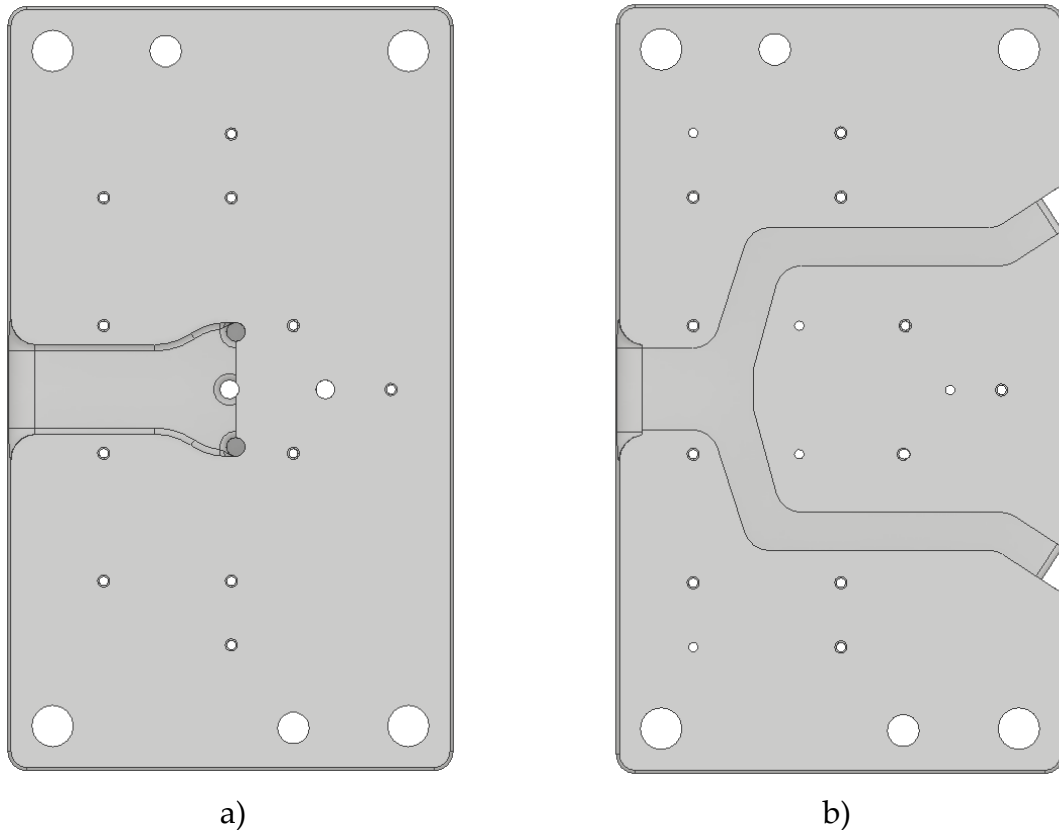
#### 4.1.2. Nyomásmérés a fröccsöntési ciklus közben

A korábbi mérések és szimulációk eredményei, ahogyan korábban említettük, több ponton eltértek. Ennek okát keresve, meg akartuk vizsgálni, hogy az áramlás által okozott erőhatást pontosan számolt-e a program vagy azt alábecsülte, ezzel kisebb deformációs értéket számolva. A korábbi mérésekhez használt betét kialakítást sajnos nem tette lehetővé, hogy nyúlásmérő bélyegek felszánálásával meg tudjuk mérni ezt az értéket, emiatt azt át kellett terveznünk, ahogy azt a 27. ábra szemlélteti.



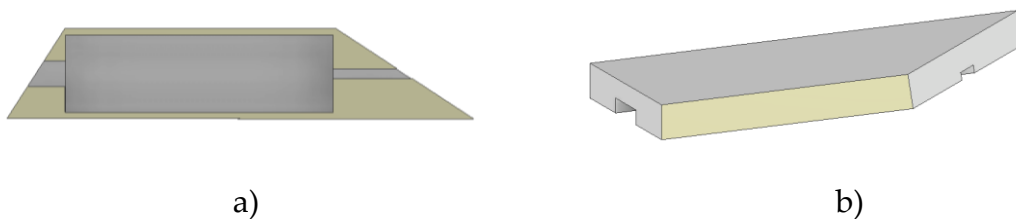
**27. ábra** A korábbi (a) és az átalakított (b) szerszámbetét felülnézete (vizsgálati terület-piros; tartály-kék; bélyeg helye-zöld)

A betét méretéből (120x90x20 mm) és a szerszám kialakításából adódóan, a fröccsöntés közbeni erők mérésére a nyúlásmérőbélyegek voltak a legalkalmasabbak kis méretük okán. Az inzertekre közvetlen rá nem tehattük a bélyegeket több okból is kifolyólag, egyrészt a bélyeg nyúlást mér, amit hőmérsékletváltozás is okozhat, másrészt igaz, hogy deformáció is okozhat nyúlást, azonban, az erő kiszámításához modulus értékre is szükség van, ami nem állandó az inzer keresztmetszetében a hőmérséklet eloszlás miatt, illetve költséges is lett volna, mivel minden egyes méréshez új bélyegre lett volna szükség. Ennek okán a bélyegeket a betét belsejében kellett elhelyezni és összekapcsolni az inzeretekkel. A kapcsolatot egy fémlemez és egy drót segítségével biztosítottuk. Az inzerre ható erő átadását a fémlemeznek a rézdrót biztosítja és a nyúlásmérő bélyegek a fémlemez megnyúlását mérik. A mérésekhez nem volt elegendő hely a nyúlásmérő bélyegnek abban az esetben (zöld kör), ha kis szögekkel akartunk dolgozni. Ennek következtében, a befröccsöntési térfogat megtartása mellett megnyújtottuk az vizsgálati területet (piros kör), szélesítettük, ugyanakkor rövidítettük a tartályként funkcionáló hátsó területet és a kilököket is átterveztük a fröccsöntő szerszám geometriájának megfelelően. Ezen kívül áttervezésre került a kábelcsatorna is, amelyet a 28.ábra szemléltet.



