



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

SZÉPLAKI PÉTER
DIPLOMATERV
FRÖCCSÖNTŐ SZERSZÁM INZERTEK IGÉNYBEVÉTELÉNEK
VIZSGÁLATA

Témavezető:

Dr. Zink Béla

adjunktus

Konzulens:

Dr. Szabó Ferenc

adjunktus

BUDAPEST, 2022



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gépészmérnöki Kar

Polimertechnika Tanszék

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

DIPLOMAMUNKA-FELADAT

NYILVÁNOS

AZONOSÍTÁS	Név: Széplaki Péter		Azonosító: 73111792916	
	Képzéskód:	2N-MG0	Specializáció kódja:	Feladatkiírás azonosítója:
	Szak:	Gépészmérnöki mesterképzési szak	2N-MG0-PT	GEPT:2023-1:2N-MG0:FKML8Y
	Diplomamunka-feladatot kiadó tanszék:		Zárávizsgát szervező tanszék:	
	Polimertechnika Tanszék		Polimertechnika Tanszék	
Témavezető: Dr. Zink Béla (78340382973), adjunktus				

FELADAT	Cím	Fröccsöntő szerszám inzerterek igénybevételének vizsgálata Investigation of injection mold inserts
	Részletes feladatok	1. Végezzen irodalomkutatást a fröccsöntés, a fröccsöntő szerszámok és az additív gyártási technológiák témakörében. Mutassa be a fröccsöntési technológia során fellépő mechanikai igénybevételeket, főképp a fröccsöntő szerszám és az inzerterdeformációk kiváltó okait ismertesse. Részletesen térjen ki a nemzetközi irodalmakban fellelhető, a mérések során használt megoldások geometriai kialakításaira, az elvégzett kutatási munkák előnyeire és hátrányaira. 2. Tervezzen és additív gyártási eljárással gyártson olyan szerszáminzertereket, amelyekkel vizsgálhatók az inzerterekre ható igénybevételek fröccsöntés közben. Vizsgálja meg az eltérő gyártási paraméterek és technológiai beállítások hatását. 3. Szerelje be a betéteket a szerszámba és végezzen méréseket a szerszámmal. 4. Értékelje ki a mérési eredményeket, vonja le az eredményekből a következtetéseket és tegyen továbbfejlesztési javaslatot.
	Hely	A diplomamunka-készítés helye: BME Polimertechnika Tanszék 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3 Konzulens: Dr. Szabó Ferenc, adjunktus

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

HITELESÍTÉS	Feladat kiadása: 2022. szeptember 5.		Beadási határidő: 2022. december 9.	
	Összeállította: Dr. Zink Béla (78340382973) témavezető		Ellenőrizte: Dr. Bárány Tamás s.k. tanszékvezető	Jóváhagyta: Dr. Györke Gábor s.k. dékánhelyettes
	Alulírott, a feladatkiírás átvételével egyúttal kijelentem, hogy a Diplomamunka-készítés c. tantárgy előkövetelményeit maradéktalanul teljesítettem. Tudomásul veszem, hogy jogosulatlan tantárgyfelvétel esetén a jelen feladatkiírás hatálytalan. Széplaki Péter			

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

Ez a diplomaterv 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: 2022.12.15.

témavezető

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, Széplaki Péter (FKML8Y), 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, 2022.12.15

szigorló hallgató

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dr. Zink Bélának és Dr. Szabó Ferencnek, akik mindenben segítségemre voltak, bármiről volt szó, és lehetőséget adtak, hogy ez a dolgozat megszülethessen. Emellett szeretnék köszönetet mondani Bartók Dávidnak és Krizsma Szabolcsnak a fröccsöntőgép használatában és a mérésekben való segédkezésért. Emellett szeretném megköszönni a Polimertechnika Tanszéknek, hogy biztosították a helyet, az eszközöket és az alapanyagokat a mérések elvégzéséhez.

Ezen kívül hálával tartozom a szüleimnek és testvéremnek, akik támogattak és bátorítottak, nem csak a dolgozat megírása közben, hanem az élet minden területén. A szakdolgozatot a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA (FK 134336) pályázata támogatta.

TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás	vi
Jelölések jegyzéke.....	ix
1. Bevezetés	2
2. Szakirodalmi áttekintés	4
2.1. Fröccsöntés.....	4
2.1.1. <i>A fröccsöntőgép felépítése</i>	4
2.1.2. <i>A fröccsöntési ciklus mechanikai folyamatai</i>	5
2.1.3. <i>A fröccsöntési ciklus leírása p-T és p-t diagrammok segítségével</i>	6
2.2. Fröccsöntő szerszámok	8
2.2.1. <i>Szerkezeti felépítés</i>	9
2.2.2. <i>Fröccsöntő szerszámok mechanikai igénybevételei</i>	11
2.3. Additív gyártástechnológia, PolyJet technológia.....	15
2.3.1. <i>Az additív gyártástechnológia alapjai</i>	15
2.3.2. <i>PolyJet technológia</i>	16
2.4. Polimer inzertek.....	17
2.4.1. <i>Inzertekre ható erőhatások</i>	18
2.4.2. <i>Polimer inzertek deformációja</i>	21
2.5. Irodalmi összefoglalás és kritikai elemzés	22
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések	23
3.1. Felhasznált alapanyagok	23
3.1.1. <i>Fröccsöntési alapanyag</i>	23
3.1.2. <i>Inzertek alapanyaga</i>	23
3.2. Alkalmazott feldolgozó berendezések	24
3.2.1. <i>Fröccsöntőgép és szerszám</i>	24
3.2.2. <i>Objet 30 Pro</i>	25
3.3. Alkalmazott vizsgálati eszközök.....	26
3.3.1. <i>iPhone 13 Pro Max</i>	26
3.3.2. <i>Mercury Monet DIC</i>	26
3.3.3. <i>Fényképezőgép és objektív</i>	27
3.3.4. <i>Mérő számítógép</i>	27
3.3.5. <i>Adatgyűjtő egység</i>	28
3.3.6. <i>Nyúlásmérő bélyeg</i>	28
3.3.7. <i>Zwick-Z005-ös szakítógép</i>	28

4. Kísérleti/fejlesztési rész.....	30
4.1. Inzertek geometria kialakításai	30
4.2. Mérési módszer meghatározása.....	30
4.2.1. <i>Optimális felvevő eszköz meghatározása</i>	31
4.3. Kézi kiértékelés.....	33
4.3.1. <i>Inzert magasságának hatása a deformációra</i>	34
4.3.2. <i>Inzert keresztmetszetének hatása</i>	37
4.4. Mérés kiértékelés DIC felhasználásával.....	42
4.4.1. <i>Erőmérés a fröccsöntési ciklus közben</i>	46
4.4.2. <i>Mérés felépítése</i>	50
4.4.3. <i>Mérési eredmények kiértékelése</i>	51
4.4.4. <i>Nyúlásmérő szenzorok kalibrációja</i>	54
5. ÖSSZEFOGLALÁS	58
5.1. Magyar nyelvű összefoglaló	58
5.2. Idegen nyelvű összefoglaló.....	59
6. Felhasznált források	60

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
f	biztonsági tényező (fear factor)	-
p	nyomás (pressure)	bar
E	rugalmassági módolás (elastic modulus)	MPa
F	erő (force)	N
I	másodrendű nyomaték (second moment of inertia)	m ⁴
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 ³
T	hőmérséklet (temperature)	°C
T _g	üvegesedési átmenet hőmérséklet (glass transition temperature)	°C
T _m	kristályolvadási hőmérséklet (crystallization temperature)	°C
V	térfogat (volume)	m ³
V	nyíró erő (shear force)	N

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
α	lineáris hőtágulási együttható (linear thermal expansion)	1/K
γ	nyíró deformáció (shear strain)	-
$\delta_{\text{nyomó}}$	alakváltozás (deformation)	mm
μ	Poisson-tényező (Poisson's ratio)	-
ν	fajtérfogat (specific volume)	cm ³ /g
π	az anyagra jellemző nyomáskorrekciós állandó (materials specific pressure correction constant)	MPa
σ_D	kifáradási határ (fatigue volume)	MPa
σ_e	folyáshatár (yield stress)	Mpa
$\sigma_{\text{határ}}$	határfeszültség (yield stress)	MPa
σ_{Mises}	von Mises feszültség (von Mises stress)	MPa
τ	csúsztató feszültség (shear stress)	MPa
ω	a makromolekula saját térfogatát figyelembe vevő korrekciós állandó (the correction constant for the macromolecule's own volume)	cm ³ /g

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
3D-s	háromdimenziós (three dimensional)
CAD	Számítógéppel segített tervezés (Computer-Aided Design)
DIC	Digitális képkorreláció (Digital Image Correlation)
FDM	ömlédékrétegezéses technológia (Fused Deposition Modeling)
FPS	képkocka per másodperc (Frame per second)
LOM	rétegelt termékgyártás (Laminated Object Manufacturing)
PP	polipropilén (polypropylene)
RPT	gyors Prototípusgyártás (Rapid Prototyping)
SLA	sztereolitográfia (stereolithographic)
SLS	szelektív lézerszinterezés (selective laser sintering)
UV	ultraibolya sugárzás (Ultraviolet light)

1. BEVEZETÉS

Korunk egyik legfontosabb kérdése a fosszilis energiaforrások limitációjából adódóan, hogy a rendelkezésre álló alapanyagokat a lehető legjobb hatásfokkal használjuk, illetve, hogy ezeket a termékeket a felhasználásuk után újrahasznosíthassuk, és ne kelljen teljesen új termékeket gyártani. Ma már szinte minden iparágat érint ez a kérdés, és minden esetben újabb és újabb ötletekkel állnak elő a gyártók.

Legtöbb esetben egyszerű ledarálásról és újrafelhasználásról van szó, ami jól is működik, mint erőforrás csökkentő eljárás, azonban vannak olyan iparágak, például az autóipar, ahol a biztonságtechnikai előírások korlátozzák a felhasználható újrahasznosított alapanyag arányát. Emellett vannak olyan esetek, ahol az újrafelhasználhatóságot erősen korlátozza, hogy az adott termékbe erősítőszálak, erősítő anyagok vannak beépítve, amelyek szétválasztása olyan költséges és nehezen kivitelezhető lenne a cégek számára, hogy ezen esetekben a gyártók nem is próbálkoznak meg ezzel és az adott leselejtezett termék teljesen kiesik a feldolgozási körből, aminek köszönhetően lehetséges életútjának már az elején ipari hulladék lesz belőle. Ez talán a legrosszabb eshetőség és erre a problémára keresem a megoldást a diplomamunkámban.

