



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

ENZSÖL ÁKOS  
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA DOLGOZAT  
POLIMER INZERTEK DEFORMÁCIÓS VISELKEDÉSÉNEK  
VIZSGÁLATA ÉS MODELLEZÉSE

Témavezető:

*Dr. Szabó Ferenc*

adjunktus

Konzulens:

*Dr. Zink Béla*

adjunktus

BUDAPEST, 2023

## 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 Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2023.11.04

*témavezető*

### *Nyilatkozat az önálló munkáról*

Alulírott, *Enzsöl Ákos (L860CE)* a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a Tudományos Diákköri Konferencia dolgozatot 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, 2023.11.04

*szigorló hallgató*

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dr. Szabó Ferenc részére, aki támogatta és segítette a dolgozat során végzett munkámat, illetve köszönöm Bartók Dávidnak a fröccsöntőgép használatához nyújtott segítséget.

# TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás .....	iii
Jelölések jegyzéke .....	v
1. Bevezetés.....	2
2. Szakirodalmi áttekintés .....	3
2.1. Polimerek fröccsöntése .....	3
2.2. Numerikus szimulációk.....	10
2.2.1. <i>FDM</i> tesztek szimulációja.....	10
2.3. Fröccsöntő szerszámok .....	5
2.3.1. <i>Szerkezeti felépítés</i> .....	5
2.3.2. <i>Fröccsszerszámok tervezése, mechanikai igénybevételek</i> .....	7
2.4. Inzertek alkalmazása.....	13
2.4.1. <i>Polimer inzertek</i> .....	13
2.4.2. <i>RPT (Rapid Prototyping Technology) alkalmazása</i> .....	13
2.5. Fröccsöntés numerikus modellezése.....	15
2.5.1. <i>Deformációk modellezése</i> .....	16
3. felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések .....	17
3.1. Alkalmazott berendezések.....	17
3.1.1. <i>Mercury Monet DIC</i> .....	20
3.1.2. <i>Fényképezőgép</i> .....	19
3.1.3. <i>Fröccsöntőgép</i> .....	17
3.1.4. <i>DMA berendezés</i> .....	20
3.1.5. <i>DSC berendezés</i> .....	21
4. Kísérleti/fejlesztési rész .....	23
4.1. Szerszámbetét és inzertek .....	23
4.2. DSC mérés.....	24
4.3. DMA mérés .....	25
4.4. Fizikai mérések.....	26
4.5. Numerikus szimulációk.....	29
4.6. Eredmények összehasonlítása .....	33
5. ÖSSZEFOGLALÁS .....	36
5.1. Magyar nyelvű összefoglaló.....	<b>Hiba! A könyvjelző nem létezik.</b>
6. Felhasznált források.....	37

## JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

### Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
E	rugalmassági modulus (elastic modulus)	MPa
p	nyomás (pressure)	bar
T	hőmérséklet (temperature)	°C
T <sub>g</sub>	üvegesedési átmenet hőmérséklet (glass transition temperature)	°C
V	térfogat (volume)	m <sup>3</sup>

### Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
ε	nyúlás (strain)	mm
σ	feszültség (stress)	MPa
σ <sub>D</sub>	kifáradási határ (fatigue volume)	MPa
σ <sub>e</sub>	folyáshatár (yield stress)	MPa
σ <sub>határ</sub>	határfeszültség (limit stress)	MPa

### Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
3D-s	háromdimenziós (three-dimensional)
ABS	akrilnitril-butadién-sztirol (acrylonitrile butadiene styrene)
DIC	digitális képkorreláció (digital image correlation)
DMA	dinamikus mechanikai vizsgálat (dynamic mechanical analysis)
DSC	differenciális pásztázó kalorimetria (differential scanning calorimetry)
PP	polipropilén (polypropilene)
PS	polisztirol (polystirol)

## 1. BEVEZETÉS

Napjainkban a fröccsöntés az egyik legfontosabb feldolgozási módja a termoplasztikus polimereknek. Az összes polimerből készült termék több, mint 30%-a fröccsöntéssel készül. A globális fröccsöntési piac méretét 2021-ben 261,8 milliárd dollárra becsülték, és várhatóan 2022 és 2030 között 4,8%-os éves növekedési rátával bővül.

A különböző fröccsöntőgépek bizonyos korlátok között szinte bármilyen szerszámmal használhatóak. A technológia egyik fő előnye, hogy bonyolult geometriák esetén is gazdaságos más eljárásokkal szemben. Rendkívül gyors ciklusidővel működik, illetve méretpontossága is kiváló. Ezeknek köszönhető, hogy a világ iparágainak széles spektrumában előszeretettel alkalmazzák, ezek például az autóipar, a csomagolás, a háztartási gépek területe.

A fröccsöntési technológia alkalmas számos polimer alapanyag feldolgozására, különböző termékgeometriákat alkalmazva. Ahhoz, hogy alacsony költségű, és jól használható szerszámot lehessen készíteni hőre lágyuló polimer termékek számára, szükség van az alapanyag feldolgozhatóságának ismeretére, különösen a reológia területén. Ezt a folyamatot segítik a fröccsöntési szimulációs szoftverek, melyek segítenek a problémák előrejelzésében és leküzdésében.

A technológia sajátosságaiból adódóan szükség lehet a szerszámban inzertek alkalmazására. Ennek során a fröccsöntő szerszámba behelyezésre kerül egy, jellemzően fémből, vagy polimerből készült alkatrész. Ezek általában egyszerű geometriával rendelkező testek, de előfordulnak bonyolultabb változatok is, például egy akkumulátor, vagy elektromos motor. Ennek a technológiának fő előnyei az erősített szerkezet, a lecsökkent összeszerelési költség, illetve a csökkenő tömeg és méret.

A polimer inzertek fő feladata az, hogy lokálisan erősített szerkezetet tud létrehozni, például szálerősített fröccsöntés esetén. Tudományos diákköri konferencia dolgozatom fő célkitűzése az, hogy polimer inzertek deformációját vizsgáljam és modellezem.

## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

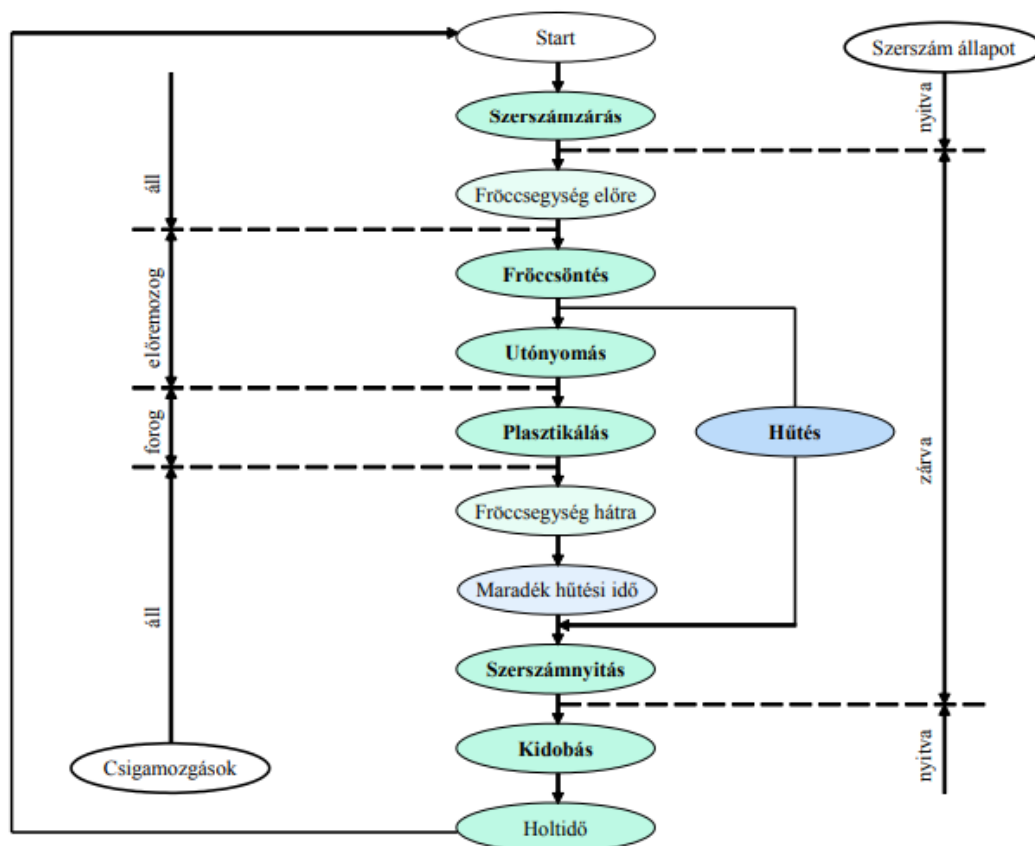
A következő fejezetben áttekintem a fröccsöntésről, fröccsöntő szerszámokról, illetve inzertekről megtalálható eddigi szakirodalmakat, majd kritikai elemzést fogalmazok meg azokról.

### 2.1. Polimerek fröccsöntése

A fröccsöntés az egyik legfontosabb feldolgozási módja a termoplasztikus polimereknek. Segítségével hulladékmentesen lehet előállítani szinte tetszőleges geometriájú, 3 dimenziós testet [1].

A fröccsöntő gép felépítése négy részre bontható. Az első a gépállvány. Ennek feladata az, hogy a többi részegységet magába foglalja, és azok kapcsolatát, illeszkedését biztosítsa. Ugyan nem tekintik a fröccsöntő gép részének, de itt fontos megemlíteni a fröccsöntő szerszámot is. A szerszámok-jellemzően-két részre nyithatók, ezeket álló, illetve mozgó oldali szerszámfélnek hívják. A szerszámzáró egység feladata az, hogy a fröccsöntési ciklus során a szerszámot a megfelelő időben kinyissa vagy bezárja, illetve a megfelelő nagyságú záróerőt fenntartsa. Ez utóbbi azért fontos, mivel a fröccsöntési ciklus során rendkívül nagy erők hatnak a szerszámra (akár több száz tonna), és ilyen erőhatások ellenében is szorosan zárva kell tartani a szerszámot, illetve a kidobó- és maghúzó berendezéseket is ez működteti. A plasztifikáló egység feladata, hogy a polimer anyagot megfelelő hőmérsékletűre hozza, majd a csiga segítségével a szerszámba juttassa az ömledéket. Fő különbsége az extruder csigától az, hogy a forgó mozgás mellett képes az axiális mozgásra is. Ez felelős azért, hogy az alapanyag megfelelő nyomással a szerszámba jusson. A csigadugattyús fröccsöntő gépek esetében ez az egység elmozdul a géphez képest is, először a szerszámzárás során szorosan csatlakozik a szerszámra, majd a befröccsöntési ciklus végén visszahúzódik. A megfelelően szoros illeszkedésre azért van szükség, hogy a befröccsöntés során ébredő nagy nyomások (akár több, mint 1000 bar) fellépése során is megfelelő zárás legyen biztosított. A gép része még a vezérlőegység is. Ennek feladata, hogy megteremtse a kapcsolatot az ember és a gép között. Segítségével lehet állítani a fröccsöntési folyamat különböző paramétereit, amely elengedhetetlen a megfelelő termék gyártásához [1].

A fröccsöntés egy ciklikus, különféle mechanikai mozgásokat tartalmazó folyamat. Ennek megértéséhez nyújt segítséget az 1. ábra.

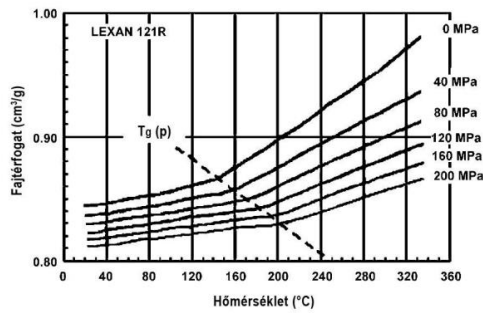


1. ábra A fröccsöntés ciklus [2]

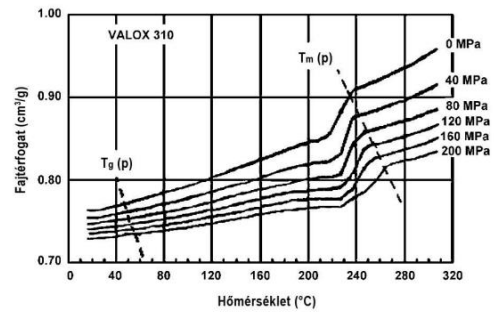
A ciklus kezdetekor a szerszám nyitva van, és nincsen benne termék. Az első lépés a szerszámozárás, amely során a szerszám két felét összezárja a szerszámozáró egység. Ezután következik a fröccsegység előre mozgása. Ekkor jön létre a szorosan illeszkedő kapcsolat a plasztifikáló egység és a szerszám között. Az alapanyagot a gép már az előző ciklus során megömlesztette. Ezt az anyagot juttatja be nagy nyomással a csiga axiális előre mozgással a befroccsöntés során. Ezután következik a hűtési folyamat. A polimerek hűtés hatására hajlamosak a fajtérfogat csökkenésre, melynek hatására a termék mérete pontatlan lehet, illetve a termék deformálódhat is. Ezt kompenzálni kell az utónyomás segítségével, amely során még kis mennyiségű alapanyagot juttatunk a szerszámba, ezzel csökkentve az előbb említett deformációt, illetve vetemedést. A hűtés során megy végbe a plasztikálás is, ennek során a csiga hőjét és forgó mozgását felhasználva megömlesztik és homogenizálják az alapanyagot a következő ciklushoz. Miután megfelelő mennyiségű anyag olvadt meg, a fröccsegység eltávolodik a szerszámtól, hogy a fűtött csiga és hűtött szerszám közötti hőátadás megszűnjön. A hűtés végeztével, miután a termék megdermedt, a szerszám kinyílik, és a készterméket el lehet távolítani a szerszámból. Ezután a ciklus kezdődik előlről [2].