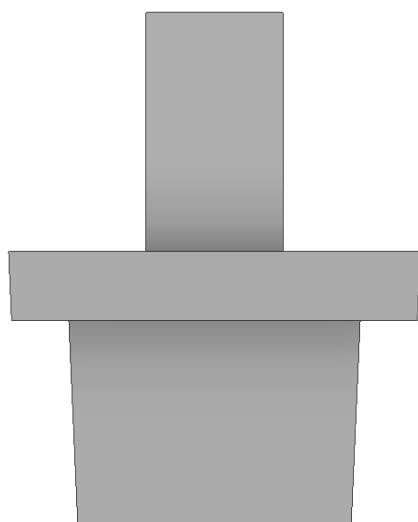
**28. ábra** A régi (a), illetve az áttervezett szerszámbetét kábelcsatornája

Természetesen a könnyebb eltávolíthatóság miatt mindkét betét oldalferdeséggel van ellátva. Annak érdekében, hogy a nyúlásmérő bélyeget és a fém lapot, amin rögzítjük, ne lepje el fröccsöntés közben az ömledék, föléjük egy takaróelemet terveztünk mindkét oldalra (29.ábra). Ezek alján kivágások találhatóak, hogy a mérést végrehajtó nyúlásmérő bélyegek, illetve az ahhoz használt fém lapok elférjenek, valamint, hogy a réz drótokat és a kábeleket el tudjuk vezetni.

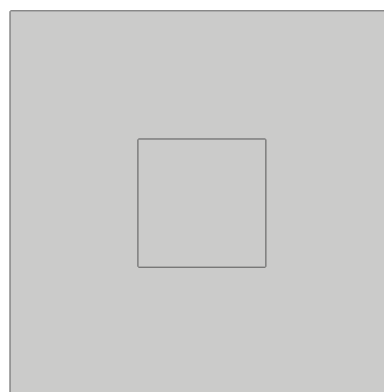


**29. ábra** A takaró elem alja (a), illetve teteje (b)

Annak érdekében, hogy pontos értékeket kapjunk az inzertek felületét ért erőhatásokról, nem szabad, hogy az tapadjon a blokk vagy a szerszám felületéhez. Ennek érdekében a korábban használt inzert geometriákat is újra kellett tervezni és kompatibilissé tenni a mostani méréshez. A korábbi geometria esetében mivel csak deformációt mértünk a kiálló rész csatlakozott a talapzathoz (30.ábra).



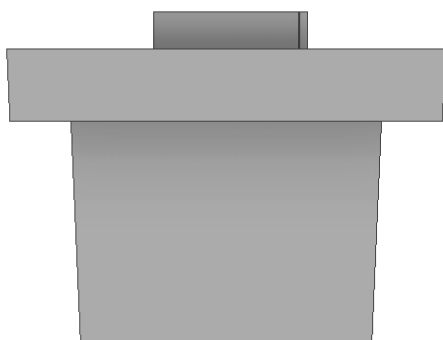
a)



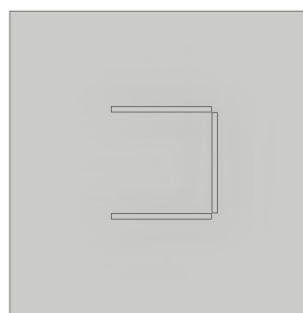
b)

**30. ábra** Korábbi inzertkialakítás oldal (a) és felülnézete (b)

A mostani kialakítás esetében (31.ábra) azonban a talapzatból csak három vékony és apró tartó elem áll ki, amelyek a korábbi tapasztalatok alapján a terhelés első pillanatában le fognak szakadni, így kényszermentesítve a vizsgálati részt. A korábbi vizsgálatokhoz igazodva ebben az esetben 4 mm oldalhosszúságú négyzetes hasábokkal dolgozunk, melyeknek magassága minden esetben 7 mm volt.



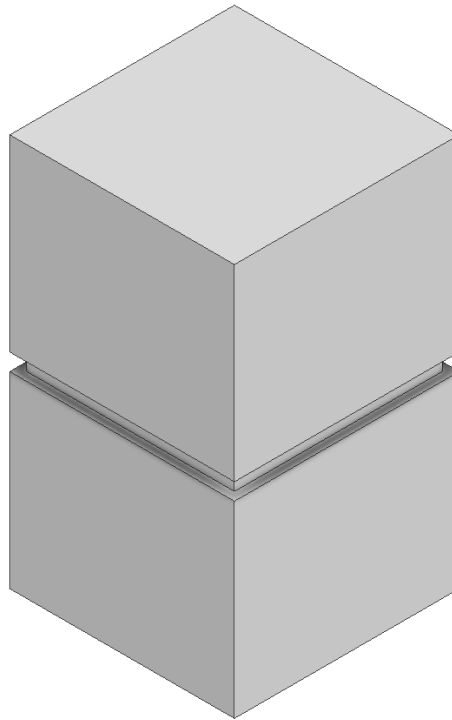
a)



b)

**31. ábra** Az új kialakítású inzert talapzat oldal (a), illetve felülnézete (b)

A 31/b).ábrán látható zsebbe lehet beilleszteni az inzerteket (32.ábra), amelyeket rézdróttal kötünk össze a nyúlásmérő által figyelt fémlappal.