A polimerek erősítését legtöbb esetben fém inzertekkel oldják meg, aminek köszönhetően a gyártandó termékek mechanikai tulajdonságai nagy mértékben nőnek, azonban mivel két teljesen eltérő anyaggal kell ilyenkor dolgozni, selejtezés után a korábban említett okok miatt a termékek nehezen újrahasznosíthatóak. Erre jelentene megoldást, ha az erősítő részek is egy adott termékben polimerből készülnének, legideálisabb esetben pedig ugyanabból az anyagból, mint amivel fröccsöntünk például egy adott terméket. Ennek a korlátját korábban az jelentette, hogy mivel két azonos alapanyaggal dolgozunk, az erősítő anyag szilárdsági tulajdonságai is megegyeznek.

Ezt a problémát hidalhatja át az additív gyártástechnológia előretörése. Abban az esetben, ha az inzerteket ezzel a technológiával állítják elő, meg lehet oldani például ömledékrétegezéses módszer (Fused deposition modeling, FDM) segítségével, hogy az adott terméket a gyártási technológiából adódóan, a terhelésre és a geometriára méretezzük a gyártási paraméterek, irányok beállításával, aminek köszönhetően egy anizotróp rendszert hozhatunk létre, és ennek köszönhetően egy inzert nélküli rendszernél jobb mechanikai tulajdonsággal rendelkező terméket kapunk.

Diplomamunkám során célom, hogy megvizsgáljam azokat az erőhatásokat és gyártási viszonyokat, amelyeket egy ilyen előre legyártott inzertnek ki kell bírnia egy gyártási ciklus közben. Ez kritikus kérdés a termék szempontjából, mivel míg egy fém inzert esetében egy 200-300 °C-os hőmérséklet nem okoz problémát, addig egy szintén polimerből készült anyag esetében a kihajlás, deformáció, kritikus esetben a törés

komolyan figyelendő tényező. További célom, hogy megvizsgáljam a gyártási pontosság milyen mértékben befolyásolja az adott termék geometriáját.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

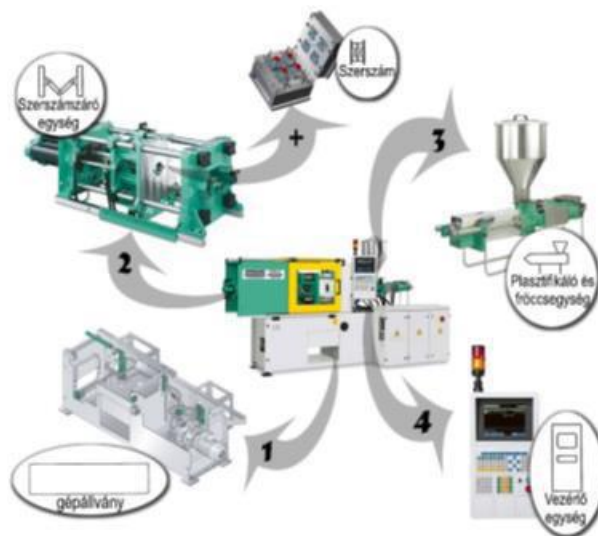
Ebben a fejezetben bemutatom a diplomamunkám témájához szorosan kapcsolódó, már korábban végzett kutatási eredményeket, és ez alapján meghatározom a dolgozatom célját.

2.1. Fröccsöntés

A polimertechnológia egyik leghatékonyabb és legkisebb ciklusidővel dolgozó termékelőállítási módja a fröccsöntés. Mindezt annak ellenére mondhatjuk el, hogy több másik módszerrel ellentétben, egy szakaszos technológiáról beszélhetünk. Ahhoz azonban, hogy megfelelő hatásfokkal és minőséggel lehessen gyártani, rengeteg paramétert kell megfelelően beállítani [1].

2.1.1. A fröccsöntőgép felépítése

Bár a fröccsöntés egy nagyon hatékony és jól működő technológia, a megfelelő működéséhez rengeteg folyamatot és állandót kell helyesen beállítani. Ez abból is adódik, hogy a fröccsöntőgép egy több elemből álló szerkezet, ami jól látható az 1. ábra is [2].



1. ábra A fröccsöntő gép felépítése: (1. gépállvány; 2. szerszámzóró egység; 3. plasztifikáló és fröccsnyelő egység; 4. vezérlőegység; + szerszám) [2]

A legnagyobb elem a gépállvány, amelynek feladata, hogy az egyes részeket egységbe fogja és a hatékony működést biztosítja, valamint rezgécscillapító funkciója is van. Az első egység, amit a gépállványra felszerelhetnek az a szerszámzóró egység. Ennek az elemnek már komplexebb feladata van, elsődlegesen biztosítani kell a megfelelő nyitást és zárást minden ciklus elején és végén, az éppen felszerelt szerszám

számára, másrészt fel kell építeni a záróerőket is a ciklus alatt, ami megakadályozza, hogy a nagy nyomással belőtt polimer ömledék ki tudjon a két szerszámfél között jutni a gyártási térből. A korábban említett szerszámnál ki kell emelni, hogy bár a minden esetben a záróegységre van felszerelve, nem része a fröccsöntőgépnek, mivel egy géphez nem csak egy féle szerszám tartozik, több különböző is felszerelhető egy adott darabra, azonban rendkívül fontos elem, mivel ez határozza meg a termék alakját és ennek is nagyon fontos feladata van abban, hogy megfelelő minőségű termék hagyja el a gépet a ciklus végén [1-5].

A plasztifikáló feladata, hogy a polimer alapanyagot megömlessze, megfelelő hőmérsékletre hozza, majd a gyártási ciklus megfelelő szakaszában azt a megfelelő nyomással a szerszámba juttassa. A legnagyobb különbséget az extrúzióznál használt csigához képest az jelenti, hogy a fröccsöntésnél használt darab nem csak forgómozgást, hanem axiális előre és hátramozgást is végez, annak érdekében, hogy a megfelelő nyomással jusson a szerszámba az ömledék [1-3].

Természetesen egy ilyen nagy nyomásokkal lejátszódó folyamat esetén komoly problémát jelenthet az ömledék visszafele áramlása a kisebb nyomású zónák felé. Ennek kiküszöbölésére a fröccsöntő gépekbe megtalálható egy visszaáramlás gátló, amely feladata, hogy ezt a visszaáramlást megakadályozza amíg a csigacsúcs előtt nagyobb nyomás van, mint mögötte [5].

Az utolsó elem, amelyet megtalálhatunk a gépállványon a vezérlőegység, aminek feladata, hogy összehangolja többi elem mozgását annak érdekében, hogy megfelelően működjön a fröccsöntőgép. Ennél az elemnél lehet állítani az egyes gyártási paramétereket, meghatározni a mozgási tartományokat és időket, valamint itt lehet gyorsan közbeavatkozni, amennyiben valami nem megfelelően működik [1-3].

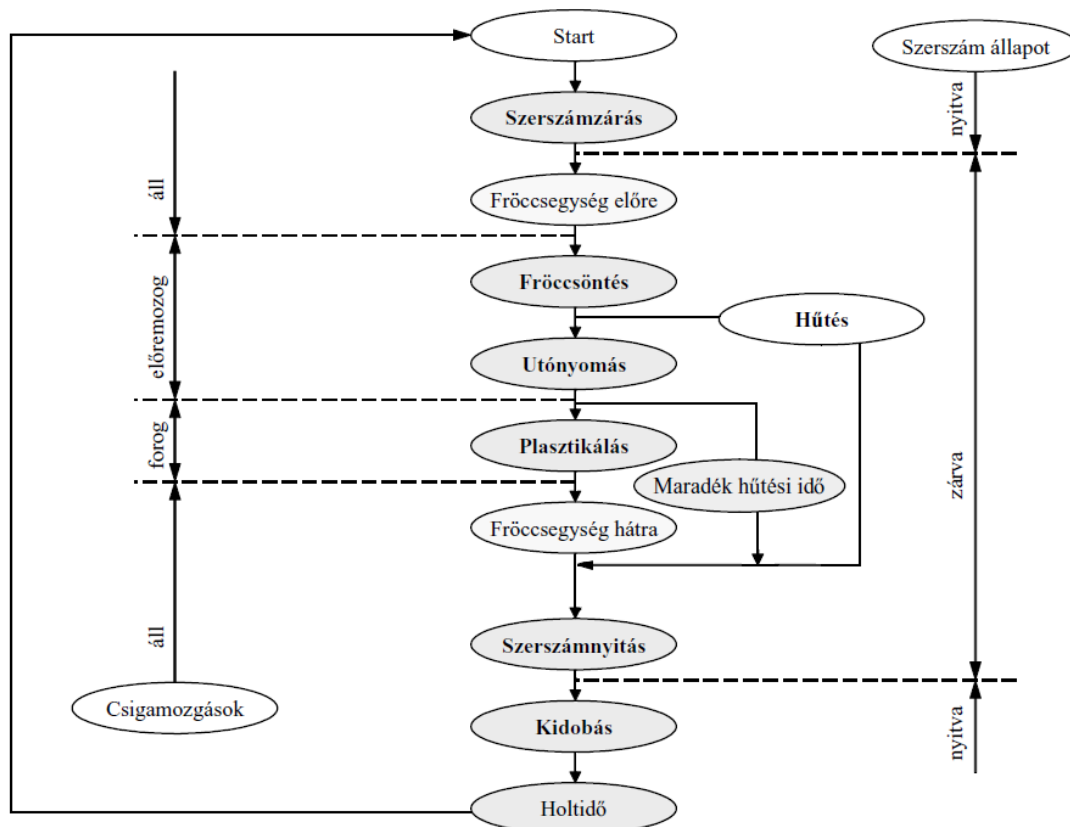
2.1.2. A fröccsöntési ciklus mechanikai folyamatai

A fröccsöntési ciklus ahogy már az előző fejezetben is leírtam, egy több elem együttes mozgásából kialakuló gyártási folyamat. Ezeknek a mozgásoknak összehangolva, egy jól meghatározott sorrendben, megfelelő ideig kell követniük egymást, különben vagy a termék minősége, vagy a gyártási idő nem lesz megfelelő.