A fröccsöntési folyamatot a mechanikai mozgásokon kívül lehet jellemezni az állapotjelzők segítségével is. Ezek a nyomás ( $p$ ), a fajtérfogat ( $V$ ), illetve a hőmérséklet ( $T$ ). A szerszámban lejátszódó folyamatokat a  $pVT$ -diagramok szemléltetik, amelyek a három állapotjelző közötti kapcsolatot írják le egy adott anyagra vonatkoztatva. Egy ilyen diagramra mutat példát a 2. ábra [2-4].





a)



b)

## 2. ábra Amorf (a), illetve részben kristályos (b) polimerek pVT-görbéi [3]

Az utónyomás fázisa az állapotjelzők segítségével pontosan nyomon követhető, és fontos tulajdonságokra (mint például a zsugorodás) lehet következtetni. A szerszámon belüli alakadást Gilmore és Spencer 1950-ben írta le. A leírás során a termodinamikából ismert gáztörvényt az állapotjelzők felhasználásával megfelelő módon átalakította az alábbi módon:

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

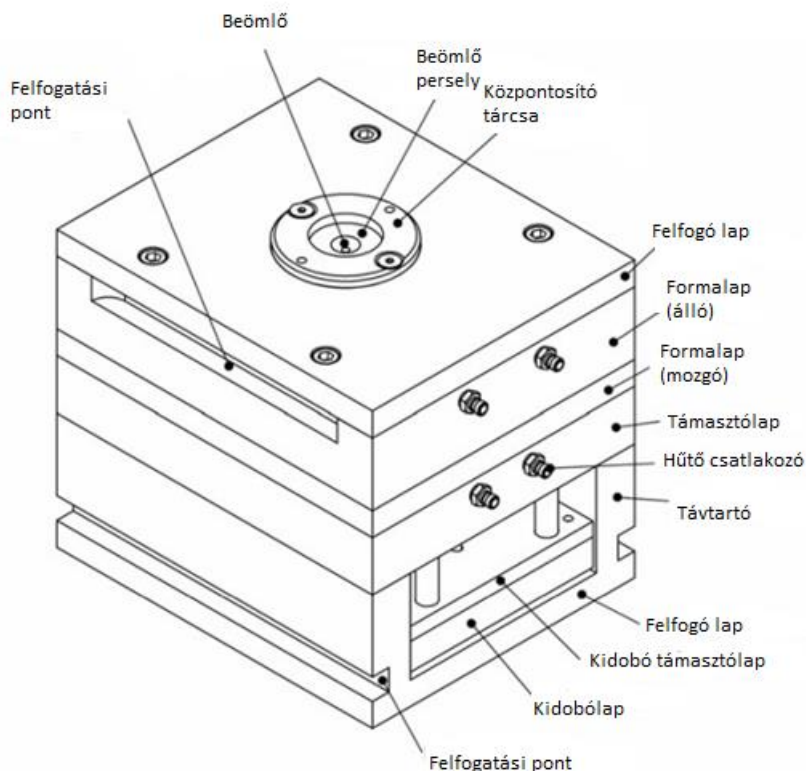
ahol  $p$  a hidrosztatikai nyomás,  $v$  a fajtérfogat,  $R$  az egyetemes gázállandó,  $T$  az abszolút hőmérséklet,  $M$  a polimerlánc monomer egységének móltömege,  $\pi$  az anyagra jellemző korrekciós tényező, amely a nyomást veszi figyelembe,  $\omega$  pedig az anyagra jellemző korrekciós tényező, amely a makromolekula saját térfogatát veszi figyelembe [2-4].

## 2.2. Fröccsöntő szerszámok

A fröccsöntés segítségével rendkívül bonyolult, és méretpontos darabokat lehet gyártani alacsony ciklusidőt tartva. Mielőtt azonban bármilyen alkatrész fröccsöntése megkezdődne, megfelelő fröccsöntő szerszámot kell hozzá tervezni. A szerszám maga is egy nagyon összetett rendszer, amely sok alkatrészből áll, emellett rendkívül sok ciklusnyi hő-, illetve mechanikai terhelést kell kibírnia [8].

### 2.2.1. Szerkezeti felépítés

A fröccsöntőszerszámok a komplex feladatuknak köszönhetően számos alkatrésszel rendelkeznek. Számos különböző fajta szerszám létezik, ezek közül az iparban leginkább elterjedt a kétlapos, hidegsatornás változat. Egy ilyen szerszámot mutat zárt állapotban a 3. ábra.



3. ábra Fröccsöntő szerszám [8]

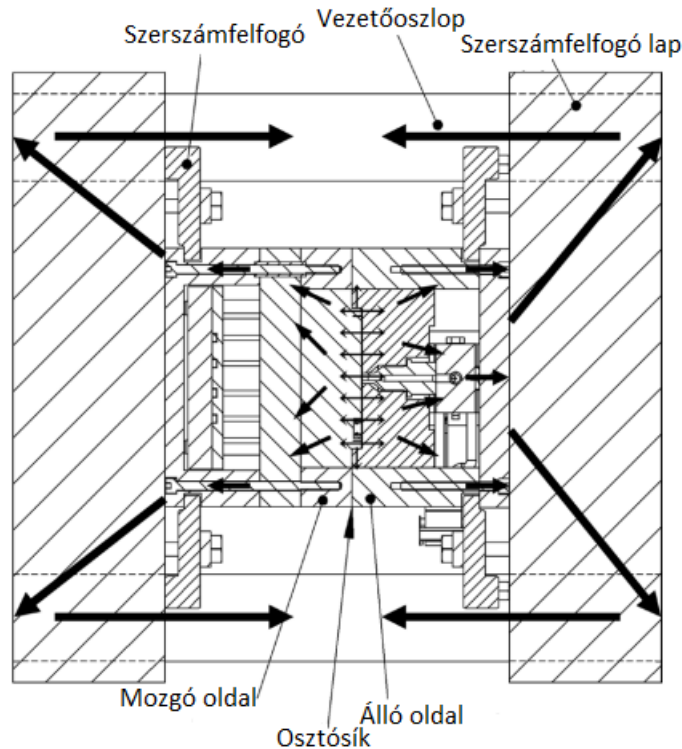
A szerszám több lapból épül fel. Az első ilyen lap az álló oldali felfogólap, ennek funkciója a szerszám rögzítése a fröccsöntőgép állványára. A következő alkatrész az álló oldali formalap, ebben található meg a formabetét. A termékek csésze oldalát jellemzően itt szokták elhelyezni, hogy a hűtési ciklus végén ne zsugorodjon rá az álló oldalra, hanem a mozgó oldali betétben található maggal együtt mozogjon, így könnyebben el lehet távolítani a terméket. Ezután következik a mozgó oldali formalap, majd azután egy támasztólap, illetve a kidobó tartó lap. A kidobó tartó lap feladata az, hogy rögzíteni lehessen a kidobó csapokat, illetve együtt mozogjon az egész kidobó rendszer. Ezután távtartók következnek, hogy legyen helye mozogni a kidobó rendszernek, illetve a mozgó oldali felfogólap, amely feladata az álló oldalhoz hasonlóan az, hogy rögzítse a szerszámot a fröccsöntőgép állványához. A központosító tárcsa segítségével biztosítják a pontos illeszkedést a szerszám és a fröccsöntőgép között, hogy a polimer ömledék ne tudjon kijutni a befröccsöntés során [8].

Az iparban a költségcsökkentés és a darabszám növelése miatt gyakran a kétfészkés szerszám helyett többfészkés szerszámokat szoktak alkalmazni. Nagy kiterjedésű termékek esetén előfordul az egyfészkés szerszámok alkalmazása is. Ezen kívül az elosztócsatorna típusa szerint is lehet osztályozni a szerszámokat. Az első típus a hidegcsatornás, ezen típus esetén az elosztócsatorna megszilárdul a termékkel együtt a hűtési ciklus során, és eltávolításra kerül a kidobás során. Léteznek szigetelt csatornájú szerszámok is, ezeknek az elosztócsatorna nagyobb keresztmetszetűre van tervezve, így a csatornában található ömledék kis része szilárdult csak meg, a belső keresztmetszetben szabadon áramlik. Az utolsó típus a forrócsatornás szerszámok, ezen szerszámokat elektromos fűtőpatronok segítségével fűtik, így a csatornában található anyag nem szilárdul meg [8].

Léteznek ezen kívül további szerszámtípusok is, ilyen például a kockaszerszám. Ezen szerszámoknál a két oldalára fröccsöntenek, a kidobás pedig a másik két oldalról oldják meg. A család szerszámoknál a különböző fészkeknél különböző geometriájú termékeket fröccsöntenek, ezeket gyakran a gyártás után össze is szerelik [8].

### 2.2.2. Fröccsszerszámok tervezése, mechanikai igénybevételek

A fröccsöntő szerszámok a felmelegített polimer ömledék által nagy nyomásnak vannak kitéve. Amikor ez a nyomás hat a szerszám üregeinek felületén, olyan erők keletkeznek, amelyek nagysága jellemzően tíz tonnától több ezer tonnáig terjednek. A szerkezeti kialakításnak elég robusztusnak kell lennie ahhoz, hogy ezeket az erőket kibírja úgy, hogy közben sorjamentes, jó minőségű terméket lehessen előállítani. A szerszám megfelelő kialakításához fontos megismerni a fellépő nyomások, erő és feszültségviszonyokat, ezt mutatja az 5. ábra. A fröccsöntés során az ömledék nyomása a szerszámüregek minden felületére hat. Ez a nyomás nyomó- és nyírófeszültségeket eredményez, ezáltal vegyes feszültségi állapot jön létre, ezt mutatja a 4. ábra [9].



4. ábra A szerszámban ébredő erők [9]

Általánosságban elmondható, hogy a szerszámtervező a szerszám olyan szerkezeti kialakítást igyekszik biztosítani, hogy nem törik el a sok ciklusnyi fárasztó igénybevétel hatására, nem deformálódik, ugyanakkor nem túl nagy kiterjedésű, vagy túl drága. A feszültségi állapot jelentősen változik az álló és a mozgó oldal között. A legtöbb szerszám esetében az álló oldali formabetétet az álló oldali felfogólap, illetve formalap támasztja meg, így tisztán nyomott feszültségi állapotban vannak, nem történik síkból való kihajlás. A mozgó oldalon ugyanakkor a kidobó szerkezet és ezáltal a két távtartó lécz miatt ez nem

valósul meg. Ennek eredményeként nem csupán nyomó, hanem nyírófeszültség is keletkezik a szerszámbetétben, ami miatt fennáll a deformáció veszélye [9].

A von Mises feszültség a szerszám tönkremenetelének előrejelzésére használt mérőszám, amelyet az alábbi módon lehet meghatározni:

$$\sigma_{von\ Mises} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} < \sigma_{határ}$$

ahol  $\sigma_1$  és  $\sigma_2$  első- és másodrendű feszültségek. A tönkremenetel elkerülésének érdekében a von Mises feszültségnek kisebbnek kell lennie, mint a meghatározott határfeszültség. A feszültség mértéke függ a deformációtól, amelyet az alábbi összefüggéssel lehet leírni:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E'}$$

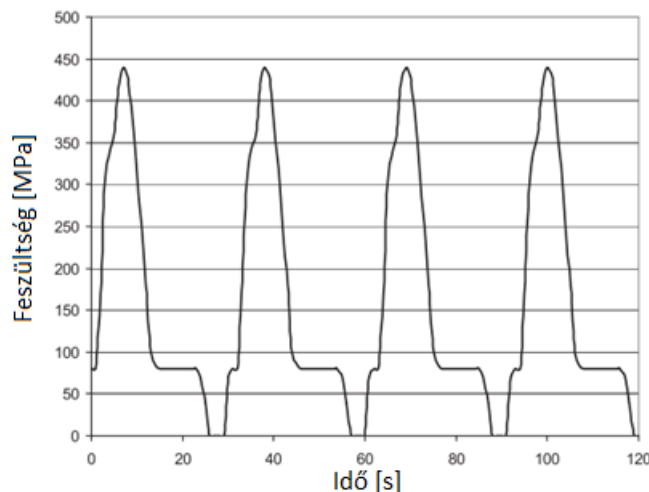
ahol  $\varepsilon$  a deformáció mértéke százalékban,  $\sigma$  a feszültség értéke,  $E'$  pedig az anyag rugalmassági modulusa [9].

A szerszámot úgy kell tervezni, hogy a folyáshatárnál kisebb feszültség ébredjen benne működés közben. A folyáshatár és a határfeszültség közötti biztonsági tényező megadására két módszer létezik. Az egyik megközelítés az, hogy egyszerűen a határfeszültséget a folyáshatárral egyelővé tesszük, és a maximális terhelést kisebbnek feltételezzük, mint ez az érték. A másik megközelítés a biztonsági tényező alkalmazása:

$$\sigma_{határ} = \frac{\sigma_{folyáshatár}}{f}$$

ahol  $\sigma_{folyáshatár}$  az anyag folyáshatára,  $f$  pedig a biztonsági tényező, amelynek értéke jellemzően 1,5-től 6-ig szokott terjedni [9].

A szerszámok tervezése során úgy tűnhet, hogy a folyáshatárt és egy megfelelő biztonsági tényezőt alkalmazó számítás megfelelő felépítésű szerszámot eredményez, a gyakorlatban ez gyakran nem így van. Ennek oka az, hogy a záróerő és az olvadék nyomása ciklikus terhelést okoz, ezt mutatja a 5. ábra.



5. ábra A ciklikus terhelés feszültség-idő diagramja [9]

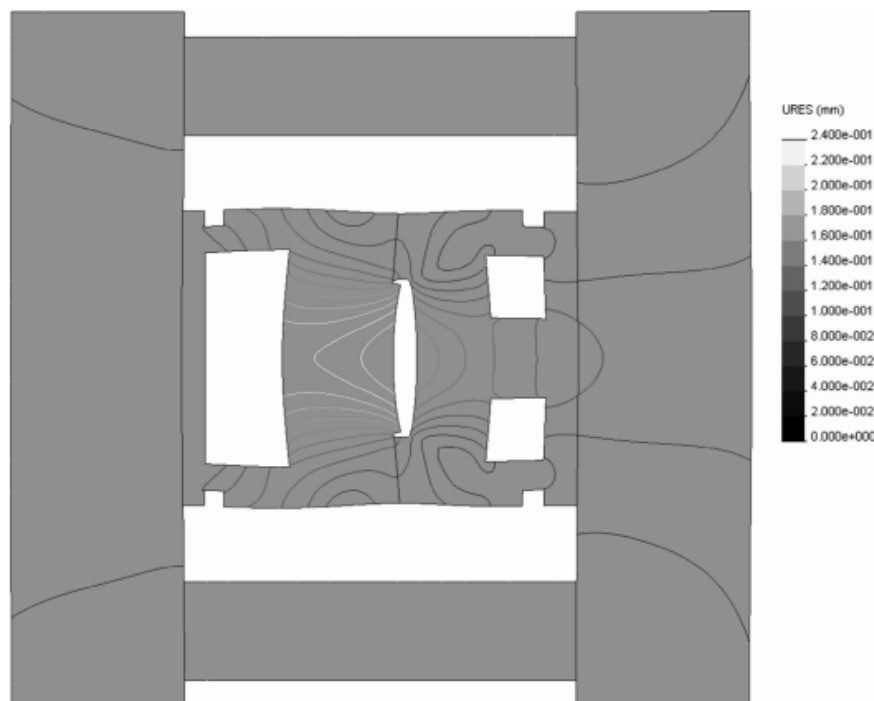
Minden egyes terhelési ciklus lehetővé teszi, hogy az anyagban lévő kis repedések kinyíljanak és becsukódjanak, ezáltal a repedés tovább terjed a szomszédos kristályokra. Több ezer terhelési ciklus után a repedés elér egy kritikus méretet, és a repedés körüli feszültségkoncentráció a szerszám meghibásodását okozza, még akkor is, ha a szerszámot megfelelően tervezték, és a határfeszültség a folyáshatár alatt van. Ezt a tönkremeneteli módot kifáradásnak hívják, és ez egy sokat vizsgált jelenség, ezért rendelkezésre állnak

adatbázisok arról, hogy mennyi a megengedhető maximális feszültsége egyes szerszámoknak. Tehát a határfeszültséget az alábbi módon lehet meghatározni a kifáradást is figyelembe véve:

$$\sigma_{határ} = \min\left(\frac{\sigma_{folyáshatár}}{f}, \sigma_{kifáradás}\right)$$

ahol  $\sigma_{kifáradás}$  a kifáradási határt jelöli. Ha a szerszámot alacsony számú ciklusra tervezik, akkor a határfeszültséget lehet a folyáshatárra beállítani, ha pedig nagy számú ciklus során kell üzemeltetni, akkor kifáradási határt kell figyelembe venni.