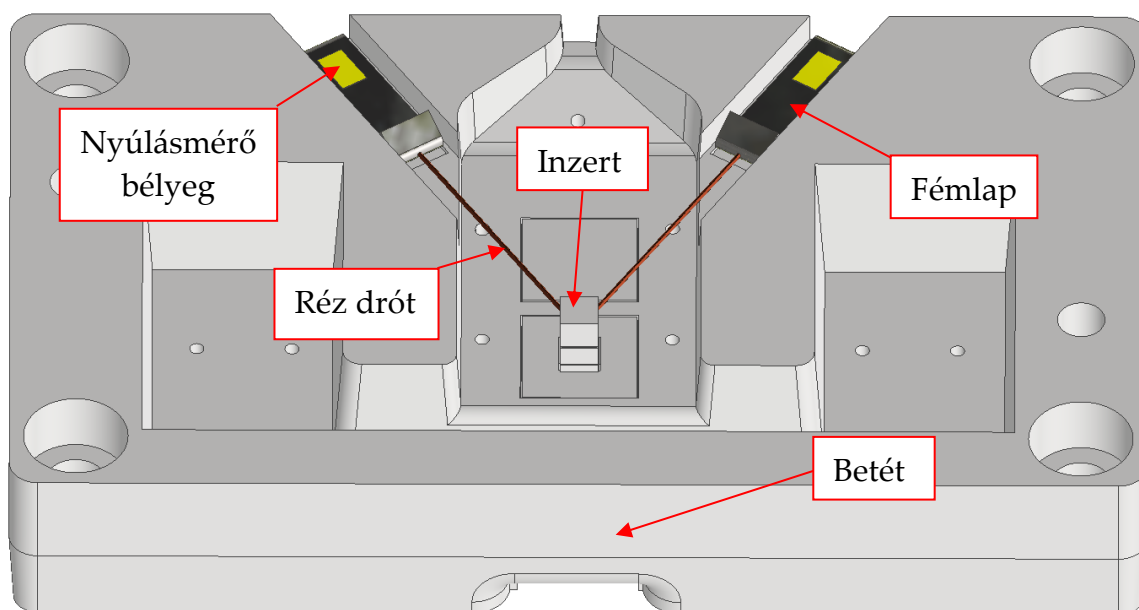


**32. ábra** Négyzet alapú inzerkialakítás

#### *4.1.3. Mérés felépítés*

Az átalakított inzertek és a szerszámbetét PolyJet technológiával való legyártása után a mérések végrehajtása következett.

A nyúlásmérő bélyegek az utólag kialakított ütegben található fémlemezeken helyezkedtek el. A fémlemezeket a betét hátuljánál rögzítettük, amelyek így a vizsgálati síkban szabadon tudtak mozogni, ezzel lehetővé téve a mérést. A lemezt másik, ömledék térhez közelebbi részénél visszahajtottuk, hogy abba bele lehessen akasztani a réz drótot, amivel végül a lapot és a vizsgált inzeret összekötöttük. Az egészre ráhelyeztük a korábban bemutatott fedőelemet, amivel egyrészt merevítettük a betétet, másrészt megakadályoztuk, hogy az ömledék befolyjon a nyúlásmérőkhöz, amivel tönkre tehetné volna a mérési eredményeket. A teljes konstrukció felépítését mutatja be a 33. ábra.

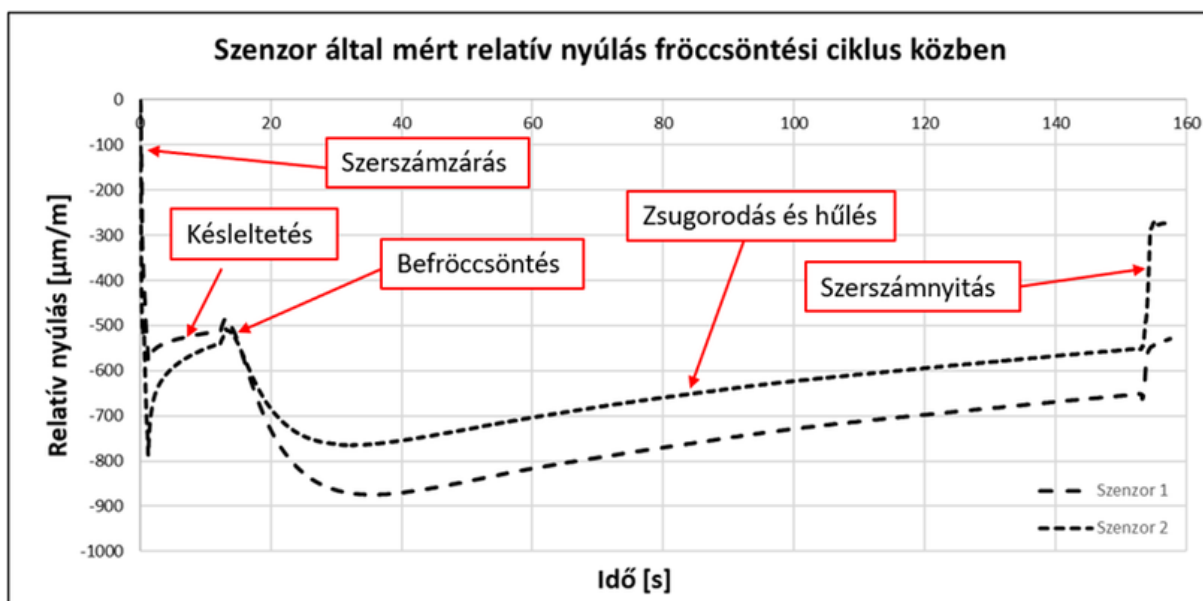


33. ábra Fizikai mérés elvi modellje (fedőelem nélkül)

A mérések során több problémába ütköztünk. Sajnos a fotopolimerek alacsony hővel szembeni ellenálló képessége miatt a fedők néhány alkalom után deformálódtak és nem tudták ellátni azt a feladatukat, hogy megvédjék a kábeleket a és a fémlapot az ömledéktől. Ezen felül a drótot is több alkalommal elszakította az anyagáram, ami miatt a későbbi mérések során egy több szálból álló sodort réz drótra váltottunk, amivel már megfelelő méréseket tudtunk végezni, azonban mivel ezeknek a hajlíthatósága kisebb volt, így a 2 mm-es mintákat nem tudtuk megfelelően rögzíteni, aminek köszönhetően ezeket a méréseket egy újragondolt konstrukcióval később el kell végezni.

#### 4.1.4. Mérési eredmények kiértékelése

A mérésekből kapott adatokat átlagoltuk majd diagrammban ábrázoltuk a relatív nyúlást az idő függvényében (34.ábra).