A folyamat maga rengeteg almozgásból valósul meg, amelynek a folyamatábrája a 2. ábrán látható. A ciklus legelső mozzanata a szerszám zárása, amely során a két szerszámfél összezár, majd a szerszámmzáró egység felépíti a megfelelő záróerőt, ami megakadályozza, hogy a ciklus során kijusson a gyártási térből a polimer ömledék a két fél között. Ha ez megvan, a fröccsegység előre mozog, amelynek az elejében már rendelkezésre áll az előző ciklus során plasztifikált polimer ömledék. Amikor a két rész csatlakozik egymáshoz, a csiga axiálisan előre mozog, és nagy nyomással bejuttatja az ömledéket a szerszámüregbe [1-3].

Annak érdekében, hogy a termék pontos méretekkel legyen legyártva, figyelembe kell venni, hogy a polimerek a hőmérséklet csökkenésével arányosan hajlamosak a

fajterfogat csökkenésére. Ennek kiküszöbölésére utónyomást kell beiktatni a ciklusba, amely során befroccsöntéshez képest jelentősen kisebb sebességen további anyag jut be a szerszámba, ezzel kompenzálva a zsugorodási folyamatot. Ezzel párhuzamosan, az utónyomás mellett elkezdődik az adott termék hűtése is, ami az utónyomás végével sem fejeződik be. Amíg ez a hűtési ciklus zajlik, a következő ciklusra készülve egy plasztifikálási folyamat is zajlik, ahol a csiga egyrészt forgó mozgást végez, ezzel anyagot juttatva a fröccsegység elejébe, másrészt axiálisan mozog hátrafelé, mivel így maga elé tudja halmozni a következő termék gyártásához megömlesztett alapanyagot. Amikor a következő ciklushoz elengedő anyagot sikeresen megömlesztette a gép, a fröccsegység hátra mozog, ezzel is csökkentve a hőátadást a szerszám felé. Utolsó lépésként a szerszámzáró egység kinyit és megtörténik a kidobás. Ekkor visszajutottunk a kezdeti állapotba és a folyamat megismétlődhet előlről [1-5].

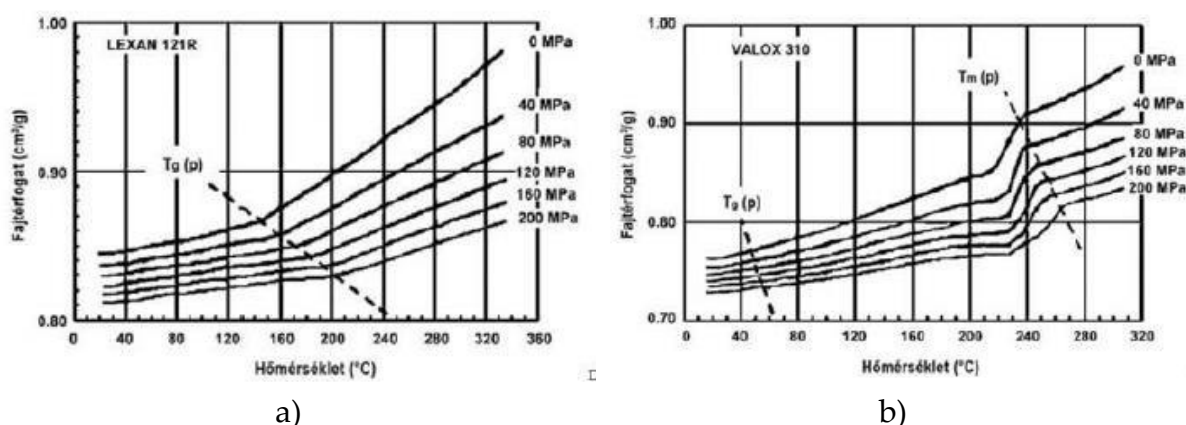


2. ábra A fröccsöntés folyamatábrája [2]

2.1.3. A fröccsöntési ciklus leírása $p-v$ és $p-t$ diagrammok segítségével

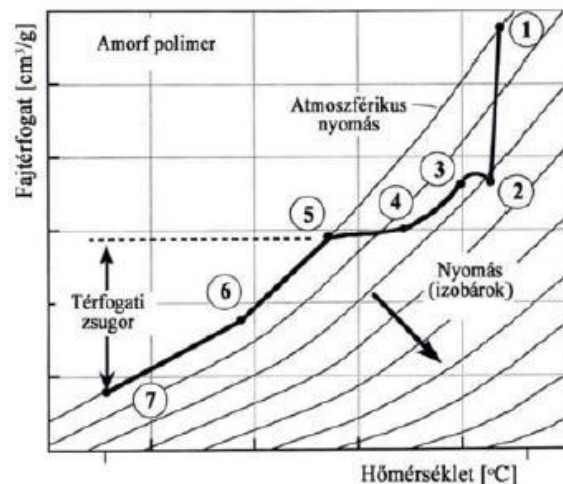
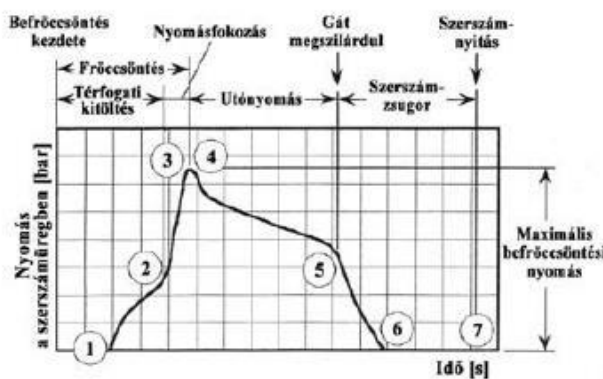
A megfelelő termék minőség eléréséhez elengedhetetlen, hogy mindig a megfelelő reológiai állapotban legyen az alapanyag az egyes ciklus elemek során. Ezt nagyban segíti elérni, ha nem csak a mechanikai folyamatok, hanem az állapothatározók szempontjából is megvizsgáljuk az egész gyártást.

A vizsgált állapotváltozók jelen esetben a nyomás (p), a fajtérfogat (v) és a hőmérséklet (T). Ha ezt a három jellemzőt egy diagramban ábrázolják, lényeges tulajdonságokat olvashatunk le az alapanyagról. Ezek közé tartoznak az izobár vonalak, amelyek görbületeiből megállapítható, hogy részben kristályos, vagy amorf polimer alapanyagról van e szó. Ha amorf szerkezetű anyagról beszélünk, aminek egy sematikus ábrája látható a 3/a ábrán, egyszerűen megállapítható az üvegesedési hőmérséklet (T_g) a nyomás és fajtérfogat függvényében. Részben kristályos anyagok esetében, a p - v - T diagram segítségével nem csak üvegesedési, hanem a kristályolvadási hőmérséklet (T_m) is beazonosítható, ahogy az a 3/b ábrán is látható [1-3].



3. ábra Sematikus p - v - T diagramm: a) amorf polimer;
b) részben kristályos polimer esetén [5]

Amennyiben egy ilyen típusú diagramban ábrázolják a fröccsöntés folyamatait, jól látható, hogy egyes részeknél miképpen alakulnak az egyes állapotváltozók, ahogy az a 4/a ábrán is látható. Az 1. és 2. pont között történik a befröccsöntés, amely során egy közel állandó hőmérsékletéről beszélhetünk és egy jelentős nyomásnövekedésről, valamint drasztikusan csökken a fajtérfogat. Ezután a mechanikából adódó átkapcsolás következik a 2. és 3. pont között, ahol azonos fajtérfogat mellett egy nem kívánatos, de elkerülhetetlen hőmérséklet és nyomásesés következik be. Miután a gép átkapcsolt, következik az utónyomás szakasza, amikor megfigyelhető egy nagyobb fajtérfogat és hőmérsékletcsökkenés közel izobár körülmények mellett. A 4-5 pont között látható a maradék hűtés folyamata, amely során jelentősen esik a hőmérséklet és a nyomás, míg a fajtérfogat közel állandó marad. Utolsó elemként az 5-6-7 pontok között történik a kidobás, az 5-6 szakasznál, 6-7 között pedig a termék további, már szabad levegős hűtése történik [1-5].



a)

b)

4. ábra A fröccsöntési folyamat elemei a) p(bar)-t(s);
b) p-v-T diagramon [5]

Ugyanezek a lépések nyomon követhetőek, egy egyszerű p-t diagrammon is, ahogy az a 4./a ábrán látható, és amennyiben ezt a két diagrammot összevetik, ellenőrizni lehet, mennyire hatékonyak az egyes szakaszok a fröccsöntési ciklus során. Természetesen az analitikus megközelítés is létezik az állapotváltozók meghatározására, amelyek közül a legismertebb a Spencer és Gilmore által felvázolt [6] egyenlet (1):

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

ahol p hidrosztatikus nyomás, π anyag nyomáskorrekciós állandója, v fajtérfogat, ω a makromolekula térfogatát figyelembe vevő korrekciós tényező, R az egyetemes gázállandó, T az abszolút hőmérséklet M pedig a polimerlánc monomer-egységének móltömege [1-3, 6].