Bár a túlzott feszültségek jelentős károkat tudnak okozni a fröccsöntő szerszámokban, ezen kívül fontos jelenség a deformáció is. Ennek oka az, hogy a deformáció miatt az osztósíkon sorja keletkezhet, illetve a szűk tűrésekkel rendelkező termékek méretei eltérhetnek a megengedett határoktól. Éppen ezért a szerszámok tervezése során inkább az alakváltozás minimalizálása a fő cél a feszültség minimalizálása helyett. Egy szerszámon belüli feszültségeloszlást mutat a 6. ábra [9].



6. ábra Szerszámon belüli feszültségeloszlás [9]

Ha a szerszámlap teljesen alá van támasztva (jellemzően az álló oldalon), akkor a lemezek tisztán nyomott állapotban vannak, a lemezek lehajlása elhanyagolható. Az eloszló nyomófeszültség az alábbi módon felírható:

$$\sigma = \frac{F}{A'}$$

ahol  $\sigma$  a feszültség,  $F$  az ébredő erő,  $A'$  pedig a szerszám keresztmetszete. Az alakváltozás a feszültség és a rugalmassági modulus hányadosa:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Ezekből az alakváltozás az alábbi módon határozható meg:

$$\delta_{nyomó} = \varepsilon * L$$

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

Amennyiben a szerszám nincs teljesen alátámasztva, akkor a méretezésnek nyírásra kell történnie, hogy a szerszám kibírja a nyíró igénybevételt.

$$\tau = \frac{F}{A'}$$

ahol  $\tau$  a nyírófeszültség,  $F$  az erő,  $A'$  pedig a lap nem alátámasztott felülete [9].

## 2.3. Numerikus szimulációk

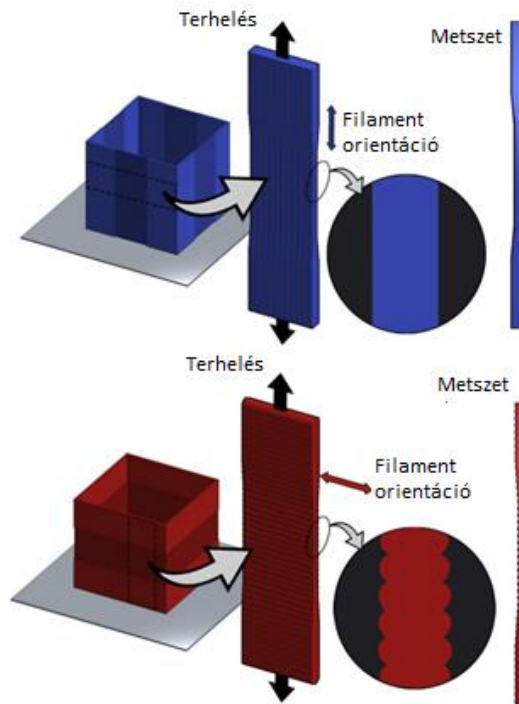
A fröccsöntési folyamat numerikus szimulációja során egy egyenletrendszert oldunk meg a hozzá tartozó peremfeltételek és kezdeti feltételek segítségével, így megkapva a fröccsöntés matematikai modelljét.

### 2.3.1. FDM testek szimulációja

Az FDM (Fused Deposition Modelling) technológia az elmúlt években az egyik legszélesebb körben alkalmazott gyors prototípusgyártási módszerré vált széleskörű alkalmazásban. Ez a technológia lehetővé teszi viszonylag bonyolult testek gyártását háromdimenziós számítógépes modellek alapján. A technológia alapkonceptiója az, hogy megolvasztja az alapanyagot, majd azt formázva létrehozza a készterméket. Az alapanyag egy feltekereselt filament, amelyet görgők húznak, majd egy szabályozott hőmérsékletű fűvóka csúcsba kerülnek, és alakítható hőmérsékletűre hevítik. A fűvóka ezután rétegről rétegre építi fel a szerkezetet mindaddig, amíg kész nem lesz a termék [5].

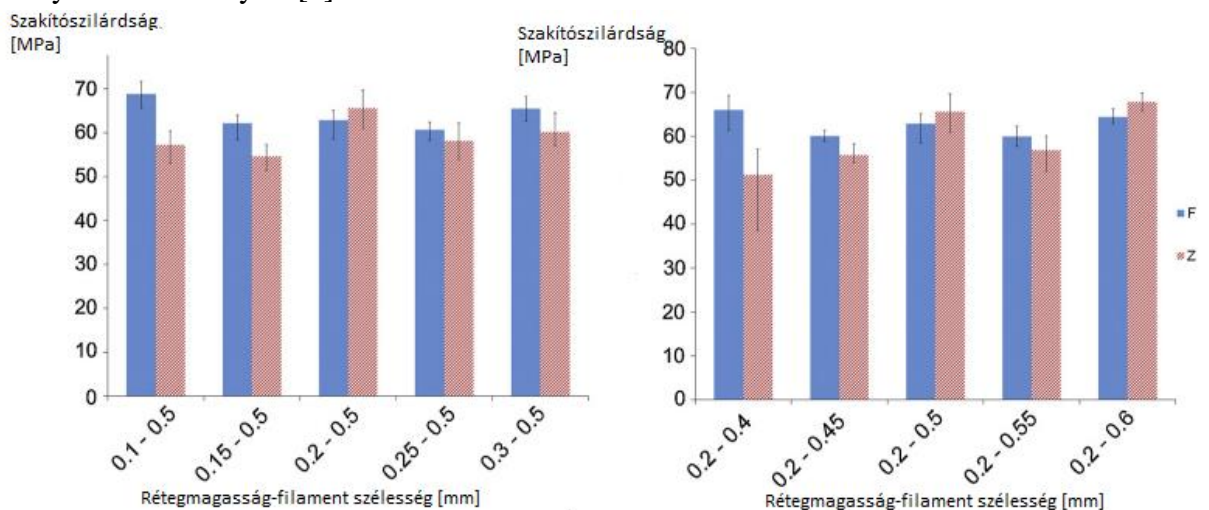
Mivel az FDM technológiával gyártott termékek vékony filament által alkotott rétegekből épülnek fel, fontos szerepe van az alapanyag termoplastikus tulajdonságának. Ez felelős azért, hogy a rétegek között megfelelő hegedés jöjjön létre, majd az anyag szobahőmérsékleten megszilárduljon. A legfontosabb feldolgozási paraméterek, amik befolyásolják a végtermék mechanikai tulajdonságait az a rétegvastagság, filament szélessége és orientációja. Jelenleg az additív gyártástechnológiával készült termékek 51%-a polimer filamentból készül, ezek közül is a leggyakrabban használtak a politejsav (PLA), illetve az akrilnitril-butadién-sztirol (ABS).

Az FDM technológiával készült polimer termékek mechanikai tulajdonságaival, illetve azok szimulációjával számos szakirodalom foglalkozik. Ennek oka az, hogy a rétegek közötti hegedés, illetve a porozitás akár jelentősen befolyásolhatja a testek tulajdonságát a tömör alapanyaghoz képest. Ezzel a problémával foglalkoztak Allum és társai [6]. Tanulmányuk során azt bizonyították, hogy erre a célra tervezett polilaktid szakító próbatestek képesek elérni a tömör anyag szilárdságát. Ehhez két fajta próbatestet alkalmaztak, ezt mutatja a 7. ábra



7. ábra "F" (alul), és "Z" (felül) típusú próbatetek [6]

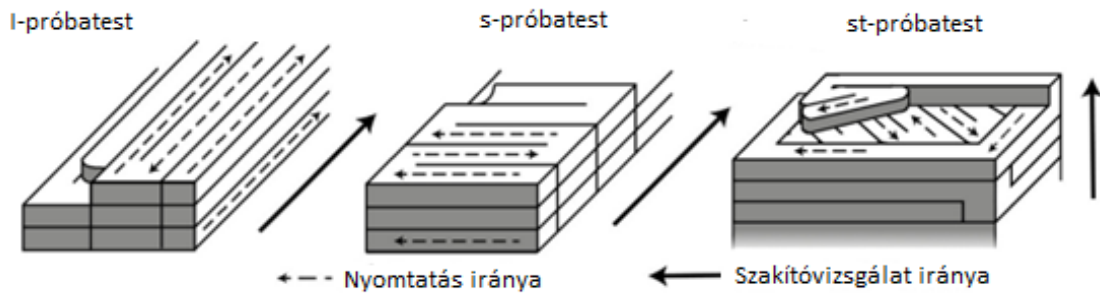
Az „F” próbatetek (a) esetén a terhelés irányában állnak a szálak, ezek a minták reprezentálják a tömör anyagot, a „Z” próbatetek (b) esetén pedig a terhelése merőleges a rétegek orientációjára. Összesen öt különböző rétegvastagság és szálvastagsággal készítették el a próbateteket, majd szakítóvizsgálat segítségével vizsgálták azokat. Mind az „F”, illetve „Z” jelű próbatest a tömör anyaghoz hasonló szilárdságot mutattak (8. ábra) Ezzel szemben néhány tulajdonság (például szakadási nyúlás) jellemzően alacsonyabbnak bizonyult [6].



8. ábra Szakítószilárdság összehasonlítása különböző rétegmagasságok és filament szélességek esetén [6]

Song Ko és társai [7] a hegedési erő nagyságát növelték a rétegek közötti diffúzió elősegítésével PC-ABS mintákat vizsgálva. Feltételezésük az volt, hogy a szálak közötti határfelület gyengébb mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, mint maga a szál, ezért

a felület erősségét úgy növelték, hogy a rétegek egymásba hatolását a viszkozitás csökkentésével segítették elő. Összesen három fajta nyomtatási iránnyal készítettek próbatesteket, ezt mutatja az 5. ábra.



9. ábra Próbatestek geometriája [7]

A nyomtatás irányán kívül változtatták a minták lágysító tartalmát is. Az S0 jelű minta 0, az S5 illetve S10 jelű minták 5, illetve 10 tömegszázalék lágysító adalékot tartalmaztak. A mérési eredményeiket a 10. ábra tartalmazza.

Mérési eredmények		S0	S5	S10
Rugalmassági modulus	$Y_{-}$ [MPa]	1061 ± 42	1080 ± 19	1134 ± 10
	$Y_l$ [MPa]	1139 ± 22	920 ± 44	1057 ± 18
	$Y_s$ [MPa]	1091 ± 37	989 ± 32	1038 ± 73
	$Y_{st}$ [MPa]	1118 ± 30	1011 ± 25	999 ± 99
Szakítószilárdság	$\sigma_{-}$ [MPa]	62.2 ± 1.2	57.5 ± 0.4	51.8 ± 0.8
	$\sigma_l$ [MPa]	61.9 ± 1.4	55.2 ± 1.1	49.8 ± 1.2
	$\sigma_s$ [MPa]	25.2 ± 4.9	47.5 ± 1.0	49.4 ± 2.5
	$\sigma_{st}$ [MPa]	4.7 ± 0.4	17.8 ± 3.4	23.1 ± 2.1
Max. fesz.-hez tartozó nyúlás	$\lambda_{m,-}$ [%]	9.8 ± 0.3	9.4 ± 0.1	8.0 ± 0.1
	$\lambda_{m,l}$ [%]	12.4 ± 0.3	10.5 ± 0.5	8.1 ± 0.3
	$\lambda_{m,s}$ [%]	3.2 ± 0.6	7.1 ± 0.3	6.0 ± 0.3
	$\lambda_{m,st}$ [%]	0.4 ± 0.03	2.1 ± 0.5	2.7 ± 0.4
Szakadási nyúlás	$\lambda_{b,-}$ [%]	13.5 ± 2.6	19.7 ± 1.3	23.3 ± 1.4
	$\lambda_{b,l}$ [%]	96.6 ± 10.0	13.6 ± 2.2	25.7 ± 1.1
	$\lambda_{b,s}$ [%]	3.2 ± 0.6	7.1 ± 0.3	6.0 ± 0.3
	$\lambda_{b,st}$ [%]	0.4 ± 0.03	2.1 ± 0.5	2.7 ± 0.4

10. ábra Szakítóvizsgálat eredményei [7]

A mérési eredményekből arra lehet következtetni, hogy a filamentek megfelelő orientációja esetén bizonyos mechanikai tulajdonság (rugalmassági modulus, szakítószilárdság) elérhetik a tömör anyag tulajdonságait. Fontos tehát, hogy FDM technológiával nyomtatott testek esetén tisztában legyünk a terhelések fajtájával és irányával, hogy megfelelő módon tudjuk beállítani a szálorientációt [7].



## 2.4. Inzertek alkalmazása

A fröccsöntéssel készült termékek a technológia sajátosságai miatt rendkívül sokfélék lehetnek. A termékek között előfordulnak olyanok is, amelyek egy előgyártmányt (inzertet) tartalmaznak magukban.