34. ábra: A nyúlásmérő szenzorok által mért relatív nyúlás lefolyása a fröccsöntési ciklus alatt az idő függvényében

A mérések során minden esetben egy nagy mértékű kilengés volt megfigyelhető a ciklus elején, amikor a szerszámzárás során a korábban bemutatott fedőelemet a szerszám rányomta a betétre. Ezek után egy 10 másodperces késleltetés van beállítva, ami alatt ez enyhül, majd befröccsöntés során egy ehhez képest kisebb, de kimutatható kilengés történik. Ezek után az ömledék zsugorodása és hűlése ismét nagy mértékű erőhatásnak teszi ki a fém lapot, ami a lehűlés közben folyamatosan csökken. Végül a szerszámnyitáskor ismét egy nagyobb mértékű kilengés tapasztalható.

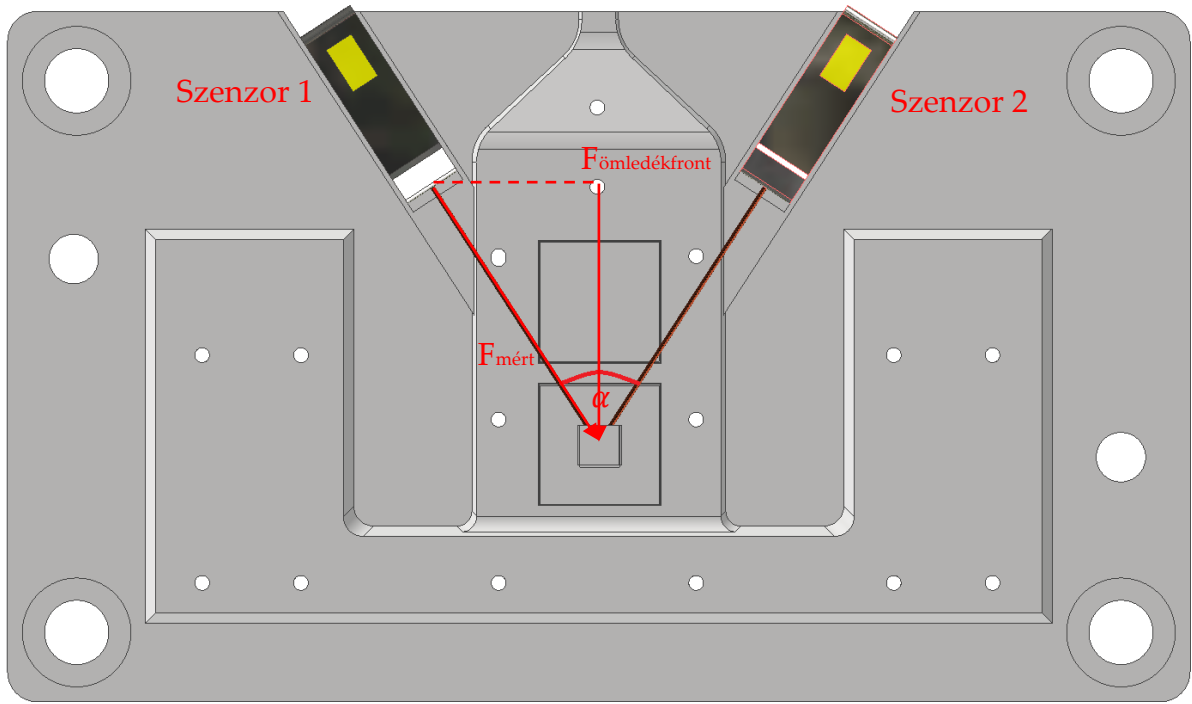
Ezek közül az erőhatások közül a befröccsöntés folyamata az, ami a korábbi mérések és szimulációk ellenőrzése szempontjából hasznos számunkra, így ezt a görbeszakaszt vizsgáltuk elsődlegesen. Az eredményekből megállapítottuk, hogy a mérések konzisztensek és nagyjából egységes eredményeket adtak. Ebből arra tudunk következtetni, hogy a mérések hasonló körülmények és erőhatások mellett játszódtak le.

A kapott relatívnyúlásokkal és a fémlap rugalmassági modulusával ki tudtuk számítani a feszültség értékeket a Hooke-törvény segítségével az alábbi módon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (10)$$

ahol  $\sigma$  a feszültség MPa-ban,  $E$  a fémlap rugalmassági modulusa szintén MPa-ban,  $\varepsilon$  pedig a korábban átszámolt relatív nyúlás m/m mértékegységben. Ezek után ezzel a kapott feszültség értékkel és a fémlap keresztmetszetének méretével kiszámítható a fémlapra kifejtett erő a (3) egyenlet átrendezéséből.

Az ömledékfront által kifejtett erő meghatározását ezek után egy egyszerű szögfüggvénnyel meg lehet határozni, mivel a mérés konstrukciójából megállapítható az, ahogy azt a 35. ábra is mutatja.



35. ábra Erőkomponensek a mérés során

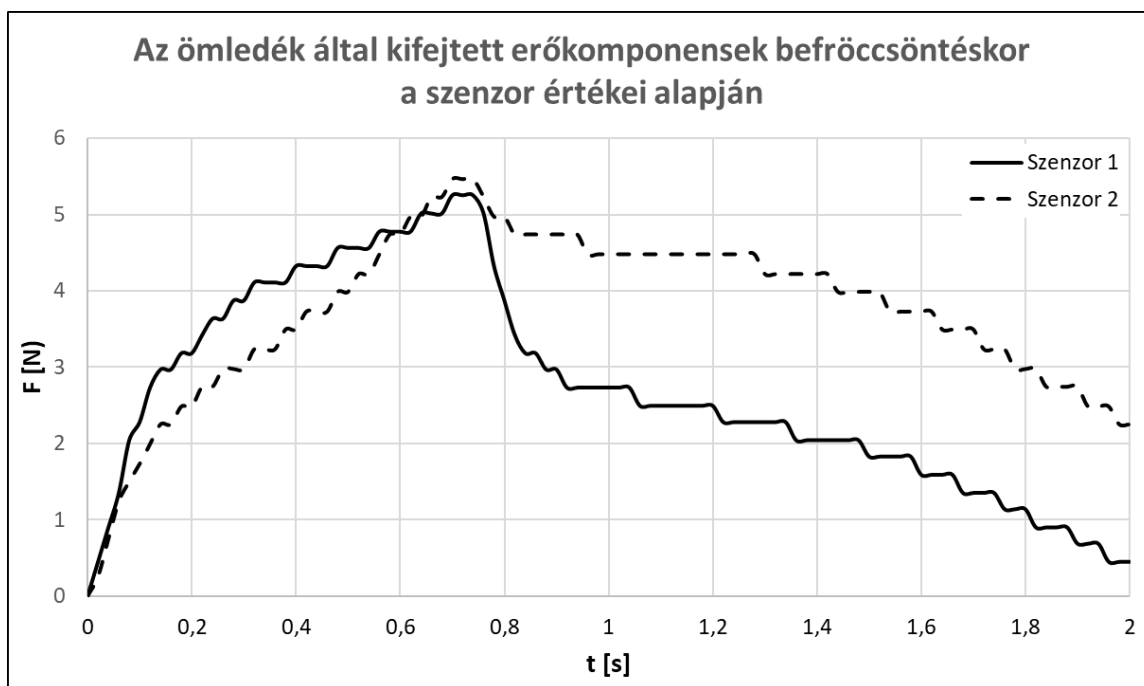
Ezek alapján az inzertre ható ömlédéfront által kifejtett erő:

$$F_{\text{szenzor}} = F_{\text{mért}} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = F_{\text{mért}} \cdot \cos\left(\frac{66}{2}\right), \quad (11)$$

ahol  $F_{\text{szenzor}}$  a szenzor mérése alapján az ömlédéfront által az inzertre kifejtett erő N-ban,  $F_{\text{mért}}$  a fémlapra ható erő mértéke szintén N-ban,  $\alpha$  pedig a konstrukcióból adódó szög, a kettes szorzó pedig a két szenzorból adódik. Az ömlédéfront által kifejtett erőt pedig a két szenzor által érték összege adja meg:

$$F_{\text{ömlédéfront}} = F_{\text{szenzor1}} + F_{\text{szenzor2}}, \quad (12)$$

ahol  $F_{\text{szenzor1}}$  és  $F_{\text{szenzor2}}$  a nyúlásmérő értékeiből számolt erőhatások,  $F_{\text{ömlédéfront}}$  pedig a teljes erőhatás N-ban. Az így számított eredményeket ezek után diagrammokban ábrázoltuk és az alábbi eredményt kaptuk (36.ábra):



36. ábra Az ömledék által kifejtett erőkomponensek a szenzor értékei alapján

A két szenzor értékei közti eltérésben több faktor is közrejátszhatott. Egyrészt a bélyegek ragasztása amennyiben nem volt tökéletesen párhuzamos a fémlappal, úgy az erőértékek már kis mértékű szögben állás esetén is eltérhettek, másrészt a réz drót merevsége miatt az inzert közepre pozicionálása is nehezen volt megoldható. Mindezeket figyelembe véve azonban elmondható, hogy a görbe lefutásának a jellege megegyezik, ami miatt feltételezhető, hogy a mérés jellegre helyes. A két komponenset összesítve megállapítható, hogy a mérések alapján a befröccsöntéskor az inzertre kifejtett erő körülbelül 11 N.

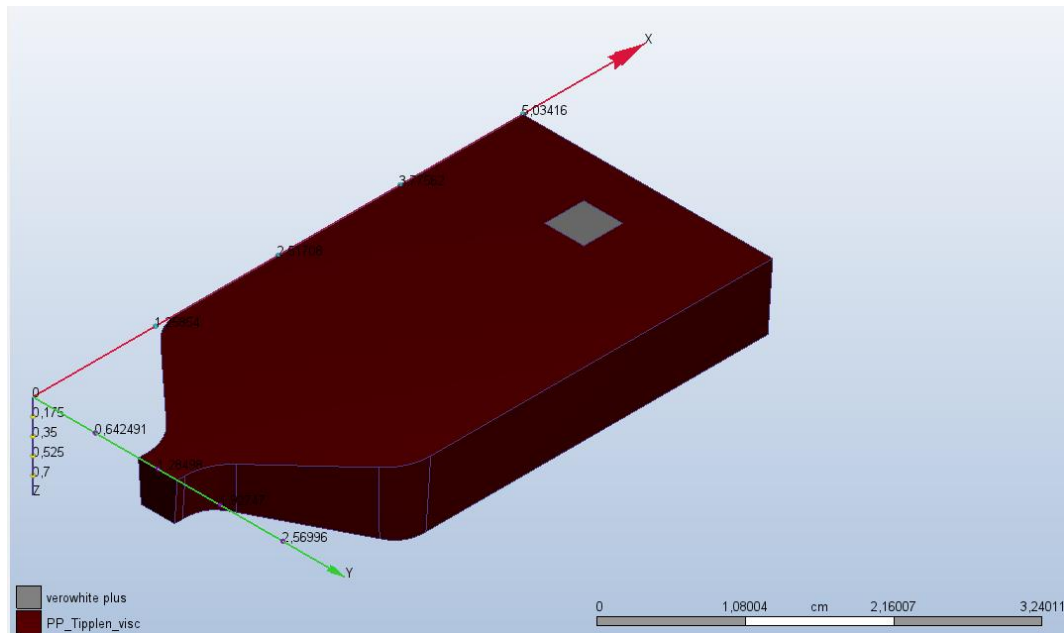
Ez az erő összhangban van a szimulációban kapott értékekkel, pár százalékos eltérések vannak csupán például a CFD-s számításokhoz képest. Mindezekkel együtt elmondható, hogy a mért és a számított erőértékek között nincs nagyságrendi eltérés, ami alapján kijelenthető, hogy a két deformációs érték közötti nagyságrendi eltérést nem ez okozta elsősorban.

## 4.2. Numerikus számítások eredményei

A numerikus számítások elvégzésére több szoftvert is fel akartunk használni, hogy több oldalról is megerősített eredményeket kapjunk. Modelleztük a fröccsöntési folyamatot Autodesk CFD 2023-ban és Autodesk MoldFlow Insight 2021-ben is, hogy három különböző eredményt is kapjunk és ezeket össze tudjuk hasonlítani.