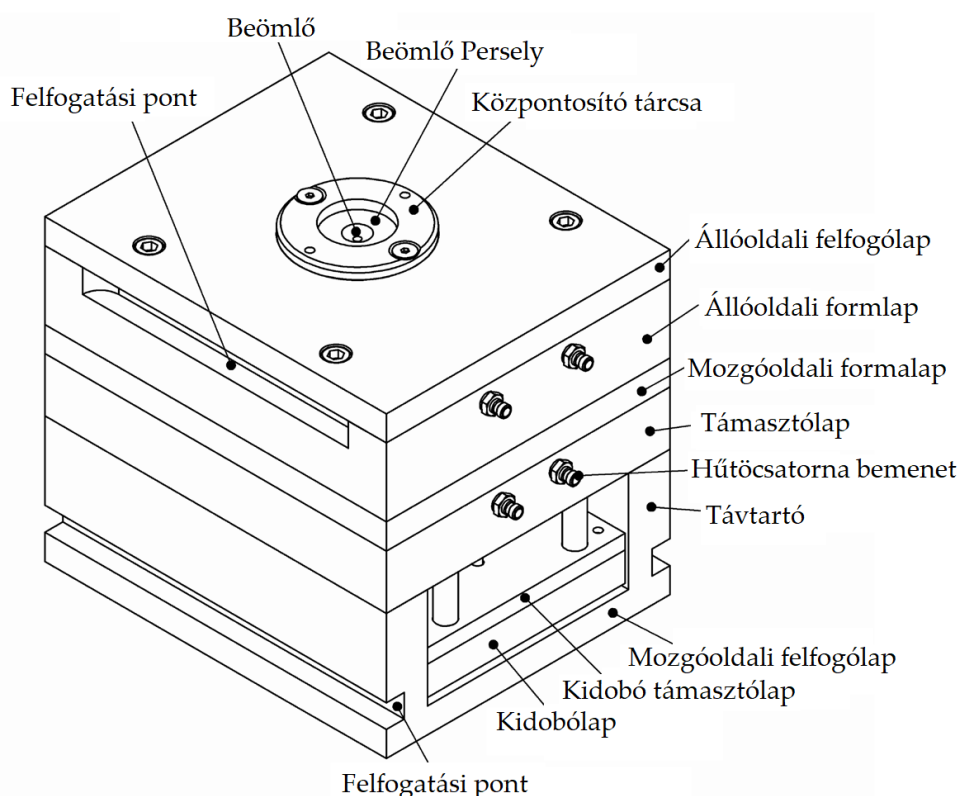
2.2. Fröccsöntő szerszámok

A fröccsöntő szerszámok igen összetett és rengeteg elemből összeálló komplex szerkezetek, amelyek segítségével szinte bármilyen geometriájú és felhasználhatóságú terméket lehet gyártani nagy mennyiségben, igen rövid idő alatt. A szerszámok elsődleges célja, hogy a gyártási ciklus folyamán az ömledéket bent tartsa a formaüregben, ezzel meghatározva a termék alakját. Emellett egy fröccsöntő szerszámnak el kell tudnia vezetnie a keletkezett hőt és kontrollált körülmények között le kell tudnia hűteni a gyártmányt a lehető legrövidebb idő alatt. Ezek mellett pedig természetesen biztosítani kell, hogy a terméket sérülés nélkül el lehessen távolítani a szerszámból a ciklus lejárta után [7].

2.2.1. Szerkezeti felépítés

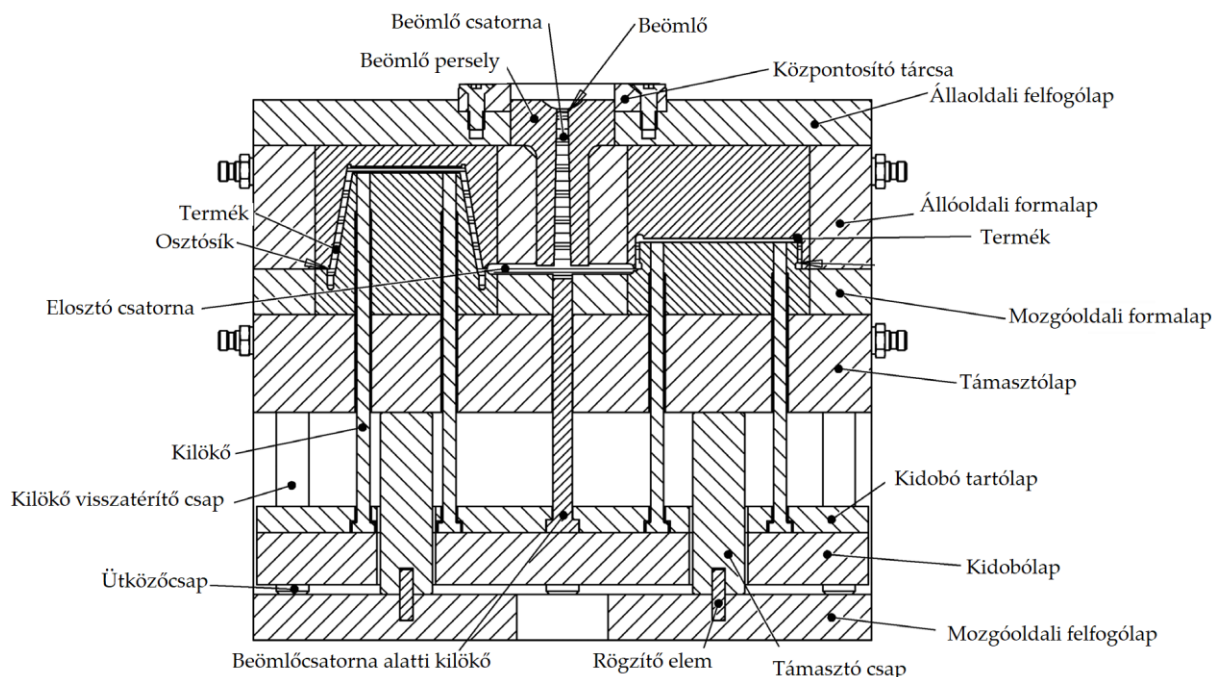
A fröccsöntő szerszám ahhoz, hogy megfelelően el tudja látni a korábban említett feladatokat rengeteg különböző elemből és alkatrészből épül fel. Rengeteg féle szerszámkonstrukciót lehet megtalálni az iparban, a legáltalánosabb és legegyszerűbb a két lapos hidegcsatornás kialakítás. Egy ilyen konstrukciót ábrázol a 5. ábra. Egy ilyen szerszám több különböző lapból áll össze, amelyeket belső kulcsnyílású csavarok tartanak egybe. Az első ilyen lap az álló oldal felől nézve az állóoldal felfogó lapja, amelynek az a funkciója, hogy a szerszámnak az álló oldali felét a fröccsöntő gépre tudják rögzíteni [7].

Ezután következik az állóoldali formalap és abban sokszor megtalálható formabetét, legtöbb esetben a csésze oldal, majd következik a mozgó oldali formalap és formabetét, a mag oldallal, amely kialakítás azért így terjedt el az iparban, mert ebben az esetben a termék a megoldalra zsugorodik, aminek köszönhetően könnyebben eltávolítható a termék. Ezután egy támasztólap található, bár ez nem minden konstrukció esetén szükséges, majd pedig a kidobó rendszer lapjai. A kidobótartó lap feladata, hogy a helyén tartsa az egyes kilököket, valamint ezzel pozícionálja őket, a kidobólap pedig annak érdekében van a szerszámban, hogy együtt mozogjon az egész kidobórendszer és megtámassza azt. Ahhoz, hogy a kidobó rendszernek legyen helye mozogni, távtartó léceket szoktak elhelyezni a szerszámokban. Az utolsó lap pedig a mozgó oldali felfogólap, ami ahogy az állóoldali társa, a gépre való felrögzítésben segít [7].



5. ábra Zárt fröccsöntő szerszám és részei [7]

Az 5. ábra látható központosító tárcsa feladata, hogy összeillessze a szerszámot a fröccsöntő géppel, hogy a fröccsegység pontosan rá tudjon zárni a szerszámmra. Mind a két oldalon megtalálható egy ilyen tárcsa, a mozgó oldal esetén ez felel azért is, hogy a szerszám kidobó rendszere párhuzamosítva legyen a fröccsöntő egység kidobó mechanizmusához és probléma nélkül el lehessen távolítani a kész terméket a szerszámból [7]. Egy hasonló kétlapos hidegcsatornás fröccsöntő szerszám metszeti képet mutatja be a 6. ábra, amelyen további elemek is remekül megfigyelhetők.



6. ábra Kétlapos hidegcsatornás szerszám metszeti képe [7]

Az ábrán jelölt osztósík az, ahol a két szerszámfél szét tud nyílni, ezzel biztosítva a termék eltávolíthatóságát. Ilyenkor előre mozdul a kilőkőlap, ami tolja magával a kilőkőket, amelyek lelökik a magoldalról az arra zsugorodott terméket. Annak érdekében, hogy a vékony kidobókat megvédjék az esetleges sérülésektől, deformációktól, ha a kidobás után nem húzódik vissza a kilőkőrendszer, visszatérítő csapokat szoktak elhelyezni a szerszámokban. Ezek hosszabb, vastagabb elemek, amelyek kibírják a kilőkőkkel ellentétben, ha felütközik rájuk a másik szerszámfél és így nem sérül a szerszám [7].

Az iparban a kétfészkés konstrukciók, amelyeket az 5. és 6. ábra is bemutat kevésbé elterjedtek már. Manapság vagy több, négy, nyolc vagy még több fészek található egy szerszámban, hogy még nagyobb darabszámmal tudjanak gyártani és optimalizálni tudják a költségeket. Ezek mellett természetesen például nagy méretű termékek esetén továbbra is jelen vannak az egy - kétfészkés szerszámok is [7].