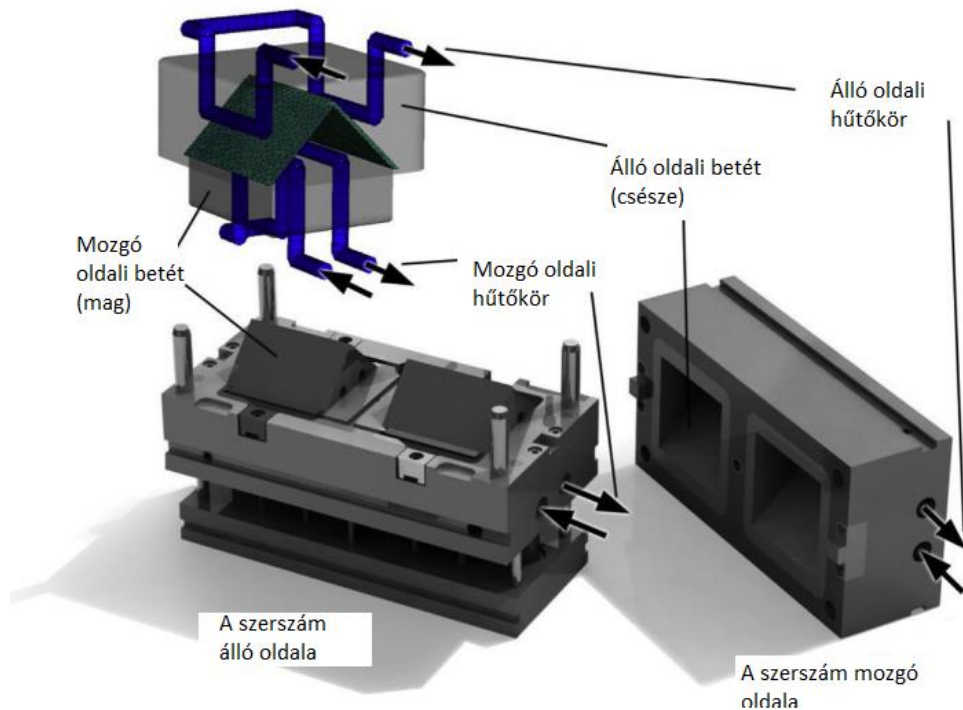
### 2.4.1. Polimer inzertek

A használt előgyártmányok anyaga legtöbbször fém, de egyre elterjedtem a polimerből készült inzertek alkalmazása.

### 2.4.2. RPT (Rapid Prototyping Technology) alkalmazása

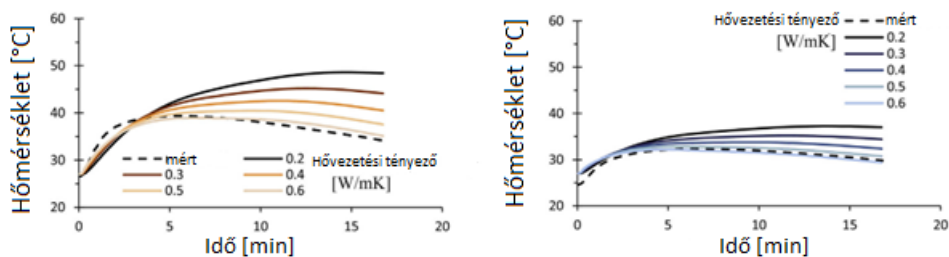
A műanyagipar jelenlegi helyzetében a költségek és a piacra jutási idő csökkentése iránti növekvő igény miatt a gyors szerszámozást és prototípus gyártást egy rendkívül kutatott területté teszi. A 3D nyomtatott fröccsöntő szerszám- és alkatrész-alkatrészek gyors és költséghatékony előállítását kis sorozatban. A 3D nyomtatott betétek mechanikai tulajdonságai és ezáltal az élettartama is alacsonyabb a hagyományos, acél fröccsöntő betétekhez képest [10].

A gyors prototípus gyártó anyagok fő hátránya az alacsony hővezető képességük, amely erősen befolyásolja a hűtési tulajdonságokat és a vetemedést. Kovács és társai [10] egy általuk kifejlesztett, hűtőrendszerrel ellátott betét hőtani vizsgálatait és szimulációit végezték el. A vizsgált hőtani paramétereket, mint például a szerszámok fajhője és hővezető képessége közvetlenül beépíthető a szimulációs szoftverekbe, azonban a szerszám és az ömledék közötti hőátadási tényezőt nem lehet ésszerű módon mérni, ezért ezeket szimulációs szoftverrel határozták meg valós mérésekből származtatott közvetett számítások alapján. Ezeket a méréseket FDM, illetve Polyjet technológiával készült szerszám-alkatrészekkel is elvégezték. A szerszám a hűtőcsatornával együtt a 11. ábra tartalmazza [10].



11. ábra A szerszám felépítése [10]

A termikus paraméterek, mint például a fajhő, hőátadási együttható, és hővezetési tényezők szükségesek voltak a fröccsöntési szimulációkhoz, és bár ezek közül néhányat megmértek, a szimuláción keresztül indirekt számításokkal lehetett kalibrálni őket. A két szerszámfél hőmérsékletét mérték a valós fröccsöntési folyamatban termoelemekkel, ezt használták referenciaként a szimulációhoz. A hőmérsékletet az idő függvényében számolták ki a szimulációs szoftverrel pontosan ugyanazon pozíciókban, mint amelyekben a kísérletek során mérték. A bemeneti hőtani paraméterek változtatásával a szimuláció hőmérséklet-idő görbéit ráillesztették a mért adatokból álló görbéket, ezt tartalmazza a 12. ábra [10].

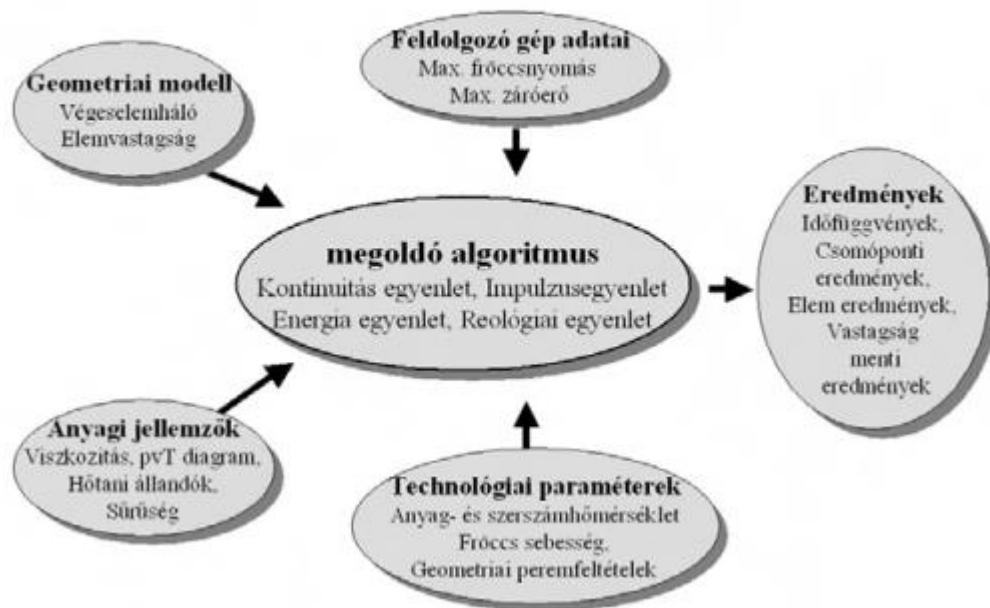


12. ábra Hőmérséklet-idő görbék [10]

A vizsgálatokról elmondható, hogy a Polyjet technológiával készült termékek alkalmasabbak a gyors szerszámzásra, mind a felületi érdesség, sűrűség és hővezetés területén. Ezen kívül ezzel a technológiával minden gyorszerszám tesztelhető a hűtőkörökkel együtt [10].

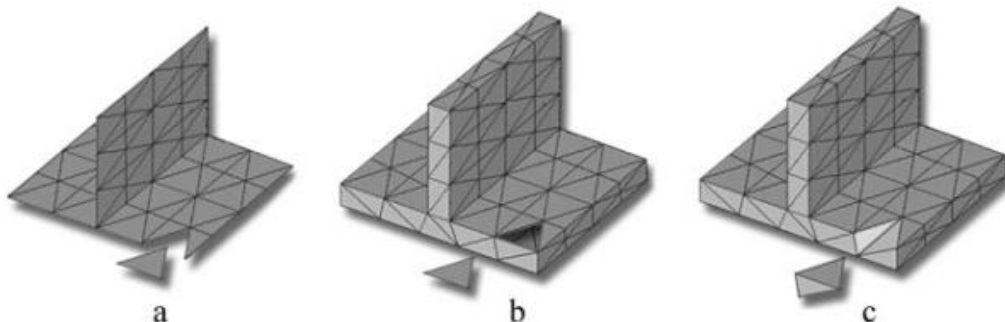
## 2.5. Fröccsöntés numerikus modellezése

A fröccsöntés szimulációja magában foglalja egy egyenletrendszer számítógépes megoldását, és a hozzájuk tartozó peremfeltételeket, amelyek a fröccsöntési folyamat matematikai modelljét alkotják. Általánosságban elmondható, hogy a mai szimulációk hatalmas mennyiségű számított adatot eredményeznek, amelyeket gyakran valamilyen adott változó függvényében jelenítenek meg. Ezek lehetnek a kitöltési minták, nyomáseloszlások, zsugorodások, vagy a vizsgált darab vetemedése. Ez a folyamat egyszerűnek tűnhet, de vannak jellemzők, amelyek megnehezíthetik, ezek a szerszámgeometria komplexitása, az anyagtulajdonságok, illetve a fröccsöntési folyamat alapvető fizikai jellemzői [11].



13. ábra Fröccsöntési szimulációk működési elve [2]

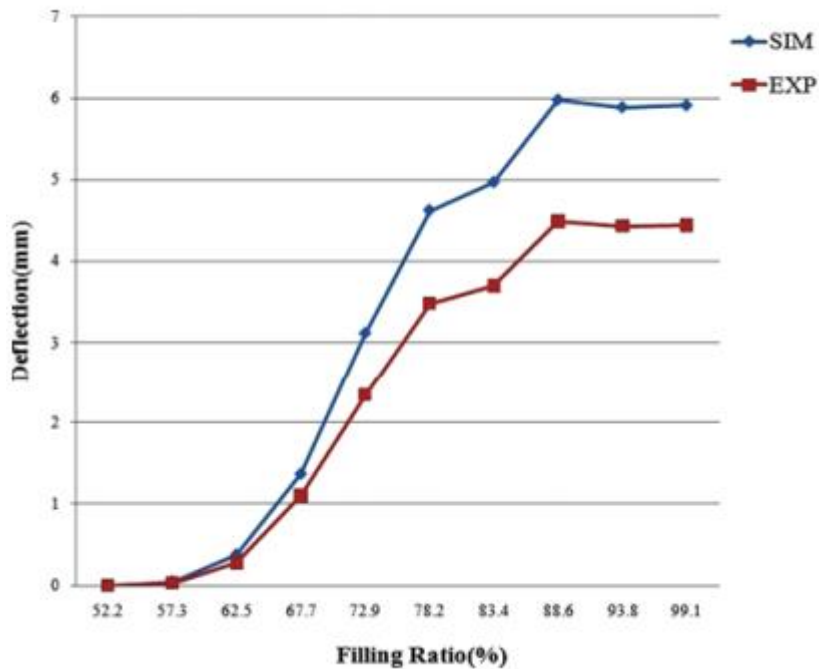
A fröccsöntéssel készült termékek jó közelítéssel vékonyfalú terméknek mondhatók. Ez a szimulációt némileg megkönnyíti, mivel a térbeli kiterjedése két irányban jelentősen nagyobb, mint a harmadikban. Ezt kihasználva lehet az ilyen termékeket középsík hálózással ellátni. Ezen kívül létezik még felületi, illetve térfogati hálózás [2, 11]



14. ábra Középsík (a), felületi (b), térfogati (c) hálózás [2]

### 2.5.1. Deformációk modellezése

A hosszú, vékony alkatrészek fröccsöntése során az ömledék aszimmetrikusan haladhat előre a mag egyik oldalán, így deformációt okozva a magban. Chen és társai [12] tanulmányuk során ezt a jelenséget figyelték meg nagysebességű kamerák segítségével, majd szimulációs vizsgálatokkal is. A szimulációs vizsgálatokat először Moldex 3D programmal végezték, majd az innen kapott nyomáseloszlást peremfeltételként felhasználva Ansys program segítségével mechanikai vizsgálatot végeztek, aminek eredményül deformációt kaptak [12].



15. ábra Szimulációs és mért eredmények összehasonlítása [12]

Összefoglalásképp elmondható, hogy a magdeformáció szimulációja meglepően pontos, sőt, kicsit túl is becsüli az eredményeket, annak ellenére, hogy elhanyagolja a viszkoelaszticitást és a normálfeszültség-különbségeket is [12].

Az irodalomkutatást összefoglalva elmondható, hogy a fröccsöntési folyamat, és annak numerikus szimulációkkal való vizsgálata igen elterjedt napjainkban. A folyamat során gyakran helyeznek a szerszámba előgyártmányt erősítés céljából, azonban ennek modellezése komplex terület, és annyira nem elterjedt. Ennek egyik fő oka az, hogy a fröccsöntési szimulációt végezni képes szoftverek nem alkalmasak ezen előgyártmányok, inzertek deformációjának vizsgálatára. Ennek kiküszöbölésére jellemzően csatolt szimulációkat alkalmaznak, amelynek lényege, hogy két különböző szoftverrel, az eredményeket egymásba importálva lehetőség van olyan vizsgálatokat végezni, amiket külön-külön az egyes programokkal nincs lehetőség. Ezek alapján elmondható, hogy a célom az, hogy csatolt szimulációk segítségével megállapítsam az inzertek deformációját, és az anyagmodellek pontosításával javítsam a számításokat.

### 3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

#### 3.1. Alkalmazott berendezések

A következő fejezetben bemutatom, hogy milyen berendezéseket alkalmaztam az általam végzett kísérletek során.

##### 3.1.1. Fröccsöntőgép

A fröccsöntési vizsgálatok elvégzéséhez ARBURG Allrounder 420 C típusú fröccsöntőgépet használtam.



**16. ábra** ARBURG Allrounder 420C fröccsöntőgép

A szerszámot tekintve a tanszéken elérhető üvegbetétes szerszámot használtam. Erre erősítettem fel a terveim alapján a tanszéken gyártott alumínium szerszámbetétet.



**17. ábra** A használt szerszámbetét

### 3.1.2. *Craftbot Plus*

Az inzertek nyomtatásához használtam a Craftbot Plus nyomtatót, ami a hőre lágyuló alapanyagok feldolgozására alkalmas.



**18. ábra** Craftbot Plus nyomtató [15]

### 3.1.3. *Objet 30 Pro*

Szintén az inzeretek nyomtatásához használtam a Polyjet technológiát használó Objet 30 Pro készüléket.