#### 4.2.1. Autodesk CFD 2023-as eredmények

Az első numerikus számításokat az Autodesk CFD 2023-ban végeztük el. Első lépésként Autodesk Inventor segítségével modelleztük az ömledékteret, illetve az áramlási térben lévő inzertert, hogy az alapul szolgáljon ezeknek a számításoknak. Ezt a modellt STEP fájlként exportáltuk majd importáltuk a CFD szoftverbe (37.ábra). A szimulációk során egyszerűsített áramlási teret használtunk. A betét tartály részét a számítások egyszerűsítése és gyorsítása miatt levágtuk.



37. ábra: Egyszerűsített ömledéktér az Autodesk CFD 2023-ban

A szoftver lehetőséget ad arra, hogy megadjunk az anyagtulajdonságokat, mint a sűrűség, hővezető képesség, fajhő, viszkozitás, amelyek közül az utolsó kettőt a hőmérséklet függvényében tudtunk figyelembe venni. A polimer ömledéket fluid-ként, az inzertert solid-ként definiáltuk. Az ömledéktér alapanyagtulajdonságai az alábbiak voltak:

- Az ömledék sűrűsége:  $1 \text{ g/cm}^3$ ,
- A hőátadási tényező:  $0,00145 \frac{\text{W}}{\text{cm} \cdot \text{K}}$ ,
- Kompressziós modulusa  $200\,000 \text{ psi}$ ,
- Hőmérsékletfüggő a fajhő, amelyet a Moldex3D adatbázisából importáltunk,
- Az inzerthőátadási tényezője  $0,25 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ .

Az inzerthőátadási tényezője pedig:

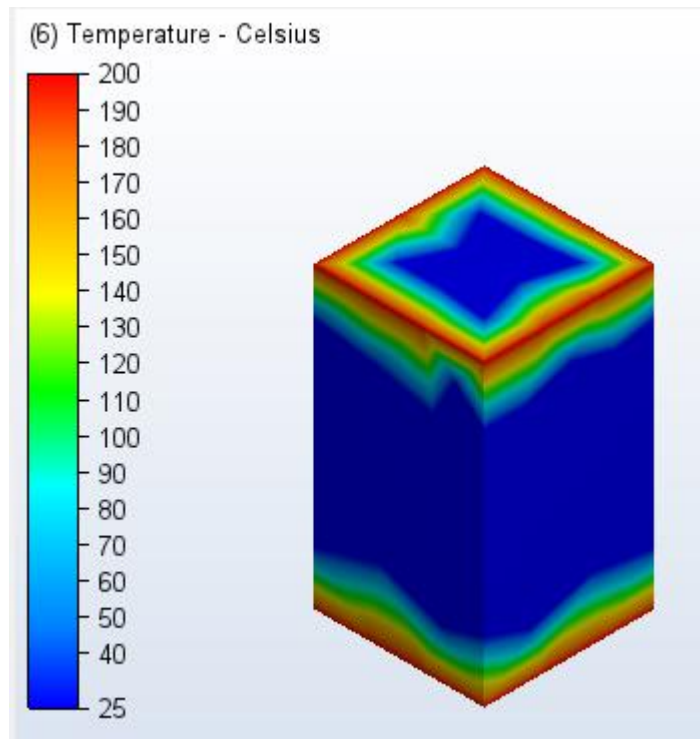
- Az inzerthőátadási tényezője  $1 \text{ g/cm}^3$ ,
- A fajhője:  $1422 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$

- A hőátadási tényező:  $0,25 \frac{W}{cm \cdot K}$

Ezek után minden egyes felületre, térfogatra meghatároztuk a szükséges peremfeltételeket:

- áramlási tér kezdete: térfogatáram  $40 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,
- áramlási tér vége: nyomás 0,
- palástfelület: gyorsulás minden irányban 0,
- inzert felülete: gyorsulás 0,
- áramlási térben: hőmérséklet  $200^\circ\text{C}$ ,
- inzert teljes térfogatában:  $25^\circ\text{C}$ .

A következő lépés a modell hálózása volt. Ezt automatikus hálózással végeztük el. A felületi finomítás: kikapcsolva, a hézag finomítás: kikapcsolva, hosszskála: 0,012. Ezek után tudtuk a számításokat elvégezni, amely során az áramlást lamináris, stacioner áramlásként modelleztük. Az inzert hőmérsékleteloszlását a 38.ábra mutatja.



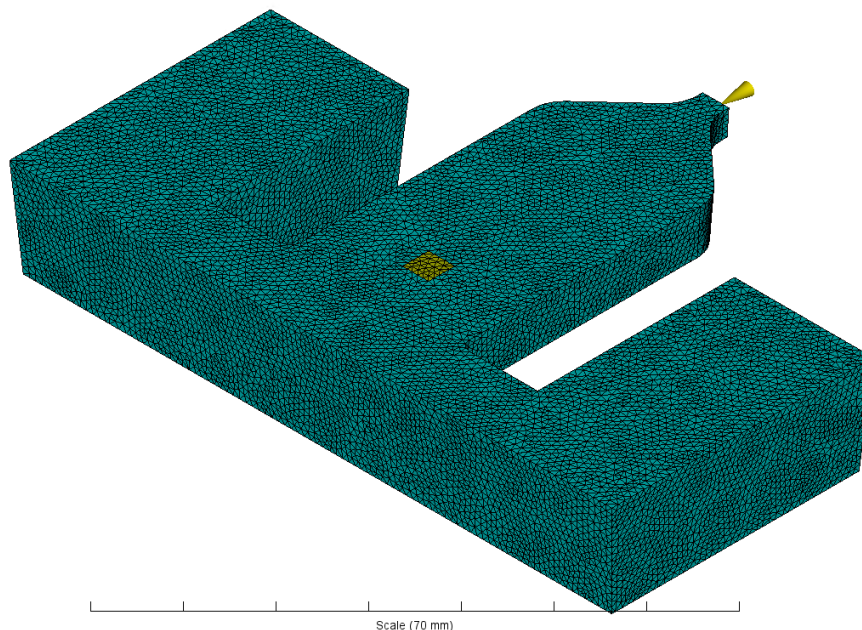
38. ábra: Az inzert hőmérséklet eloszlása Autodesk CFD 2023-ban