Az szerszámokat csoportosíthatjuk a fészek száma mellett az ömledékcsatorna típusa szerint. Ez lehet klasszikus hidegcsatornás, amelynél a termékkel együtt távolítják el kilökésnél a beömlő és elosztócsatornát. Ezt bizonyos esetekben egy három lapos szerszámmal párosítják, aminek köszönhetően a termék és a csatorna

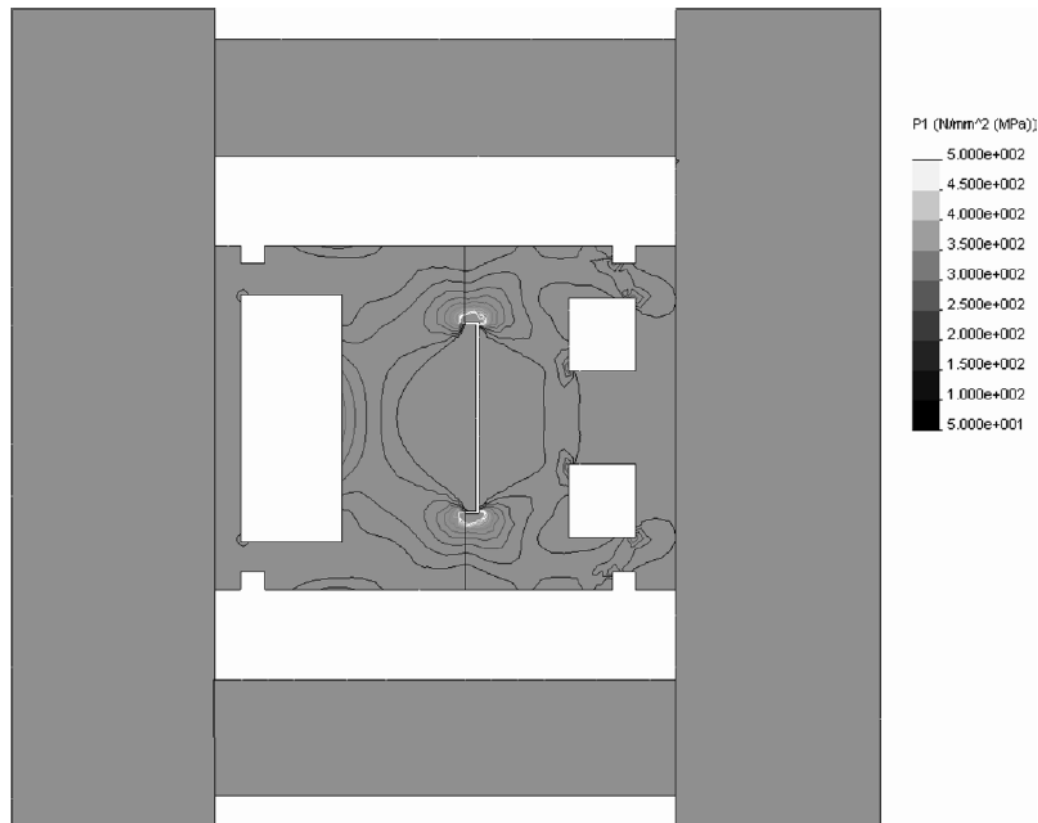
szétválasztva távozik a szerszámból. Megtalálható még szigetelt csatornás konstrukció, aminek az esetében az ömledécsatornában gyártás közben nem szilárdul meg az anyag, mivel azt egy szigetelő réteg veszi körül. Harmadik elterjedt kialakítás a forrócsatornás verzió, amelynél szintén ömledék állapotban marad a polimer az elosztóban és a beömlőben is. Ezt ebben az esetben egy elektromos fűtőberendezés biztosítja.

Vannak ezek mellett további szerszámtípusok, ilyen például a család szerszámok, amelyek lényege, hogy bár több fészkesek, az egyes fészkekben különböző termékeket gyártanak, általában összetartozó elemeket, amelyeket később egy külön lépésben illesztenek vagy szerelnek össze. Másik ilyen szerszámcsoport a kockaszerszámok, amelyek lényege, hogy a szerszám két oldalára is fröccsöntenek, a másik két oldalról pedig a kidobást oldják meg. Ezek mellett pedig meg lehet még említeni az etázs szerszámokat, amelyeknek a különlegessége, hogy több különböző osztósíkan történik a fröccsöntés [7].

2.2.2. Fröccsöntő szerszámok mechanikai igénybevételei

Általánosságban elmondható, hogy a szerszámtervezők olyan szerkezeti kialakítást kívánnak biztosítani a szerszám számára, amely nem törik el a fáradás miatt a sok fröccsöntési ciklus során, nem deformálódik túlzottan terhelés alatt, és kompakt és kis költségű [7].

A feszültség állapota jelentősen eltér a szerszám mozgó és álló oldala között. A legtöbb szerszám esetében az szerszámbetéteket közvetlenül az állóoldali felfogólap és az állólemez támasztja alá. Így az szerszámbetétek általában tisztán összenyomott állapotban vannak, így nagyon kevés síkból való kihajlás történik. A mozgó oldalon ezzel ellentétben azonban nem telje mértékű alátámasztás, mivel a két távtartó lécz között lévő üregnél, ahol a kidobószerkezet helyezkedik el, ez nem valósul meg. Ennek eredményeképpen a szerszámbetét és a formalapok ezt a terhelést nyíró és nyomófeszültségek formájában szenvedik el, aminek következtében fent áll a deformáció veszélye, a szerkezet meg tud hajolni [7]. A Von Mises feszültség eloszlást mutatja be egy forrócsatornás szerszám esetén a 7. ábra.



7. ábra Von Mises feszültség eloszlás fröccsöntés közben [7]

Ez a Von Mises feszültség sokszor egy általánosan használt érték a szerszám teherbírásának és tönkremenetelének a becslésére, amelyet az alábbi módon szoktak meghatározni (2):

$$\sigma_{Von\ Mises} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} < \sigma_{határérték}, \quad (2)$$

ahol σ_1 és σ_2 első- és másodrendű feszültségek MPa-ban kifejezve, $\sigma_{határérték}$ pedig a megengedett maximális feszültség. Ezt az értéket általában az határozza meg, hogy az deformálja a fém alkatrészeket, mivel azok megfeszülnek. A deformáció leírására a feszültség függvényében az alábbi összefüggést lehet felírni (3):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (3)$$

ahol ε a deformáció százalékos értékben kifejezve, σ a szerszámot ért feszültség MPa-ban, E pedig a rugalmassági modulus szintén MPa-ban. Minden szerszámot úgy kell megtervezni, hogy a folyáshatárnál kisebb feszültséggel működjön. A folyási feszültséget a határfeszültséghez viszonyító biztonsági tényező meghatározására kétféle megközelítés létezik. Az egyik megközelítés az, hogy a határfeszültséget egyszerűen a folyáshatárfeszültséggel egyenlővé tesszük, de a terhelési állapot tekintetében egy alacsonyabb értéket feltételeznek. Ennek értelmében előzetes szimulációkat és számításokat futtatnak, hogy megvizsgálják a szerszámot ért terhelés mértéke megközelíti-e ezt a folyáshatárt. A másik felfogás szerint pedig egyszerűen egy biztonsági tényezőt alkalmaznak, amely segítségével a maximális határfeszültséget az alábbi módon számítják ki (4):

$$\sigma_{\text{határérték}} = \frac{\sigma_{\text{folyáshatár}}}{f}, \quad (4)$$

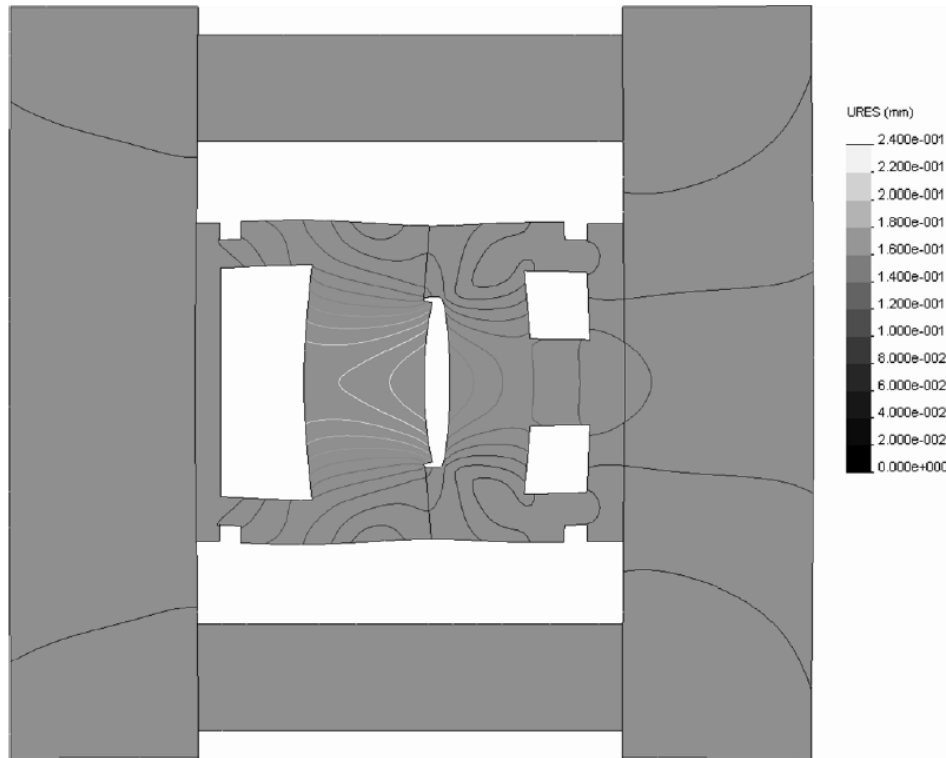
ahol f a biztonsági tényező, $\sigma_{\text{folyáshatár}}$ pedig az adott anyagra vonatkoztatott folyáshatár MPa-ban kifejezve. A biztonsági tényező általában 1,5 és 6 között szokott elhelyezkedni [7].

Természetesen egy fröccsöntő szerszám nem csak egy alkalommal van használva, több millió termék gyártására alkalmas életciklussal kell rendelkeznie. Ebből következően a kifáradás is egy komoly problémát tud jelenteni, amire szintén figyelni kell egy fröccsöntő szerszám esetében. Szerencsére a kifáradás jelensége egy igen sokat vizsgált jelenség és a szerszámokhoz használt szerszámacélok esetében igen széles adatbázis áll rendelkezésre, hogy milyen terheléseket engedhetnek meg ennek elkerülésére. Éppen ezért összefoglalva, a határfeszültséget aszerint határozzák meg, hogy a szerszám működése során a folyással vagy a fáradással kapcsolatos problémák dominálnak-e (5):

$$\sigma_{\text{határérték}} = \min\left(\frac{\sigma_{\text{folyáshatár}}}{f}, \sigma_D\right), \quad (5)$$

ahol σ_D a kifáradási határ MPa-ban. Ha a szerszámot alacsony számú formázási ciklusra kell tervezni, akkor a határfeszültséget a folyáshatárra lehet beállítani, és biztonsági tényezővel vagy a legrosszabb eset forgatókönyvével lehet tervezni. Ha a szerszámot nagy számú formázási ciklusra kell üzemeltetni, akkor a határfeszültségként a kifáradási határra kell méretezni [7].