19. ábra Objet 30 Pro nyomtató [16]

### 3.1.4. *Fényképezőgép*

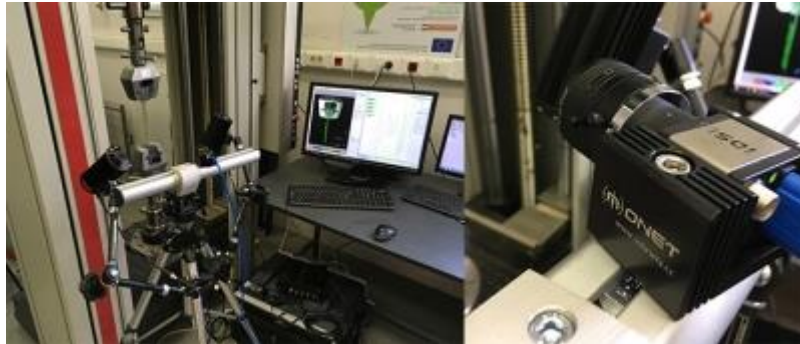
A felvételek készítéséhez egy Nikon D600 típusú fényképezőgépet használtam, hozzá pedig Nikon AF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G típusú makroobjektívet.



20. ábra Nikon D600 fényképezőgép

### 3.1.5. Mercury Monet DIC

A fröccsöntési folyamat során készített videófelvételek kiértékeléshez Mercury Monet DIC-hez tartozó számítógépes szoftvert használtam.



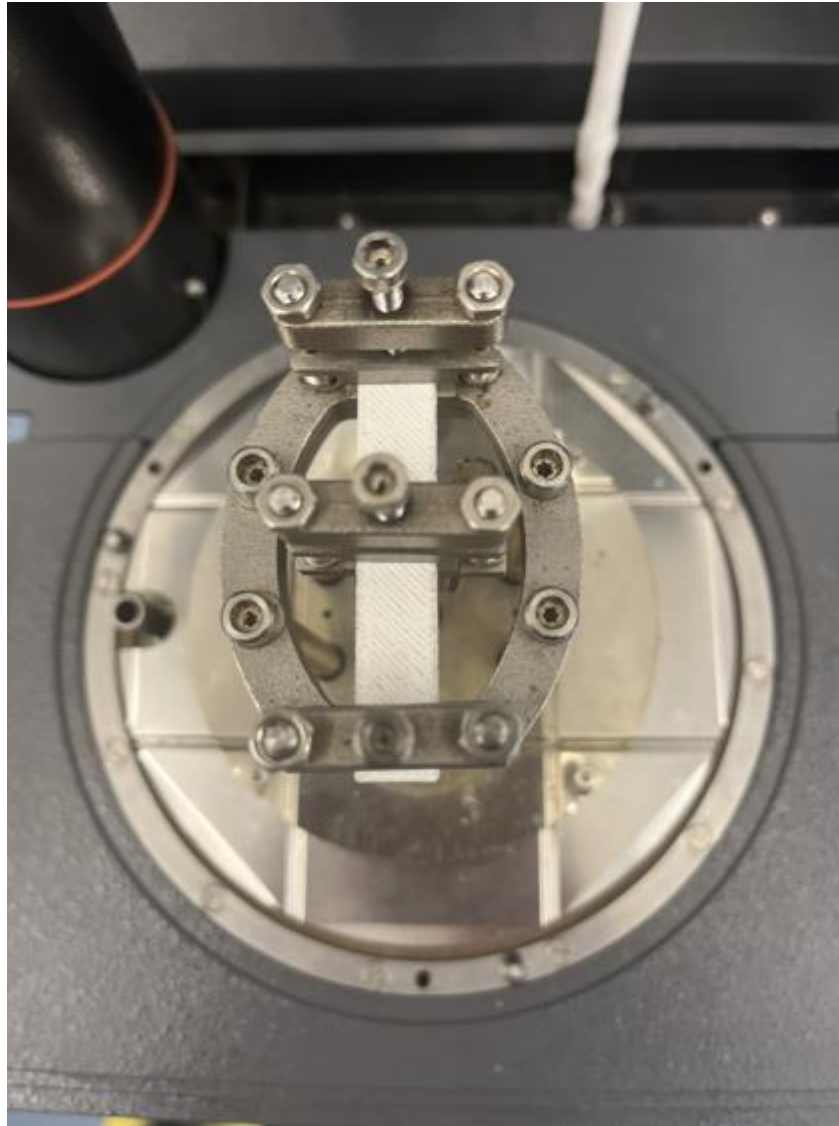
21. ábra DIC berendezés [13]

### 3.1.6. DMA berendezés

A dinamikus mechanikai analízis (DMA) vizsgálatokat egy TA Instruments által gyártott DMA Q800 típusú berendezéssel végeztem. Ennek mérési tartományai:

- Hőmérséklettartomány -145-600 °C
- Frekvenciatartomány 0,01-200 Hz
- Maximális terhelés 18 N





**22. ábra** DMA berendezés, befogóban a nyomtatott próbatesttel

### *3.1.7. DSC berendezés*

A differenciális pásztázó kalorimetria (DSC) vizsgálatokat egy DSC Q2000 típusú géppel végeztem el, ennek a mérési tartománya: -90-550 °C



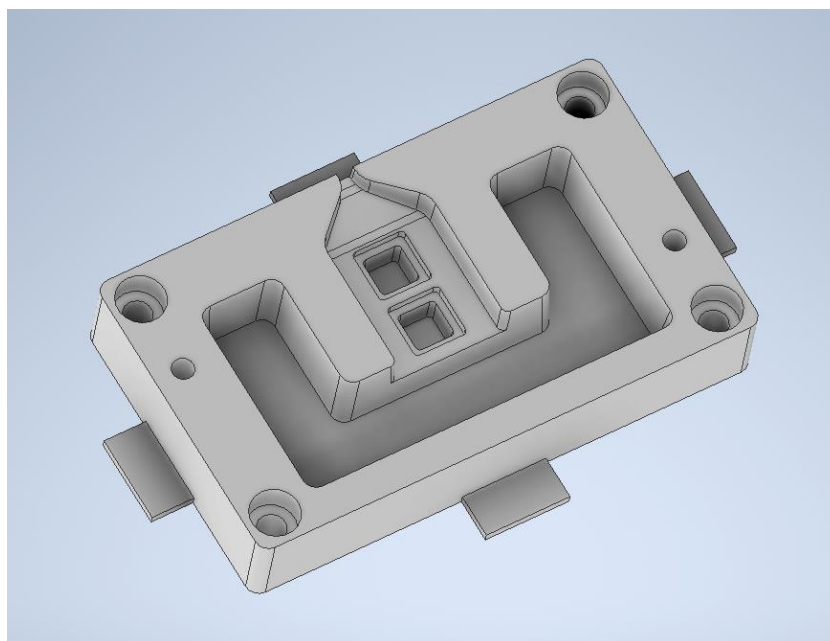
**23. ábra** DSC berendezés [14]

## 4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

Munkám során először megterveztem és elkészítettem a mérés terét szolgáltató szerszámbetétet. Ezután FDM illetve Polyjet technológiával kinyomtattam a vizsgálatokhoz szükséges polimer inzerteket. Ezeket a fröccsöntési folyamat elkezdése előtt behelyeztem a kialakított helyükre a betétben, majd elindítottam a fröccsöntési folyamatot, és erről a fényképezőgép és makroobjektív segítségével videofelvételt készítettem a szerszám üvegbetétjén keresztül. Ezen felvételeken megfigyelhető deformációkat kiértékeltem, majd numerikus szimuláció segítségével reprodukáltam a folyamatot. Az eredményeket ezután összevettem, és levontam a konklúziókat. Ennek a munkafolyamatnak a lépéseit fogom bemutatni a következőkben.

### 4.1. Szerszámbetét és inzertek

Az inzertek vizsgálatához szükségem volt egy megfelelő szerszámbetétre, melyben el lehet őket úgy helyezni, hogy vizsgálható és mérhető legyen a deformációjuk. Ehhez alumíniumból kimunkáltam egy megfelelő szerszámbetétet, amit a tanszéken található üvegbetétes szerszámba behelyezve megfelelően lehetett vizsgálni az inzerteket. Széplaki és Hajagos [17] előzetesen már végzett inzertdeformációkkal kapcsolatos vizsgálatokat. Ehhez gyártottak Polyjet technológiával szerszámbetétet, ennek a geometriáját alakítottam át a saját méréseim részére. Az átalakítás fő oka az volt, hogy mivel a polimerek alapvetően rossz hővezető anyagok, a fröccsöntési folyamat során felvett hőt nehezen adják le. Éppen ezért a ciklusok között nehezen biztosítható az, hogy újra szobahőmérsékletre hűljenek le. Ezt lehetne kompenzálni például egy alumíniumból készült szerszámmal. A betét átalakításának fő szempontja az volt, hogy marással lehessen gyártani, ezért a sarkokat lekerekítésekkel kellett ellátni. A szerszámbetét modelljét a 24. ábra tartalmazza.



24. ábra Szerszámbetét kialakítása

A betét anyagának alumíniumot választottam, ezt pedig marással kellett megmunkálni. Ennek következtében úgy kellett megtervezni, hogy a sarkok megfelelő lekerekítésekkel

rendelkezzenek (maximum 1mm-es rádiusz), illetve az ujjmaró maximális dolgozó hossza 9 mm.

Az inzerteket különböző additív gyártástechnológiával gyártottam. FDM technológia segítségével ABS alapanyagból, illetve Polyjet technológia segítségével Fullcure 835 anyagból került elkészítésre mindegyik geometria. A tervezésnél ügyelni kellett arra, hogy az inzertek pontosan illeszkedjenek a betétben kialakított foglatba, ne mozogjanak benne, így a pontos deformációt lehet megfigyelni a későbbiekben. A geometriai kialakításokat az 1. táblázat tartalmazza.

Geometria	Méret [mm]	Magasság [mm]
Kör	2	6,8
	4	6,8
	6	6,8
Négyzet	2	6,8
	4	6,8
	6	6,8

**1. táblázat** Inzertek geometriai kialakításai

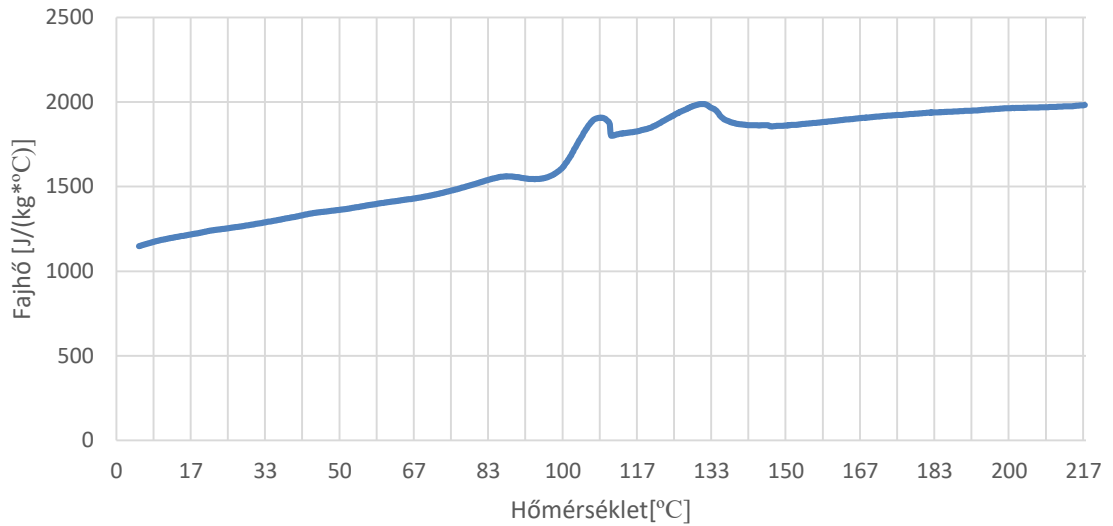
Ezek kialakításánál a fő szempont az volt, hogy különböző méretű, geometriájú és anyagú mintákat tudjak vizsgálni. Az inzertek magasságát úgy választottam meg, hogy kiinduló állapotban, illetve deformáció közben se érjen hozzá a szerszám osztósíkjában található üveglaphoz. Ez azt a célt szolgálja, hogy a modellezés és szimuláció során ne kelljen figyelembe venni az inzert teteje és az üveglap közötti kapcsolatot, így ki tudok zárni egy olyan lehetséges okot, ami pontatlanságot vihet a szimulációs eredményekbe a fizikai mérésekhez képest.

## 4.2. DSC mérés

Differenciál pásztázó kalormériát (DSC) mérést végeztem az FDM nyomtatáshoz használt ABS alapanyagon, hogy meg tudjam állapítani a nyomtatott alapanyag fajhőjének hőmérséklet függését. Erre a szimulációk során szükség lesz, hogy hőmérsékletfüggő alapanyag tulajdonságokkal tudjak számolni. A mérési paraméterek az alábbiak voltak:

- egyszeri felfűtés
- minta tömege: 5,6  $\mu\text{g}$
- hőmérséklettartomány: 0-220  $^{\circ}\text{C}$
- felfűtési sebesség: 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- közeg: nitrogén

A mérés eredményeit a 25. ábra tartalmazza.