A szoftver számításai azt az eredményt adták, hogy az inzertre ható erők maximális értéke a fröccsöntési ciklus során, amennyiben szobahőmérsékletű inzertet feltételezünk a számítások során, körülbelül 13 N. Azért szobahőmérsékletű inzertet használtunk, mivel korábbi méréseink alapján az inzert nem melegszik fel a befroccsöntés rövid ideje alatt, mivel a polimerek rossz hővezetők, a felmelegedés már a hűtési szakaszban történik. Ezzel a programmal kapott erő értéke összhangban van a mért erőértékekkel, tehát feltételezhető, hogy a valósághoz közeli eredményeket számított a program.

#### 4.2.2. Autodesk MoldFlow numerikus számításai

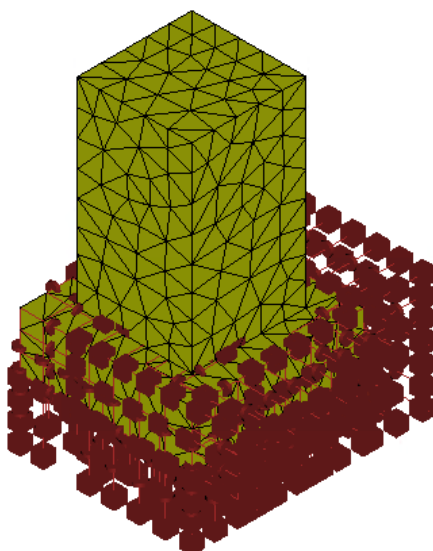
A CFD eredmények után az Autodesk Moldflow Insight 2021-ben segítségével modelleztük a folyamatot. A program lehetőséget ad egy úgynevezett core shift analysisra, amely során inzerterek deformációját is tudjuk számolni, valamint bennük ébredő feszültségeket is meg tudjuk határozni.

Ennek első lépése során az egész ömledékteret importáltuk az inzerettel együtt, majd hálóztuk, ezúttal tetragonális 3D-s elemekkel. A hálózás során 0,99 mm-es elemeket használtunk. Az inzert és az ömledékteret külön részként kezeltük és a hálózás során figyeltünk arra, hogy a két rész találkozásánál az elemek pontosan találkozzanak egymással. Így 700 ezer darab elemet kaptunk. A hálózás eredményét a 39. ábra mutatja.



**39. ábra:** A modelltér a hálózás után

Ezek után kényszerítettük a modellt, az inzert alsó, nagyobb oldalhosszúsággal rendelkező része nem ér bele az ömledékterbe, itt alkalmaztunk megfogást. A 40. ábra ezt a megfogott részt ábrázolja.

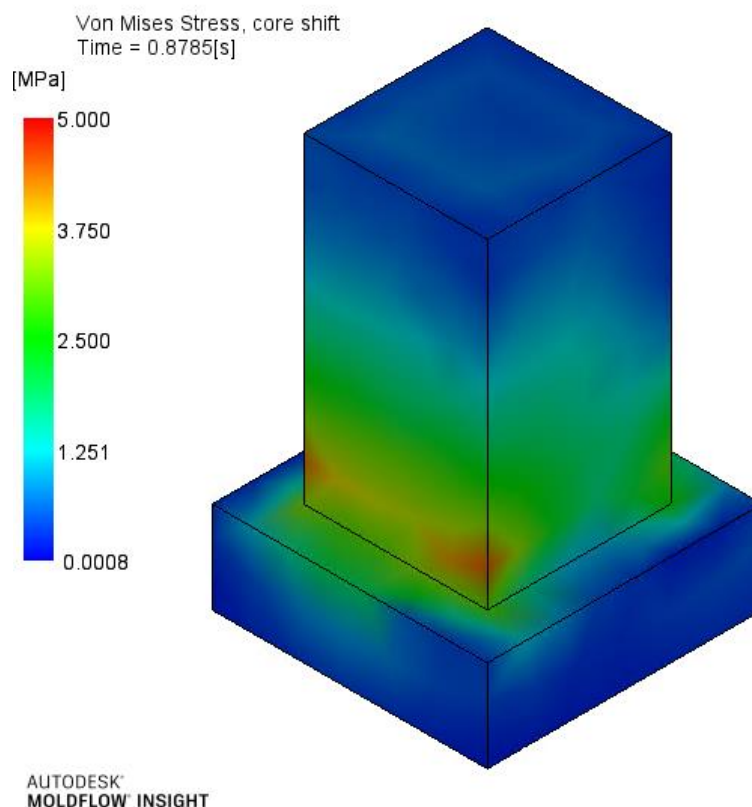


**40. ábra:** Az inzertr kényszerezése Autodesk Moldflow Insight programban

Utolsó lépésként megadtuk az anyagtulajdonságokat, a fröccsöntési paramétereket és lefuttattuk az analízist. Az alapanyagtulajdonságokat mind a fröccsöntésre használt polimerre, mind az inzertra megadtuk. A fröccsöntésre használt polimer esetében a programban adatbázisában található Shell PM 6100 típusú PP-t választottuk, aminek a tulajdonságai közel állnak az általunk használt polimer tulajdonságaihoz. Az inzertr alapanyagának tulajdonságait viszont mi vittük be a programba, úgy, mint a sűrűség ( $1,17 \text{ g/cm}^3$ ), fajhő ( $1467 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ), rugalmassági modulus ( $2500 \text{ MPa}$ ), Poisson-tényező ( $0,37$ ). Az alkalmazott analízis Fill analízis volt mivel utónyomást nem használtunk és így a számítási idő is kevesebb volt. A fröccsöntési paraméterek pedig a következők voltak:

- szerszámhőmérséklet:  $25^\circ\text{C}$ ,
- ömledékhőmérséklet:  $200^\circ\text{C}$ ,
- fröccssebeség:  $40 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,
- átkapcsolási pont 99%-os kitöltöttségnél történik meg,
- alkalmazott utónyomás értéke 0,
- Core shift analízis a befröccsöntési szakaszban is aktív,
- Core shift analízis 5%-os kitöltöttségi lépésenként történik meg

A Core shift analízis von Mises feszültség eloszlás eredményét szemlélteti a 41.ábra.