Ezek mellett kiemelt fontosságú az alakváltozás mértéke is egy fröccsöntő szerszám esetében. A 8. ábra sematikusan bemutatja egy fröccsöntő szerszám alakváltozását egy ciklus során felskálázva. Ennek a deformáció az oka, hogy a formabetétek deformálódnak a nagy hajlító igénybevételnek köszönhetően, így sorjázódás következik be. Ez a probléma egy idő után olyan méreteket ölthet, hogy már a tőrésmezőből is kieshetnek a szerszám alkatrészei. Ezek a deformációk természetesen nem csak a formalapok esetén jelentkeznek, azonban a többi elem esetén ezek egy nagyságrenddel kisebbek [7].



8. ábra Felskálázott deformációja egy fröccsöntő szerszámnak egy ciklus során [7]

Amennyiben a szerszámlap teljesen alá van támasztva, abban az esetben a nyomó igénybevétel a fő terhelés, amelyre méretezni kell, ami egy eloszló terhelésként az alábbi módon felírható (6):

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

ahol σ a feszültség MPa-ban, F az erő N-ban, A pedig a szerszám keresztmetszete mm^2 -ben kifejezve. Ebből a deformáció azonos módon számítható, mint a (3) egyenlet esetében [7].

Mindezekből pedig meghatározható az alakváltozás az alábbi módon (7):

$$\delta_{nyomó} = \varepsilon \cdot L, \quad (7)$$

ahol $\delta_{nyomó}$ az alakváltozás mm-ben, ε a deformáció százalékban kifejezve és L a szerszám magassága szintén mm-ben meghatározva [7].

Abban az esetben, ha nincs teljes mértékben alátámasztva, akkor nyírásra kell méretezni a lapokat, hogy elviselje hajlító igénybevételt. Ez általában a kilökölapok és a szerszám ürege között van jelen, ebben az esetben az alábbi módon határozzák meg a terhelést (8):

$$\tau = \frac{F}{A}, \quad (8)$$

ahol τ nyírófeszültség MPa-ban, F az erő N-ban, A pedig a lap nem alátámasztott felülete mm^2 -ben [7].

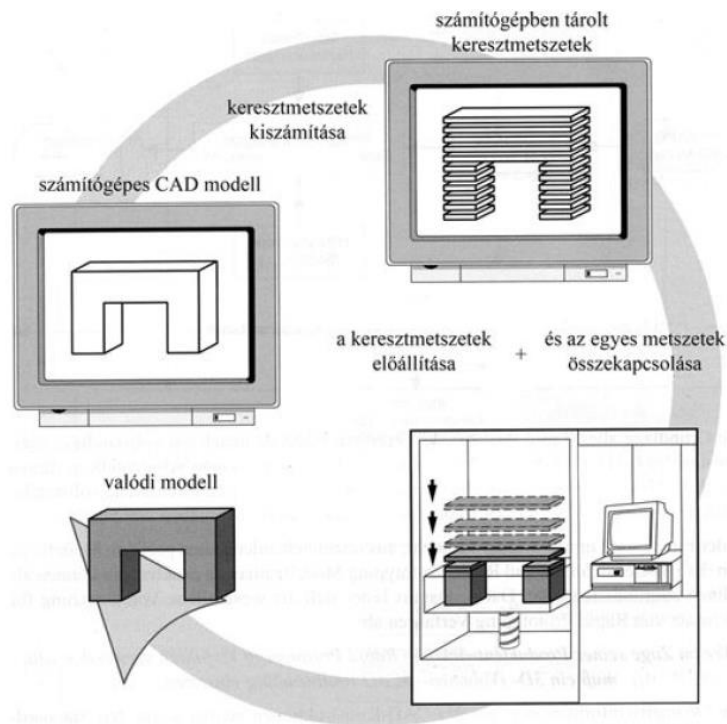
2.3. Additív gyártástechnológia, PolyJet technológia

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 ömledékrétegezéses 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 metódus. 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, forgácsolás, egy nagyobb térfogatú előgyártmányból indulnak ki, és anyagtól kell eltávolítani, ami ezek után hulladékként kezelendő, addig ennél a technológiánál erre nincs szükség. Az additív gyártástechnológia a konstrukciójából adódóan nem, vagy csak minimális hulladékkal jár, ami nagy előny versenytársaival szemben [8-10].

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 [11]. Ezt a modellt a gyártás előtt síkokra szeletelik egy tetszőleges program segítségével, majd síkonként, rétegenként építik fel a valóságban a modellt (9. 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].



9. ábra Az additív gyártástechnológia folyamatábrája [3]

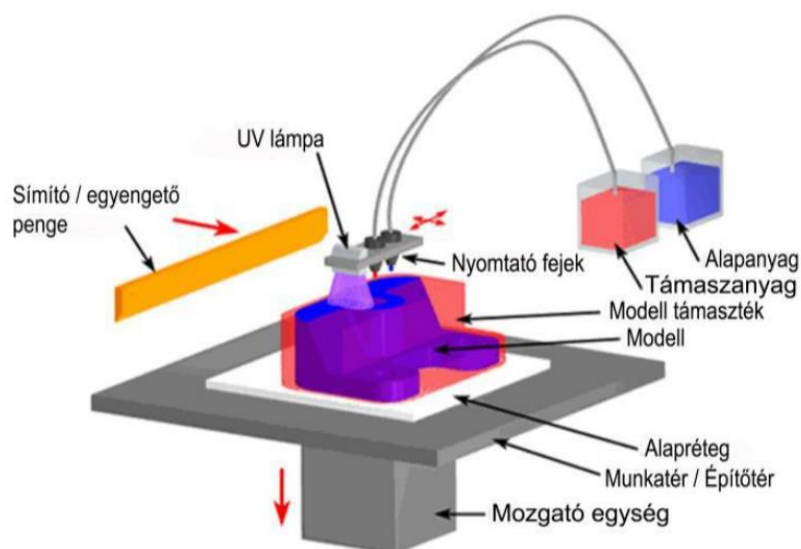
Amennyiben lap geometriájú alapanyaggal dolgoznak, abban az esetben a kötőanyag a rétegek között helyezkedik el, ezzel megadva a termék szilárdságát. A legáltalánosabb példa erre a Magyarországon első additív technológiaként megjelenő rétegelt termékgyártás (Laminated Object Manufacturing, LOM). Ennek 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, 11].

A legnépszerűbb additív gyártással dolgozó gépek a harmadik fajta, folyadék alapanyaggal dolgoznak, ez lehet fotopolimer gyanta és termoplasztikus polimer. Az első esetben a térhálósodást és a szilárd halmazállapotot valamilyen hő- vagy fénysugárzás váltja ki az anyagból, míg utóbbi esetben 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 ömledékrétegezéses technológia (Fused Deposition Modeling, FDM) a legáltalánosabb példa [11].

2.3.2. PolyJet technológia

Ahogy korábban megemlítettem, 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, ami szintén

egy fotopolimerrel van megoldva (10. 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 igen 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 [12].



10. ábra A PolyJet technológia felépítése [11]

Ennek ellenére teljesen izotróp testről továbbra sem lehet beszélni, mivel még mindig egy rétegről rétegre való építkezéssel lett legyártva 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 [13] 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 [14], 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

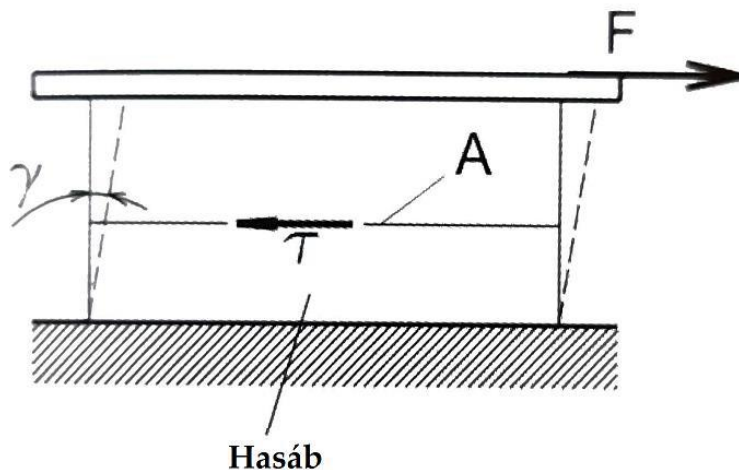
A fröccsöntött termékek a gyártási technológiából adódóan rendkívül sokszínű formájúak és célúak lehetnek. Előfordulnak olyan termékek is ebből adódóan, amelyek tartalmaznak valamilyen előgyártmányt magukban. Ezek lehetnek erősítő szálak vagy

menetes kialakítások, hogy stabilabban lehessen csavarkötést létrehozni a termékkel, vagy szénszállal erősített FDM-mel nyomtatott előgyártmányokkal erősített termékek. 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 általam kialakított inzertek olyan módon lettek kialakítva, hogy a fröccsöntési ciklus során nyíró igénybevételnek legyenek kitéve elsősorban. A terhelés a geometriából adódóan egy hasáb nyírására vezethető vissza (11. ábra), és mivel a PolyJet technológiának köszönhetően tömör testként tudtam őket nyomtatni, ezért tekinthettem rájuk egy izotróp lineárisan rugalmas testként. Ennek köszönhetően alkalmazható rájuk a Hooke-törvény nyírásra vonatkoztatott formulája [15].