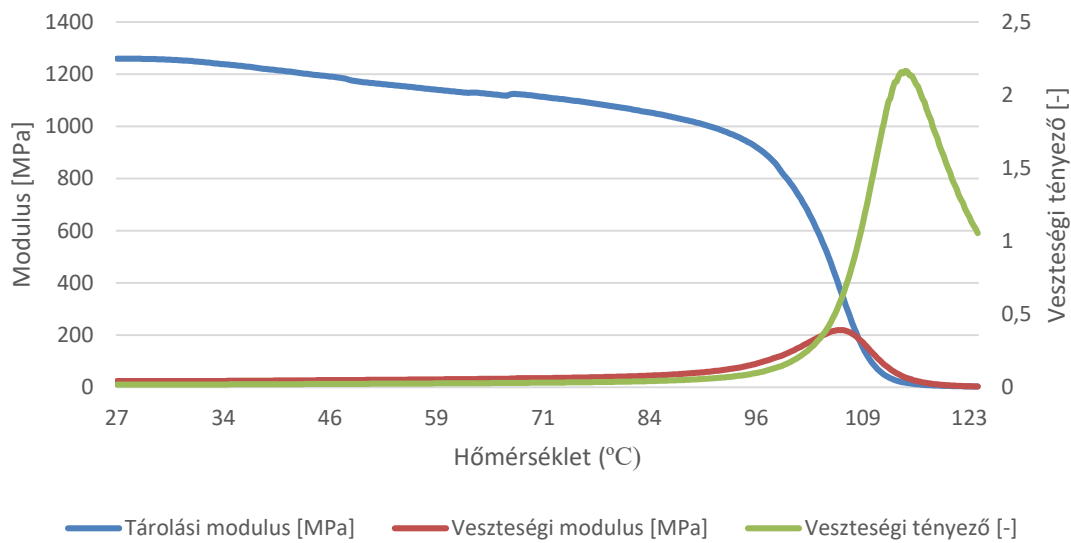
**25. ábra** ABS alapanyag DSC vizsgálatának eredménye

#### 4.3. DMA mérés

Dinamikus mechanikai analízist végeztem az FDM nyomtatással készített, ABS próbatesten, hogy meghatározzam a tárolási és veszteségi modulus hőmérsékletfüggését. Ez szintén a szimulációkhoz fontos, hogy pontos anyagmodellel lehessen számolni. A mérési paraméterek az alábbiak voltak:

- hőmérséklettartomány: 24-130 °C
- felfűtési sebesség: 5 °C/min
- feszültség frekvenciája: 1 Hz
- amplitúdó: 10 μm
- mérőfej: dual cantilever
- próbatest méretei: 35x10x4

A tárolási modulus, veszteségi modulus, és veszteségi tényező a 26. ábrán látható

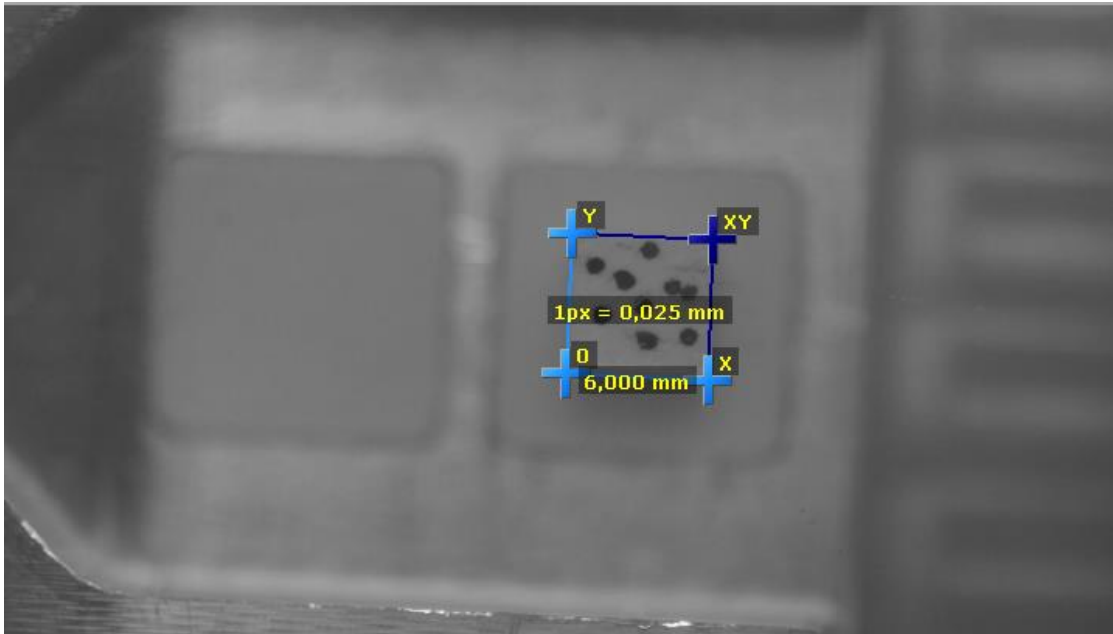


**26. ábra** ABS alapanyag DMA vizsgálatának eredménye

Az üvegesedési átmeneti hőmérséklet a veszteségi modulus maximumához tehető, ami esetben 106 °C.

#### 4.4. Fizikai mérések

A fizikai mérésekhez üvegbetűs szerszámot használtam, hogy a fröccsöntési ciklus során végbemenő inzertdeformációt vizsgálni tudjam. Ehhez egy Nikon D600 típusú fényképezőgépet és makroobjektívet használtam. A valós deformáció meghatározásához digitális képkorrelációt (Digital Image Correlation, DIC) használtam. Ezt lehetőség lenne a fröccsöntés során, valós időben vizsgálni, de ehhez szükség lenne a kamera kalibrálásához. Ezt előre elkészített pontrács segítségével lehetne elvégezni, de az üvegbetűt tükröződése, illetve az szerszám osztósíkjának ferdesége miatt ezt nem tudtuk elvégezni. Az utólagos kalibráláshoz az inzertek jellemző méreteit használtam fel, így pontosan lehetett mérni a deformációt a szoftver segítségével. Ezt mutatja a 27. ábra

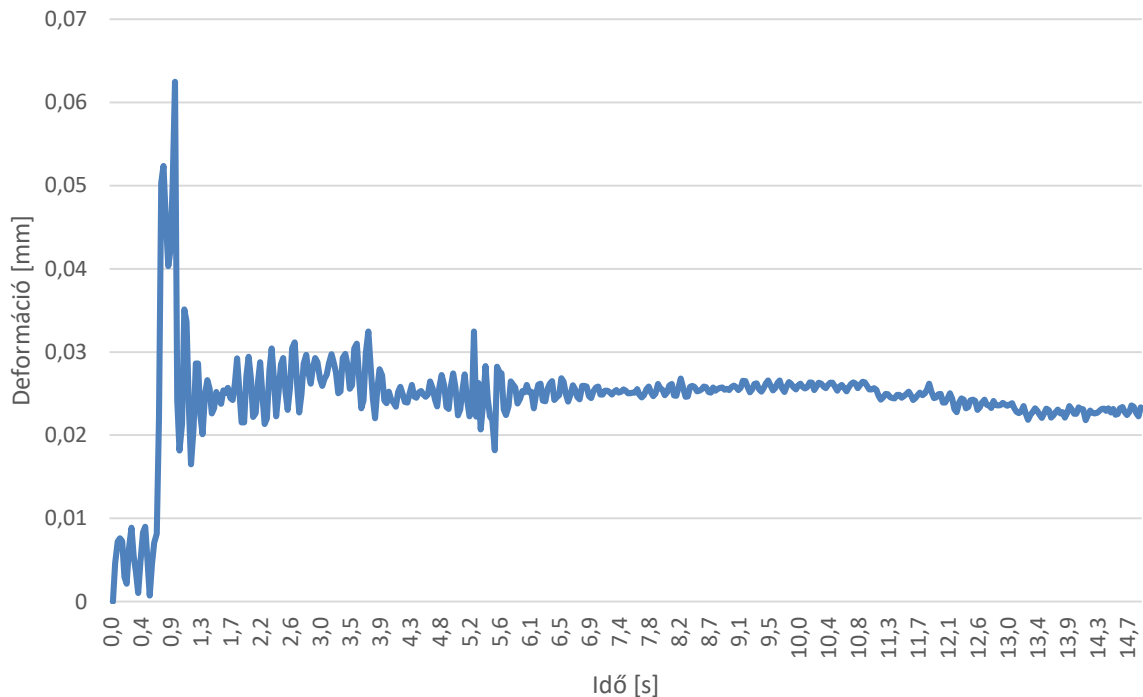


27. ábra A DIC készülékhez tartozó szoftver kiértékelő felülete

A fröccsöntési folyamathoz MOL Petrolkémia Zrt. Tipplen H145F típusú PP alapanyagát használtam. A mérés során alábbi fröccsöntési paramétereket alkalmaztam:

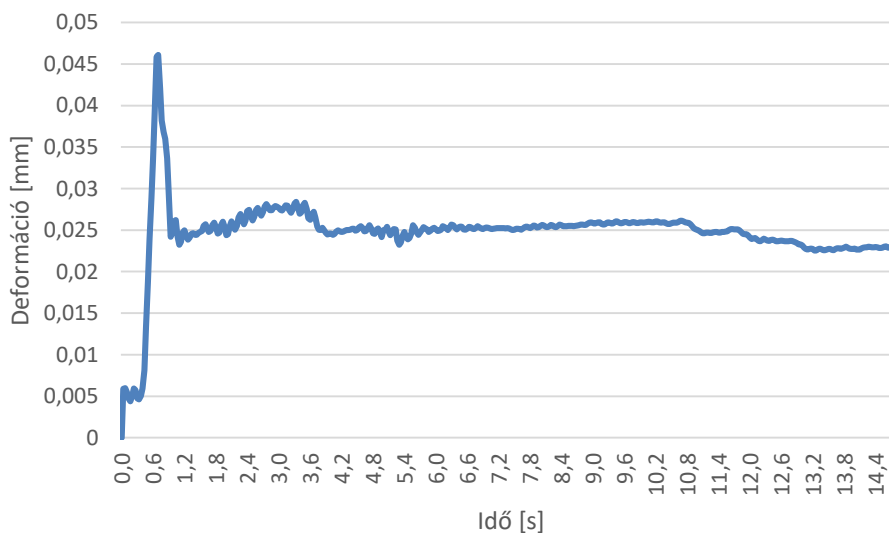
- Fröccssebesség: 40-80-100 cm<sup>3</sup>/s
- Ömledékhőmérséklet: 200 °C
- Fröccsnyomás: 600 bar

A felvételek kiértékelése után az adatokat exportáltam, így a görbéket meg tudtam tekinteni Excelben. Minden geometria esetén három mérést végeztem, és ezek átlagértékeit vettem figyelembe. Egy ilyen példát mutat a 28. ábra.



**28. ábra** ABS alapanyag, 6 mm átmérőjű kör, 100 cm<sup>3</sup>/s befröccsöntési sebesség

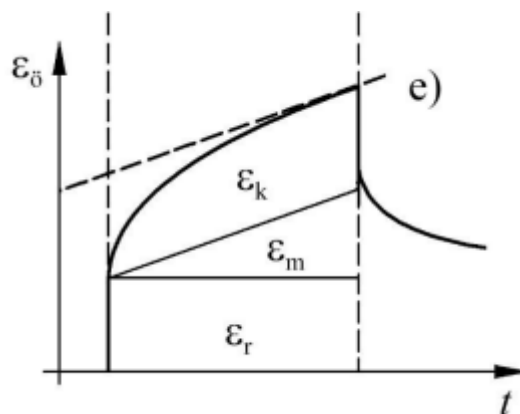
Az eredményen látszik, hogy kissé zajos. Ennek az az oka, hogy a felvétel során a kamera közel volt a fröccsöntő géphez, így annak mozgása során kissé rezgette az állványt, így nem tudott teljesen egyenes maradni a felvételek készítése során. Ezt egy mozgó átlagos simítással csökkentettem, hogy az eredmények jobban összehasonlítható legyen a szimulációkból kapott eredményekkel. Ez a 29. ábrán látható.



**29. ábra** ABS alapanyag, 6mm átmérőjű kör, 100 cm<sup>3</sup>/s befröccsöntési sebesség

Ez a diagram három szakaszra osztható, és meglehetősen hasonlít a Burgers-modell feszültséggerjesztésre adott válaszfüggvényre, mint ahogy ez a 30. ábrán is látható.





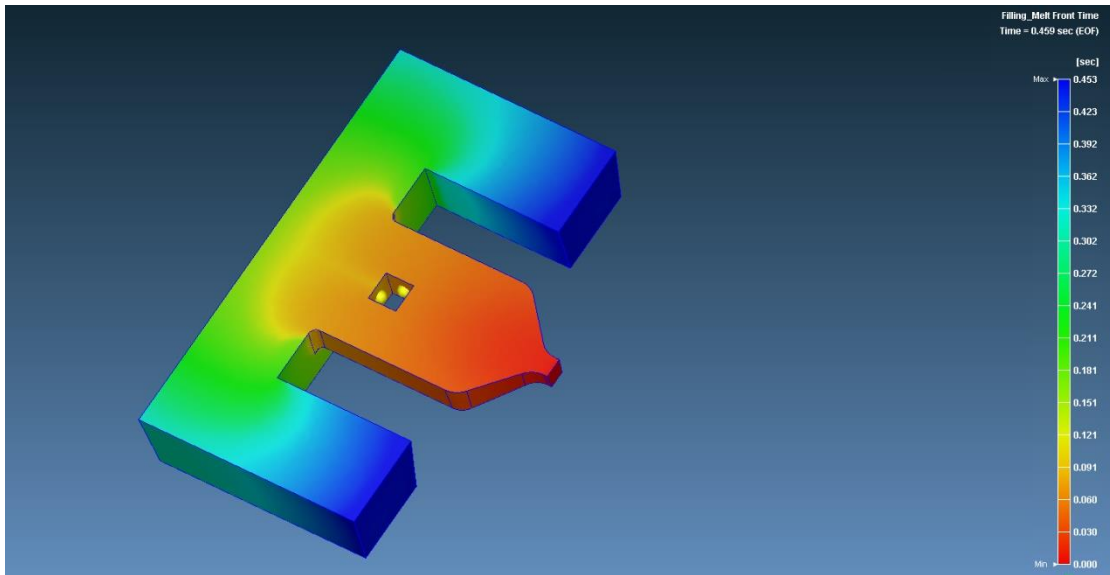
30. ábra Burgers-modell válasza feszültséggerjesztésre [16]

Ennek oka, hogy itt is egy ugrásszerű feszültség éri az inzertet a befröccsöntési folyamat során, de a valóságban ez egy bonyolultabb folyamat, mivel nagy szerepet játszanak a termikus hatások, illetve az ömledék fagyása.

A mérések során a Polyjet technológiával készült felvételek kiértékelése nagyon pontatlan volt, néhol egyáltalán nem is sikerült. Ennek oka abban keresendő, hogy sötétkék színnél lettek kinyomtatva az inzertek. Mivel a DIC-hoz tartozó szoftver fekete-fehér színnel jeleníti meg az elkészített felvételt, ezért az inzert beleolvadt a környezetébe. Ennek hatására a szoftver nem tudta megkülönböztetni a deformációt végző területet a környezetétől, így nem tudta számolni a deformációt. Ebből az a levonható tanulság, hogy egy ilyen apróság is, mint az inzert színe, nagy szerepet játszhat a kiértékelés során.

#### 4.5. Numerikus szimulációk

Az inzertek deformációjának vizsgálatához létrehoztam az inzertek és a szerszámbetét 3D modelljeit. Ezt Autodesk Inventor segítségével készítettem el. Következő lépésként a fröccsöntés során létrejövő erőket Moldex3D segítségével számítottam ki. Első lépésként importáltam a szerszám modelljeit. Ezt behálóztam, 0,3 mm-es elemnagyságot használva, tetraéder hálóval. Megadtam az alapanyagok tulajdonságait az inzertek és a fröccsöntéshez használt polimerek esetén is. A fröccsöntési paramétereket úgy állítottam be, hogy megegyezzenek a fizikai mérések során használt beállításokkal. Ezek a 40, 80 illetve 100 cm<sup>3</sup>/s befröccsöntési sebesség, 200 °C ömledékhőmérséklet, 23 °C-os inzerthőmérséklet a kezdeti pillanatban. Az inzertek ömledékkel érintkező felületein probe-okat helyeztem el, ezek segítségével nyomon lehetett követni az inzert felületeire ható nyomást az egyes időlépésekben. A 31. ábrán egy négyzet keresztmetszetű inzert szimulációja látható, az inzertek felületénél elhelyezett probe-okkal.