**41. ábra:** Von Mises feszültség eloszlás Autodesk Moldflow Insight 2021-ben

A kapott maximális feszültség és a Navier képlet felhasználásával [13] átszámítottuk a maximális feszültséget erőre az alábbi módon:

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

ahol  $\sigma_{\max}$  a leolvasott maximális feszültség *MPa*-ban,  $M_h$  a hajító nyomaték *MPa*-ban,  $K_z$  pedig a keresztmetszeti tényező *mm*-ben,  $F$  a keresett erő *N*-ban,  $a$  keresztmetszet rövidebb oldalának  $a$  hossza *mm*-ben,  $b$  pedig a hosszanti oldal hossza *mm*-ben. Ebből átszámolva a program által számított maximális erő hozzávetőlegesen 13,4 N. Ez az eredmény hasonló mind a CFD-ben számított, mind a mértékhez, így ebben az esetben is kijelenthető, hogy a program hasonló értékeket számolt, mint amit a valóságban mértünk.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Egy korábbi numerikus modellezési vizsgáltban modelleztük egy polimer inzert deformációját a fröccsöntési ciklus közben, azonban több különböző szoftver és modell alapján is nagyságrendi különbséget fedeztünk fel a mért és a numerikus számítás eredményei között. Ennek a problémának a feltárását végeztük el.

Az eltérés indokának feltárása érdekében meg akartuk vizsgálni, hogy a nyomásviszonyokat és az ebből adódó erőhatásokat pontosan modellezi-e a program, mert amennyiben ez így történik, úgy az anyagmodell hőmérsékletfüggése okozhatja az eltérést. Az elméletünk bizonyítására egy módosított betétkonstrukciót terveztünk, amibe nyúlásmérő bélyegeket helyeztünk el. Ilyen módon mérni és számolni tudtuk a befröccsöntés során az ömledék által az inzertekre ható erőt. Ezek után az eredményeket kiértékeltek és összehasonlítottuk Autodesk CFD és Autodesk MoldFlow által végzett numerikus számításokkal és arra az eredményre jutottunk, hogy a kapott értékek korrelálnak egymással, így a felvetett probléma nem a nyomásviszonyokban és az erőhatásokban keresendő elsősorban.

A jövőben a jelenség további tanulmányozása érdekében további méréseket szeretnénk végezni más geometriájú inzertek esetén is, hogy megvizsgáljuk, mennyire és milyen módon befolyásolja az inzertgeometria a mérési eredményeket és a mérés módszer megbízhatóságát. A mérések egységességét is fejleszteni kell, mivel a réz drótos felfogatásból adódóan a pozicionálás nem volt teljes mértékben egységes, valamint kalibrációt is kell majd végeznünk. Ezen felül szeretnénk meghatározni egy, a hőmérsékletfüggés figyelembe vevő anyagmodellt a felhasznált fotopolimerhez, hogy pontosan tudjuk modellezni a vizsgált folyamatokat.

## 6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Plastics – the Facts 2022. (2022).
- [2] Magyarország műanyagipara 2018- ban Available online: <http://polimerek.hu/2019/08/09/magyarorszag-muanyagipara-2018-ban/>.
- [3] Czvikovszky, T.; Nagy, P.; Gaál, J.: A polimertechnika alapjai. , 1–453 (2000).
- [4] Dunai, A.; Macskási, L.: A műanyagok fröccsöntése. (2003).
- [5] Fröccsöntés laborsegédlet. (2019).
- [6] Kovács, J. G.: Fröccsöntött termékek tervezése és szimulációja, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- [7] Ficher, J.: *Handbook of molded part shrinkage and warpage*; Plastics Design Library;
- [8] Kazmer, D. O.: *Injection Mold Design Engineering*;
- [9] Kovács, N. K.: Protípus Fröccsöntő Szerszámozás Technológiájának fejlesztése, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- [10] Sagi, O.: PolyJet Matrix™ Technology A New Direction in 3D Printing. , 1–5 (2009).
- [11] Keszy, A.; Kotlinsky, J.: Mechanical properties of parts produced by using polymer jetting technology. Archives of civil and mechanical engineering, **X**, 37–50 (2010).
- [12] Colton, J. S.; Crawford, J.; Pham, G.; Rodet, V.: Failure of rapid prototype molds during injection molding. CIRP Annals, **50**, 129–132 (2001).
- [13] Béda, G.: *Szilárdságtan*; Műegyetemi kiadó: Budapest;
- [14] Lajos, T.: *Az áramlástan alapjai*; Budapest; Vol. 3;.
- [15] Rahmati, S.; Dickens, P.: Rapid tooling analysis of Stereolithography injection mould tooling. Machine tools and Manufacture, (2006).
- [16] Heinle, M.; Drummer, D.: Measuring mechanical stresses on inserts during injection molding. Advances in Mechanical Engineering, **7**, 1–6 (2015).
- [17] Kennedy, P.; Zheng, R.: *Flow analysis of injection molds: Second edition*;
- [18] Vietri, U.; Sorrentino, A.; Speranza, V.; Pantani, R.: Improving the predictions of injection molding simulation software. Polymer Engineering and Science, , 2542–2551 (2011).
- [19] 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).
- [20] 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).
- [21] <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=181&l=m> Available online: <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=181&l=m>.

- [22] <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=193&l=m> Available online:  
<http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=193&l=m>.
- [23] <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=77&l=m> Available online:  
<http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=77&l=m>.
- [24] <http://www.kaliberkft.hu/documents/9EE4FDDD3F6D411BAD7984342F7984C7B5C65FC1.html> Available online:  
<http://www.kaliberkft.hu/documents/9EE4FDDD3F6D411BAD7984342F7984C7B5C65FC1.html>.