11. ábra Nyíró igénybevételnek kitétt hasáb sematikus ábrája [16]

A legegyszerűbb alakot az egyszerűsített Hooke-törvényből [15] származtathatjuk, amely esetében az alábbi lineáris összefüggést kapjuk (9):

$$\tau = G \cdot \gamma, \quad (9)$$

ahol τ a csúsztató feszültség, γ a nyíró deformáció G pedig a csúsztató rugalmassági

modulus („shear modulus”). A csuszató rugalmassági modulus meg kell jegyezni, hogy nem egy független anyagjellemző, hiszen mind a rugalmassági modulustól (E), mind a Poisson-tényezőtől (μ) függ az értéke az alábbi módon (10):

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad (10)$$

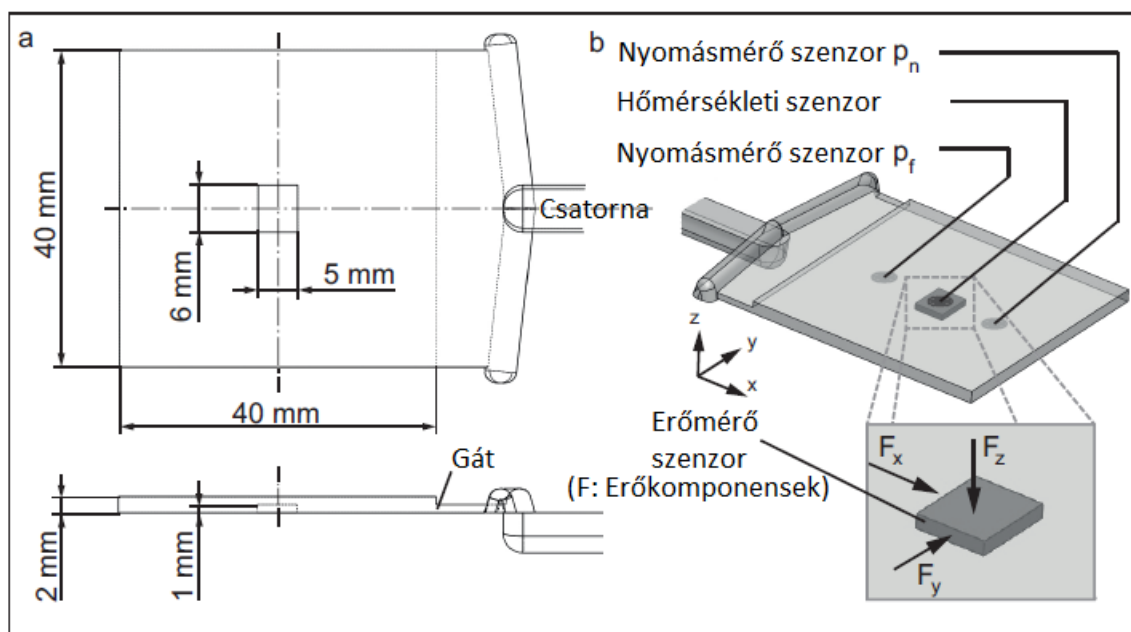
A nyíró igénybevétel számítására ömledékáramban Rahmati és Dickens munkájában [17] található egy formula, akik hasonló inzert kialakításra az alábbi összefüggést írták fel (11):

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot a}, \quad (11)$$

ahol V a nyíró erő, Q semleges tengelytől kifelé eső rész statikai nyomatéka a súlyponti tengelyre, I a másodrendű nyomaték a pedig keresztmetszet szélessége [15, 17].

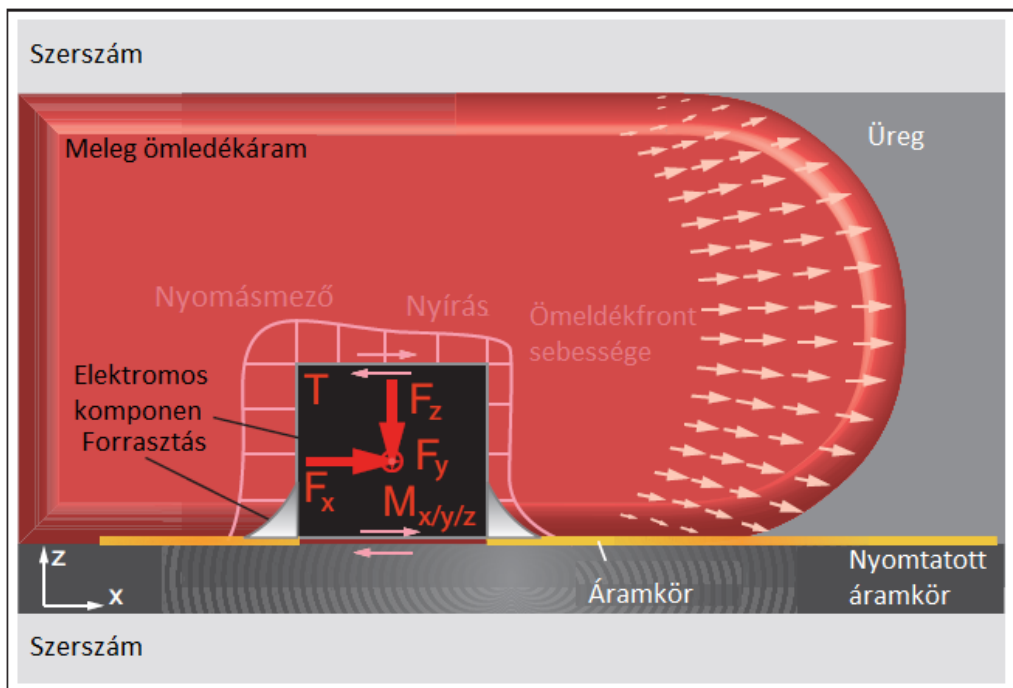
Az ömledék által az inzertre mért erőhatásnak a mérése egy igen nehéz és összetett feladat. A legjobb eredményt talán Heinle és Drummer érte el [18], akik ki akarták deríteni, milyen erőhatások hatnak az ilyen inzertekre, annak érdekében, hogy kalkulálható legyen tervezéskor, például érzékeny elektronikai eszközök esetében, pontosan mit is kell kibírnia egy ilyen elemnek, hogy az később is működőképes legyen [18].

Méréseik során két nyomásmérő szenzort, egy hőmérséklet mérő szenzort és egy erőmérő szenzort alkalmaztak, ahogy azt a 12. ábra mutatja.



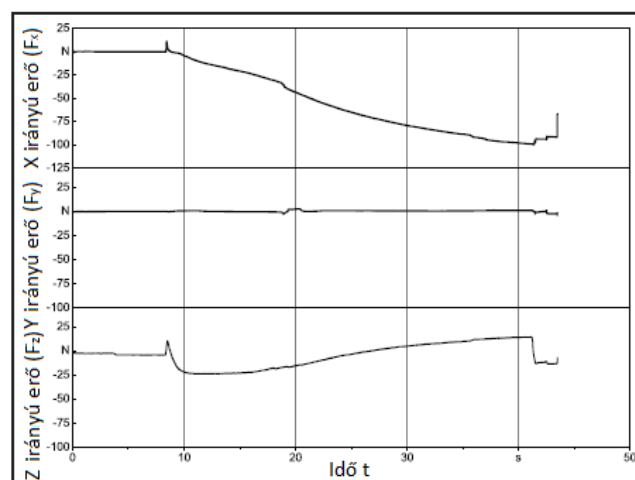
12. ábra Heinle és Drummer mérésének kialakítása [18]

Elképzeléseik és modellezéseik szerint az inzertet, jelen esetben erőmérő szenzort egy nyomásmérő veszi körbe, aminek következtében egy dinamikus változó terhelés fogja érni a testet, mégpedig nem csak az ömledékáramnak az irányából, hanem mindenfelől [18]. Ennek a szemléltetését segíti a 13. ábra.



13. ábra Sematikus ábra a betétekre ható terhelésekről a fröccsöntési folyamat során [18]

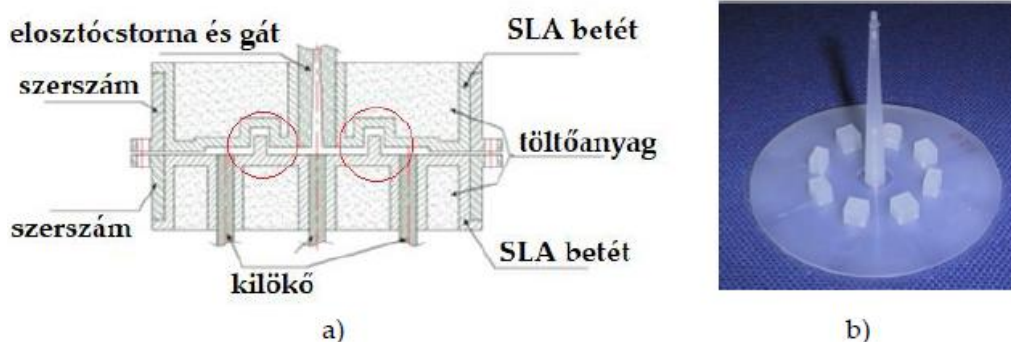
Az ebben a cikkben bemutatott eredmények azt bizonyítják, hogy ez a mérési koncepció olyan adatokat szolgáltat, amelyek koherensek értelmezhetőek, és így alapját képezhetik a további vizsgálatoknak. E területen végzett munkájuk remek kiindulási alapként szolgálhat. Arra a következtetésre jutottak Heinle-ék, hogy az ehhez hasonló összetett fröccsöntési folyamatot nagy körültekintéssel, megfelelő tervezéssel és gyártással kell végezni. Nemcsak az erő nagysága, hanem a kitöltés és annak időtartama is lényeges. Megállapították, hogy a kitöltési fázisban volt a maximális erőérték, majd a hűtési fázisban egy állandó mértékű terhelés állt be (14.ábra) [18].



14. ábra Erőlefutások a fröccsöntési ciklus során Heinle és Drummer mérései során [18]

2.4.2. Polimer inzertek deformációja

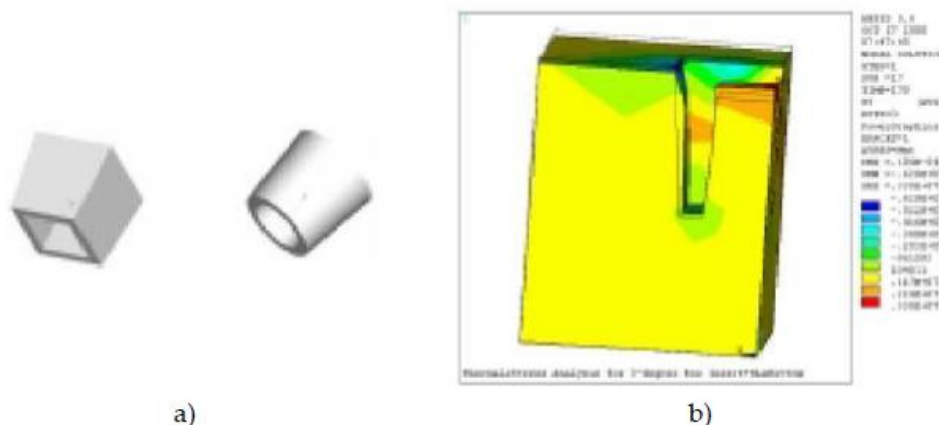
Sajnos a PolyJet technológiával készült polimer inzerteknek nincs nagy irodalma, azonban a prototípus betéteket érintő kutatások vannak olyanok, amelyek felhasználhatóak a polimer inzertek vizsgálatára is. Két ilyen kutatás is sztereolitográfiával (SLA) előállított szerszámbetéteket vizsgáltak. Rahmati és Dickens [17] kis kiálló téglalapokat alakítottak ki a szerszámbetéten és ezeknek a mechanikai terhelését vizsgálták.