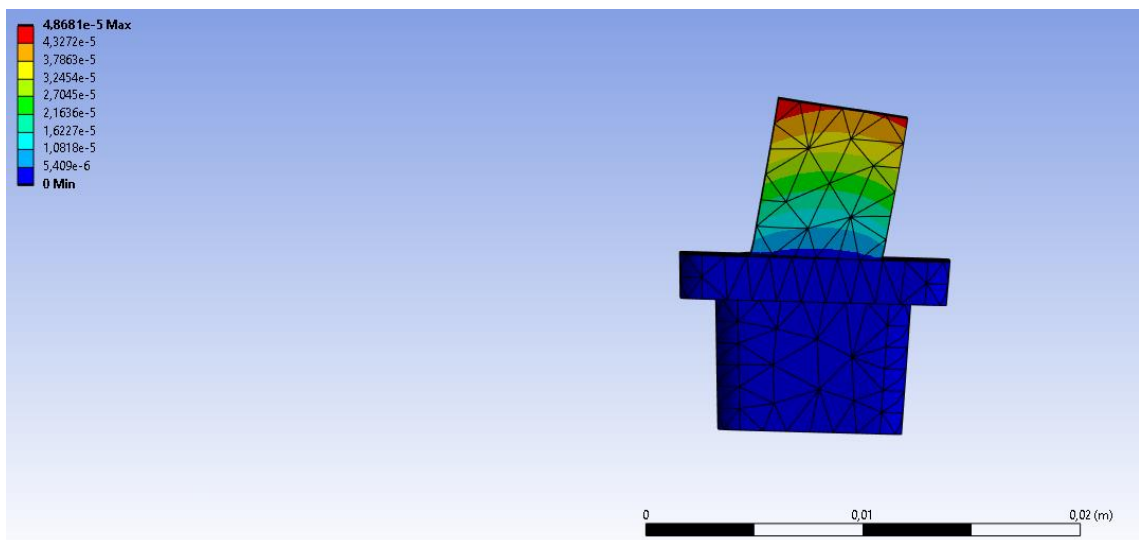


**31. ábra** Fröccsöntési szimuláció

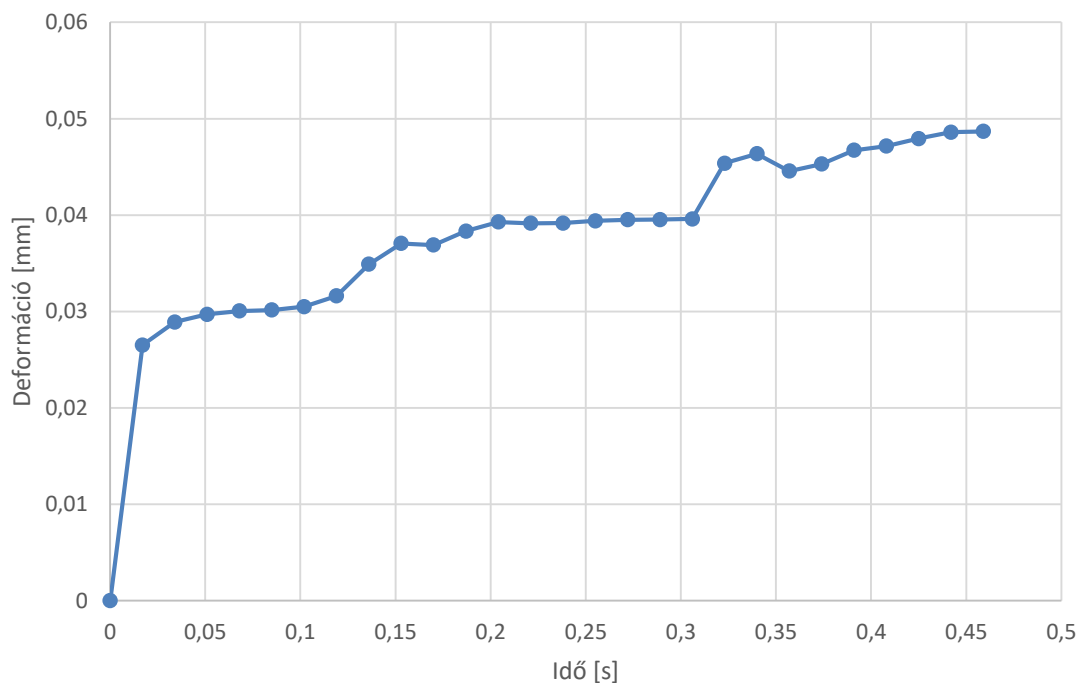
Mivel az inzertek nagyobb részt fémből készülnek, a deformációjuk a fröccsöntési ciklus során elhanyagolhatóan kicsi. Ennek megfelelően nincsen lehetőség deformációt számolni Moldex3D-ben, ezért ennek meghatározásához áttértem ANSYS 2022 R1-re.

Az Ansys-szal történő szimuláció első lépéseként importáltam az inzertek modelljeit STP formátumban. Ezután behálóztam 3D elemek segítségével, 0,2 mm-es elem nagyságot használva. Beállítottam az alapanyagok tulajdonságait is, amit a pontos eredmények érdekében a DSC és a DMA mérések alapján, hőmérsékletfüggőre állítottam be.

A számítások sorát egy tranziens termikus szimulációval kezdtem. Erre azért van szükség, mivel az ömledék és az inzert között konvektív hőátadás történik. Ehhez megadtam a kezdőhőmérsékletet (23 °C), illetve a véghőmérsékletet (200 °C), illetve a hőátadási tényezőt (0,3 w/m<sup>2</sup>K). Így eredményként megkaptam az inzert hőmérsékletének eloszlását az egyes időpillanatokban. Következő lépésként egy statikus terheléses szimulációt futtattam. Itt hívtam segítségül a Moldex3D-ben kiszámított terheléseket. Jelen esetben ezeket időfüggő, felületre ható nyomásterhelésként használtam fel az inzert megfelelő felületein. A 32., illetve 33. ábra tartalmazza egy 6 mm-es négyzet keresztmetszetű inzert, 100 cm<sup>3</sup>/s befroccsöntési sebesség során keletkező deformációit, illetve Excellel történt kiértékelését.

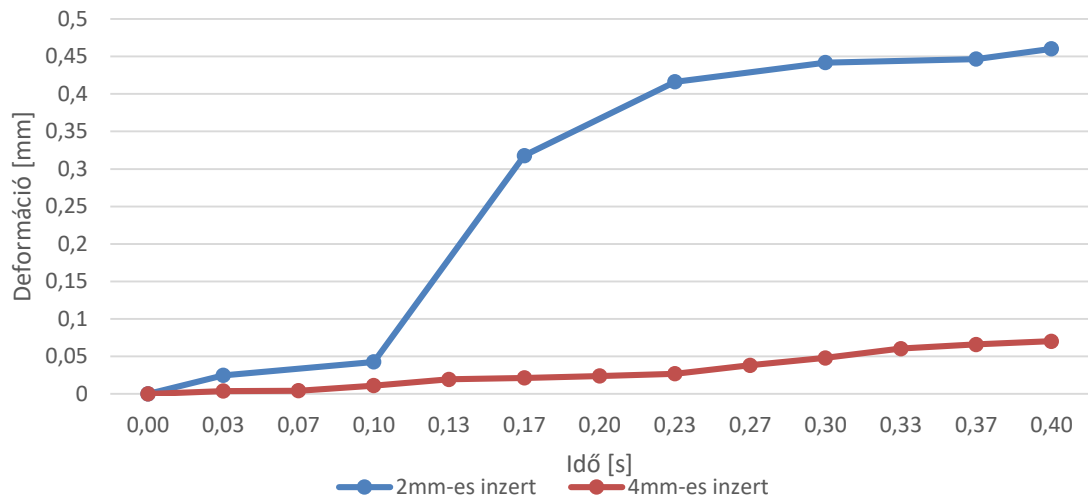


32. ábra ABS inwert Ansys szimulációjának eredményei



33. ábra ABS inwert Ansys szimulációjának eredményei grafikusán ábrázolva

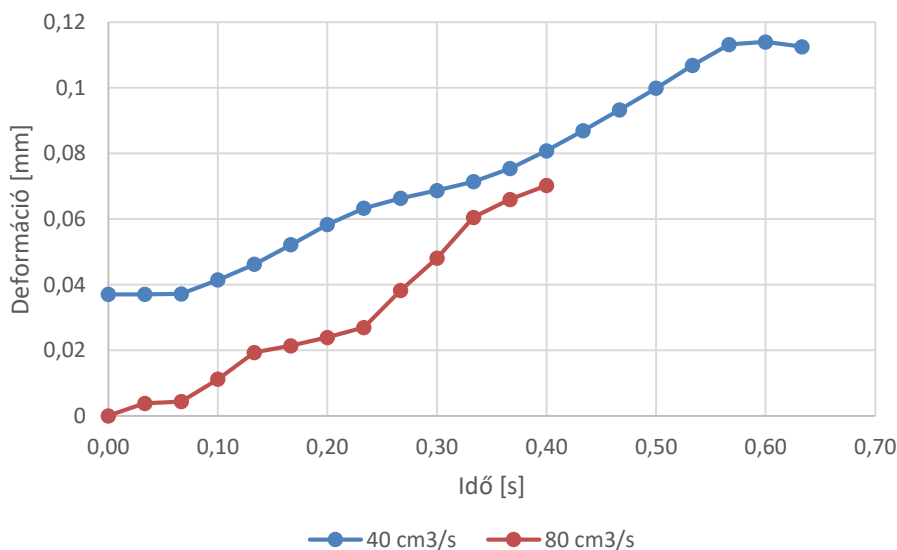
A következőkben ABS alapanyagból, FDM technológiával készült inwertek viselkedését fogom összehasonlítani különböző szempontokból. Először a különböző méretű (2, illetve 4 mm-es), négyzet keresztmetszetű inwerteket fogom összehasonlítani, 80 cm<sup>3</sup>/s befroccsöntési sebesség esetén. Az egész folyamat helyet csak a kitöltési szakaszt ábrázoltam, ugyanis ez tartalmazza a lényeges információkat, mint például a maximális deformáció. Ezt tartalmazza a 31 ábra.



**34. ábra** ABS inwertek viselkedésének összehasonlítása 80cm<sup>3</sup>/s fröccsöntési sebesség esetén

A grafikonok alapján elmondható az, hogy a 2 mm oldalhosszúságú inwert deformációja egy nagyságrenddel nagyobb, mint a 4 mm-es inwerté. Ennek oka az, hogy nagyobb felülettel találkozik az ömledék a fröccsöntés során, így nagyobb nyomások keletkeznek a felületen, így megnő a deformáció.

A befroccsöntési sebesség hatása is vizsgálható a mért adatok alapján. Egy ilyen összehasonlítást tartalmaz a 32. ábra, 4mm-es inwertek esetén.

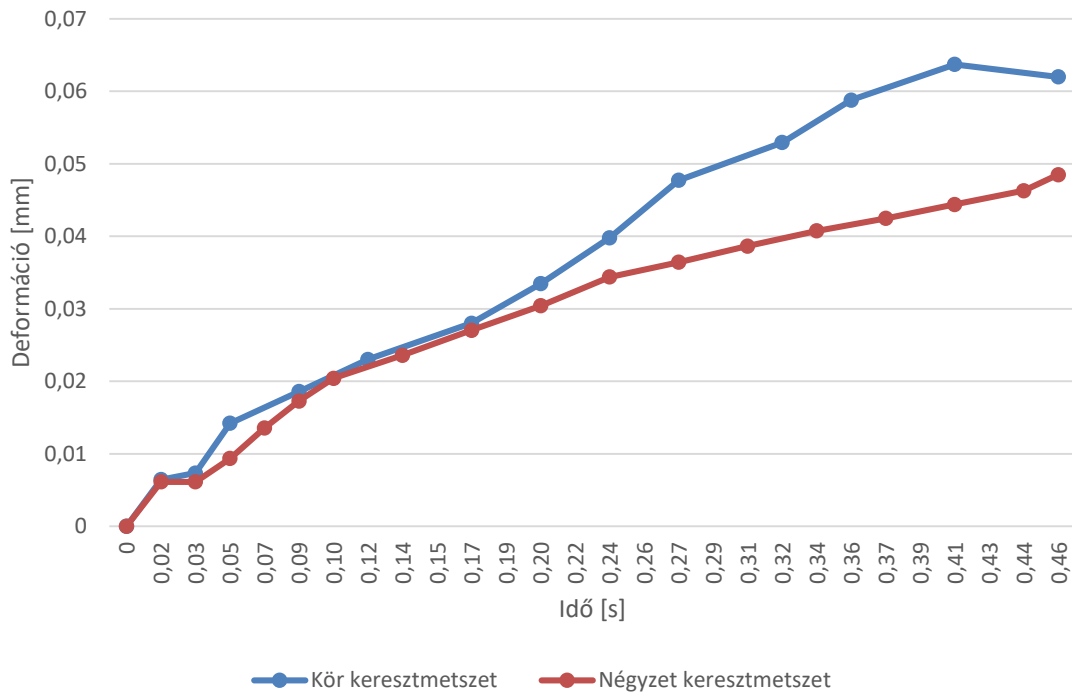


**35. ábra** 4 mm-es inwertek deformációja különböző befroccsöntési sebesség esetén

Az ábrán az látható, hogy a nagyobb befroccsöntési sebességhez tartozik a kisebb deformáció. Ennek alapvetően két magyarázata lehet. Az egyik az, hogy ahogy az ábrán látszik, az alacsonyabb befroccsöntési sebességhez hosszabb kitöltési idő tartozik. Ez egyrészt azt jelenti, hogy az ömledék által kifejtett erőhatás hosszabb időn át terheli. Egy másik, talán még fontosabb oka az, hogy ezalatt az idő alatt az ömledék tovább melegíti az inwertet, és a hőmérséklet

emelkedésével csökken a rugalmassági modulus, így nagyobb deformációk jöhetnek létre.

Érdeemes megvizsgálni azt is, hogy a különböző geometriák milyen hatással vannak a deformáció nagyságára. A 32. ábrán azonos jellemző méretű, kör és négyzet keresztmetszetű inzertek deformációit mutatom be.



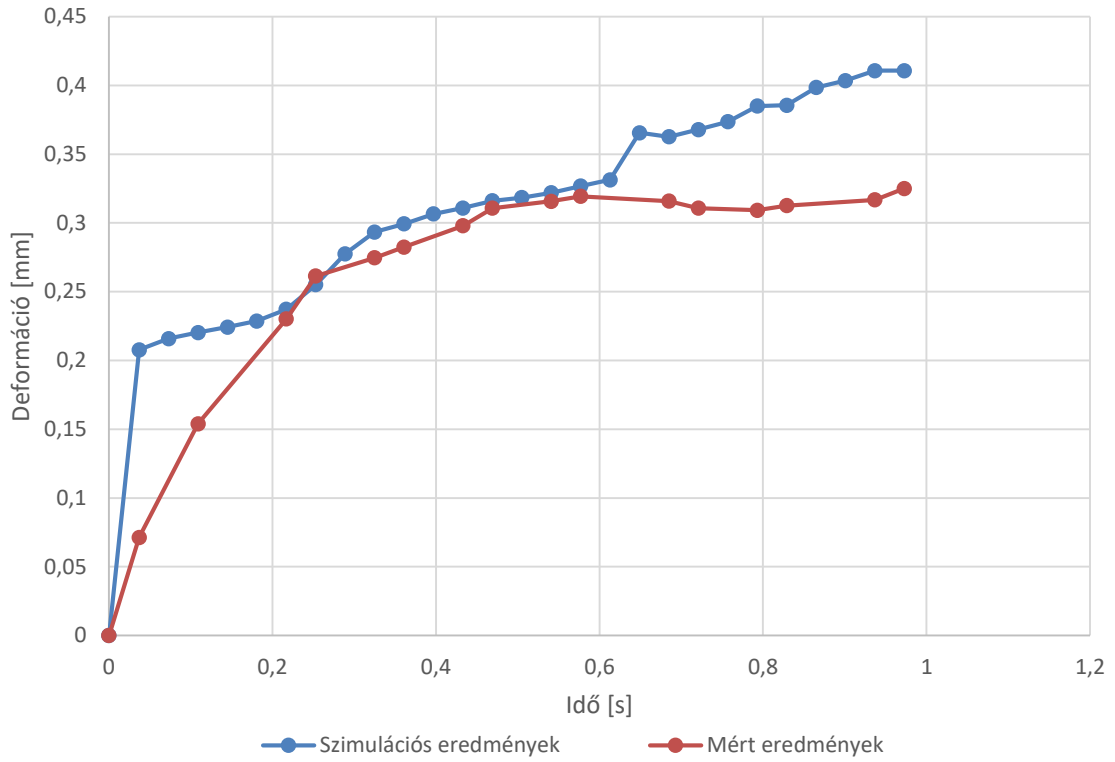
**36. ábra 6mm-es kör és négyzet keresztmetszetű ABS inzertek deformációi 100 cm<sup>3</sup>/s befroccsöntési sebesség esetén**

A mérés során a kör keresztmetszetű inzert némileg több deformációt szenved el. Ennek egyik lehetséges okát abban látom, hogy a kör keresztmetszetű inzerteknek kisebb a keresztmetszete. Ennek okán jobban fel tud melegedni az ömledék által, és a termikus hatások jobban előtérbe kerülnek, ezáltal megnő a deformációja is.

#### 4.6. Eredmények összehasonlítása

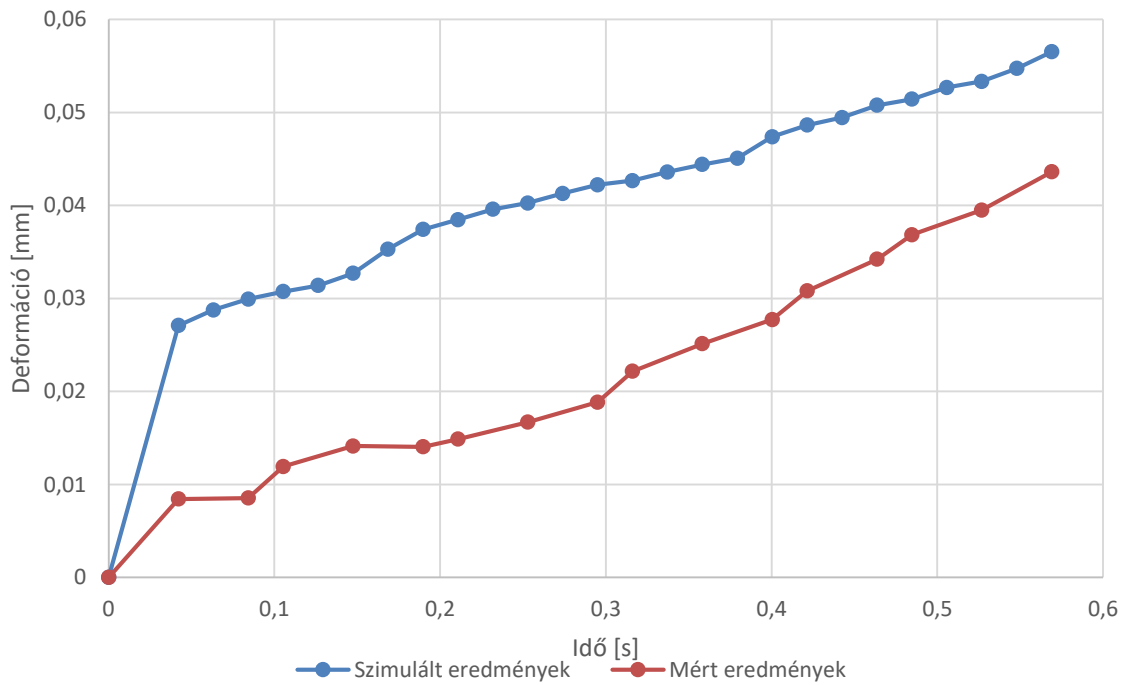
A következőkben össze fogom hasonlítani néhány általam végzett fizikai mérés eredményét a szimuláció eredményeivel. Ennek során a fizikai mérések görbéit csak a befroccsöntés kezdetétől fogom vizsgálni. Ennek oka az, hogy a szimuláció során a keletkező feszültséget a csak a kiegészítő szakaszból lehet exportálni, a hűtésből már nem, így csak egy sokkal rövidebb szakaszból áll rendelkezésre információ. A következőkben bemutatom az egyes geometriák során kiszámolt eredményeket, majd összehasonlítom őket.

Elsőként a 2 mm oldalhosszú, négyzet keresztmetszetű inzert, illetve 40 cm<sup>3</sup>/s befroccsöntési sebesség eredményeit hasonlítom össze. Ezt tartalmazza a 37. ábra. A fizikai méréseket és a szimulációkat közös diagramon ábrázoltam.



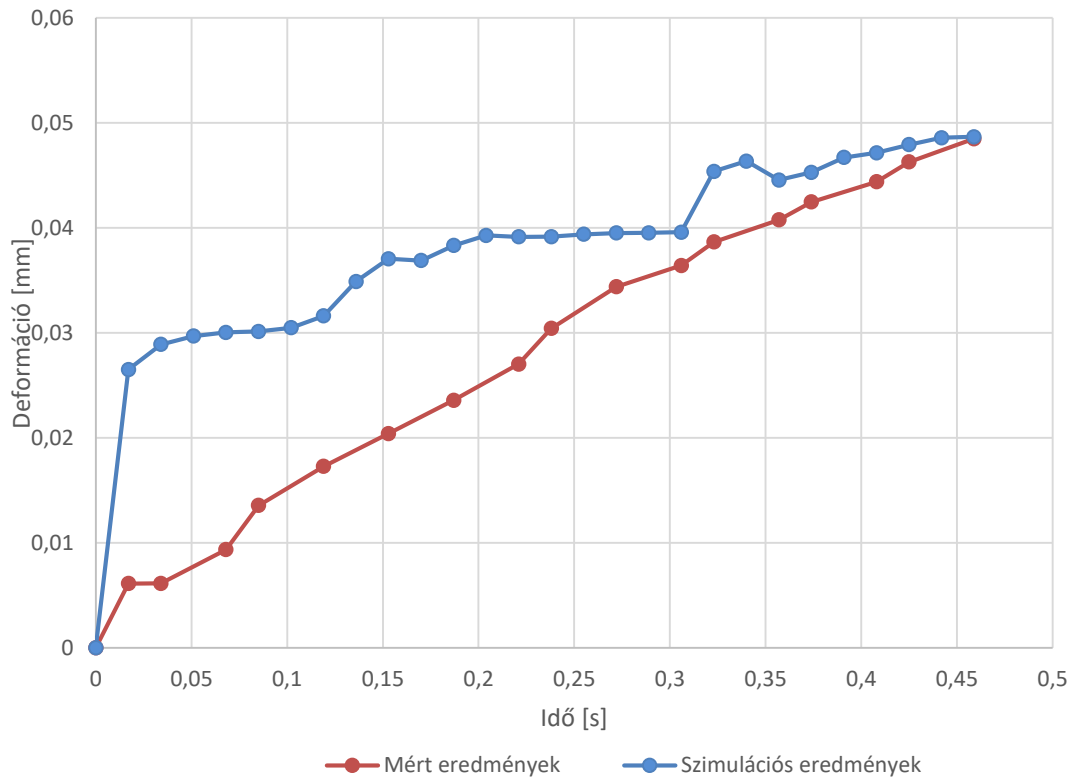
37. ábra 2 mm-es négyzet ABS inzert deformációgörbéi

A 4 mm-es négyzet inzert,  $80 \text{ cm}^3/\text{s}$  befroccsöntési sebességű vizsgálatot a 38. ábra mutatja.



38. ábra 4mm-es ABS inzert deformációgörbéi

A 6 mm-es négyzet, 100 cm<sup>3</sup>/s fröccsöntési sebesség esetén a deformációgörbéket a 39. ábra mutatja



39. ábra 6mm-es inzert deformációgörbéi

A méréseket összefoglalva elmondható, hogy a szimulált eredmények jellege helyesen követik a fizikai mérések eredményeit. Az eltérések néhol a maximális deformációban találhatóak. Ennek több oka lehet. Az egyik az, hogy a méréseim során keletkező zaj simításához használt mozgó átlagos módszer ugyan valóban csökkenti a zajt, de ezáltal a maximális deformációt is csökkenti valamelyest. Az eltérések kereshetőek az inzertek gyártástechnológiájában is. Mivel rétegekből épül fel, ezért tulajdonságai anizotropok. A szimuláció során használt anyagmodellek is nagyban befolyásolhatják az eredményeket, mivel kis eltérés is nagy hatással lenne az Ansys segítségével végzett számításokra.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkám során először a fröccsöntéssel kapcsolatos irodalomkutatást végeztem, különös tekintettel a szerszámok tervezésére, a szerszámokra ható igénybevételekre. Ezen kívül kutattam a különböző additív gyártástechnológiával készült alkatrészek modellezési lehetőségeit.

A dolgozatom során bemutattam a fröccsöntési folyamat során létrejövő inzertdeformációk vizsgálatát, és azoknak lehetséges modellezési lehetőségeit.

Első lépésként a hőmérsékletfüggő anyagtulajdonságok meghatározása volt a feladatom. Ezt a 3D nyomtatás alapanyagából készített próbatestek segítségével végeztem el, DMA és DSC vizsgálatok során. Ezen eredményekre később, a numerikus szimulációk során volt szükség.

Ezután következtek a fizikai vizsgálatok. Az általam tervezett szerszámot egy üveg oldalfalú szerszámba helyeztünk. A nekik kialakított helyekre behelyeztem az az additív technológiával nyomtatott próbatesteket, és kívülről, egy fényképezőgép segítségével felvettem a fröccsöntési folyamatot. Ezt később a DIC berendezés feldolgozó szoftvere segítségével elemeztem.

A numerikus szimulációkat tekintve először fröccsöntési szimulációkat végeztem Moldex 3D program segítségével. Itt a megfelelő geometriájú inzerteket behelyeztem az ömledék áramlási terébe, így a szimuláció lefutása során ébredő feszültségeket exportálni tudtam. Ezután következett az ANSYS 2023 program alkalmazása. Itt csatolva egy tranziens termikus, és egy statikus terheléses vizsgálatot futtattam. A termikus analízis során az ömledék és az inzert közötti hőátadást szimuláltam, a statikus terheléses vizsgálatnál pedig a deformációkat tudtam kalkulálni. Ez utóbbinál volt fontos a Moldex-el számolt feszültségek, ezt beimportálva ugyanis nagyságrendileg helyes deformáció értékeket tudtam számolni.

Mindent összefoglalva elmondható, hogy sikerült a fröccsöntési folyamat során létrejövő inzertdeformációkat szimulálni. Ez kicsit körülményes, mivel két különböző programot kell összehangolni a működés érdekében. Az eredmények ugyan nem teljesen pontosak, ezek a különbségek fakadhatnak a fizikai mérések során tapasztalt zajból, vagy az anyagmodell pontatlanságából, mivel az ANSYS nagyon érzékeny arra.



## 6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. Dunai Antal, M.L., Műanyagok Fröccsöntése. 2003, Budapest: Lexica Kft.
2. Gábor, K.J., Fröccsöntött termékek tervezése és szimulációja, PhD értekezés, in Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép szerkezet-tani Intézet. 2007.
3. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Polimertechnika Tanszék: Fröccsöntés című laborsegédlet. 2019.
4. Czvikovszky, T., P. Nagy, and J. Gaal, A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000. **132**: p. 453.
5. Kristiawan, R.B., et al., A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. Open Engineering, 2021. **11**(1): p. 639-649.
6. Allum, J., et al., Interlayer bonding has bulk-material strength in extrusion additive manufacturing: New understanding of anisotropy. Additive Manufacturing, 2020. **34**: p. 101297.
7. Ko, Y.S., et al., Improving the filament weld-strength of fused filament fabrication products through improved interdiffusion. Additive Manufacturing, 2019. **29**: p. 100815.
8. Kazmer, D.O., Injection Mold Design Engineering. Second edition ed. 2016, Hanser.
9. Kazmer, D., Shrinkage and warpage, injection mold design engineering second Edition. Materials & Design, 2016: p. 291-325.
10. Kovács, J.G., et al., Thermal simulations and measurements for rapid tool inserts in injection molding applications. Applied Thermal Engineering, 2015. **85**: p. 44-51.
11. Kennedy, P. and R. Zheng, Flow analysis of injection molds. 2013: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
12. Chen, Y.-C., et al., Core deflection in plastics injection molding: direct measurement, flow visualization and 3D simulation. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2011. **50**(9): p. 863-872.
13. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=162&l=m> (2023.11.02)
14. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=77&l=m> (2023.11.02)
15. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=136&l=m> (2023.11.02)
16. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=193&l=m> (2023.11.02)
17. Hajagos Sz.: Fröccsöntő szerszám inzeretek numerikus modellezése, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2021).
18. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Polimertechnika Tanszék: Kúszás című laborsegédlet (2014).