15. ábra: a) Rahmati és Dickens által használt szerszámbetét (pirossal kiemelve az inzertként is vizsgálható területet) b) a betét által gyártott termék [17]

Eredményeik azt mutatják, hogy a terhelések döntő többsége nyíró és hajlító jellegű, ezek azonban törést körülbelül 500 ciklus után okoztak. Továbbá megfigyelték, hogy a szerszámbetét élettartama nagymértékben függ a hőmérséklettől, ezért az ilyen betétek alkalmazásakor nagyobb ciklusidő javasolt vagy a ciklusok között a betétet hűteni szükséges.

A másik ilyen munka Colton és társai [14] névéhez fűződik. Ők már a teljes ciklus - azaz a befrocsöntéstől kezdve egészen a kidobásig - hatását vizsgálták. Munkájukban figyelembe vették a betétek építési irányát és vizsgálták az öregítés hatását is. Itt üreges terméket állítottak elő, így a betétnek van olyan része, amely hasonlóan viselkedik, mint egy inzert.



16. ábra: a) Colton és társai által gyártott termékek b) Colton és társai betétjének feszültség eloszlása [14]

Mért eredményeiket összevetették mind analitikus, mind numerikus eredményeikkel. Az eredményekből azt állapították meg, hogy mind az analitikus, mind a numerikus eredmények alábecsülik a tényleges deformációt. Ennek okaira a modellezés pontatlanságát és a fröccsöntési nyomások helytelen megadását adták meg. Kutatásuk másik eredménye, hogy az SLA technológia esetében az építési irány nem befolyásolja a deformáció mértékét, azonban más additív technológiával nem vizsgálták meg ennek a hatását, így nem lehet biztosan kijelenteni, hogy az építési irány nem befolyásolja a deformációt [14].

2.5. Irodalmi összefoglalás és kritikai elemzés

Általánosan elmondható, hogy a polimer inzertek alkalmazása és vizsgálata egy még keveset kutatott és vizsgált terület, amelyeknek irodalma ebből fakadóan szegényes. Mindezek ellenére a prototípus betétek irodalmának egyes részei, mint például Rahmati és Dickens [17] vagy Colton és társainak a munkája [14], segítséget adhat abban, hogy előzetes koncepciókat állíthassak fel a mérési vizsgálatokkal kapcsolatban. Ők négyzetes és kör keresztmetszetű mintákat vizsgáltak, így én is hasonló geometriákat választottam, hogy viszonyítási alapként tudjam használni ezeket a méréseket.

Ezen kívül a fém inzerteket kutató munkák, mint például Heinle és Drummer tanulmánya [18], szintén lehetővé teszi, hogy becsülhetőek legyenek az inzerteket ért erőhatások. Ezekkel az erőhatásokkal, ahogy az a fröccsöntő szerszámok irodalmát kutatva kiderült, nagy mértékben számolnom kell, mivel nagy értékűek lehetnek, és amennyiben ezt az inzertek nem viselik el, úgy hibás terméket fogok kapni a fröccsöntési ciklus végén. Ennek következtében, a fröccsöntési ciklus helyes beállítása is egy fontos feladat polimer inzertekkel gyártott termékek esetén, mivel ahogy a fröccsöntést taglaló irodalmak is leírják, nagy mértékű eltérések lehetnek az egyes ciklusok által kifejtett erőhatások között.

Mindent összefoglalva elmondható, hogy bár általános érvényű megállapításokat nem lehet meghatározni a polimer inzertek irodalma alapján, azonban irányvonalakat meg lehet határozni az inzertek vizsgálatát illetően. Ennek megfelelően úgy döntöttem, diplomamunkám fő irányvonala a geometriák hatásának és azok gyártási pontosságának fontossága lesz, mivel abban az esetben, ha ezek nem megfelelőek, és az inzert nem viseli el a fröccsöntési ciklust, nem lehet a gyakorlati jelentőségű merevítési hatását vizsgálni ezeknek az alkatrészeknek.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

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

3.1. Felhasznált alapanyagok

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

3.1.1. Fröccsöntési alapanyag

A fröccsöntés során a MOL Petrolkémia Zrt. Tipplen H 145 F típusú polipropilénjét (PP) használtam. Ez egy alacsony molekulatömegű, jó folyóképességű PP, 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 ²]	3
HDT; 0,45 MPa [°C]	128
Rockwell keménység [R skála]	104

1. táblázat: Tipplen H145 F PP anyagjellemzői [19]

3.1.2. Inzertek alapanyaga

Az inzertek a PolyJet technológiából adódóan fotopolimerből készültek, FullCure 835-ből. A gyártási technológiából adódóan egy támaszanyagra is szükség volt, ami 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 _g [°C]	52-54
Shore keménység (D)	83-86
Rockwell keménység	73-76
Sűrűség [g/cm ³]	1,17-1,18

2. táblázat: FullCure 835-ös fotopolimer anyagjellemzői [20]

3.2. Alkalmazott feldolgozó berendezések

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

3.2.1. Fröccsöntőgép és szerszám

A méréseket egy Arburg Allrounder 470 A 1000-290-es fröccsöntőgépen végeztem (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 tanszéknek a birtokában volt egy üvegbetétes fröccsöntő szerszám (18.ábra), ami lehetővé tette, hogy a fröccsöntési ciklus során vizsgálni tudjam az inzeretek deformációját. A szerszám pneumatikus kidobó rendszerrel van felszerelve, hűtőkör viszont nincs kialakítva benne.



18. ábra Üvegbetétes fröccsöntőszerszám

3.2.2. *Objet 30 Pro*

A szerszámbetét és az inzeretek Objet 30 Pro segítségével készültek (19.ábra). A gép Fullcure 835-ös alapanyaggal és Fullcure 705-ös támaszanyaggal dolgozott. A berendezés 0,028 mm-es rétegvastagsággal, egy 300x200x150 mm-es építési térben és 0,1 mm-es pontossággal dolgozik.



19. ábra Objet 30 pro [22]

3.3. Alkalmazott vizsgálati eszközök

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

3.3.1. *iPhone 13 Pro Max*

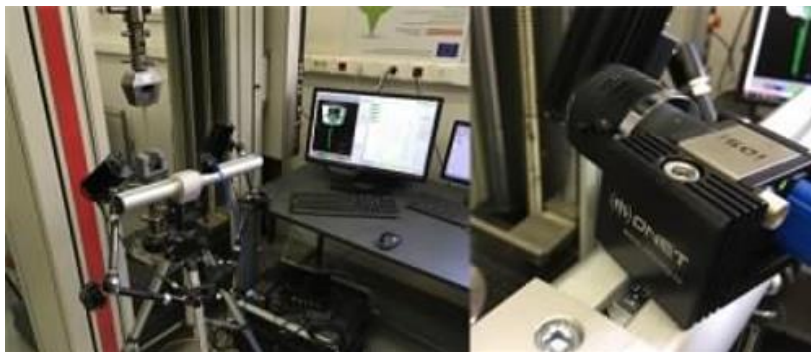
A kezdeti felvételeket a fröccsöntési ciklusokról és az inzeritdeformációkról egy iPhone 13 Pro Max (20.ábra) segítségével készítettem.



20. ábra iPhone 13 Pro Max

3.3.2. *Mercury Monet DIC*

A felvételek méréséhez és kiértékeléséhez egy Mercury Monet DIC (21.ábra) berendezést használtam.



21. ábra Mercury Monet DIC [23]

3.3.3. Fényképezőgép és objektív

A videófelvételek rögzítésére egy Nikon D600 típusú fényképezőgépet és egy NIKKOR 28-300mm f/3.5-5.6G ED VR típusú objektívet használtam (22.ábra).



a)

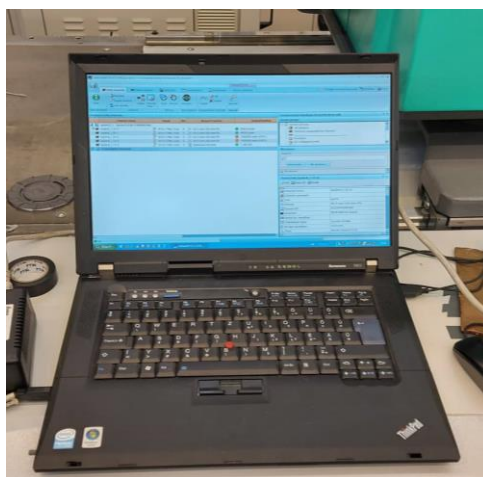


b)

22. ábra a) Nikon D600 kamera
b) NIKKOR 28-300mm f/3.5-5.6G ED VR objektív [24]

3.3.4. Mérő számítógép

A nyúlásmérő bélyegek által leadott feszültségeket és az abból származó adatokat egy, a tanszéken található Lenovo ThinkPad laptopon rögzítettem.



23. ábra Mérésre használt tanszéki laptop

3.3.5. Adatgyűjtő egység

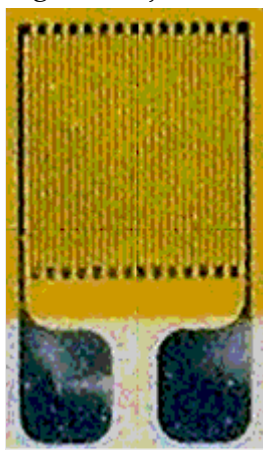
A nyúlásmérő bélyegek által leadott ellenállásának feldolgozását és azok számítógépre való továbbítását egy HBM Spider 8 6000/DC típusú adatgyűjtővel hajtottam végre.



24. ábra Spider8 6000/DC típusú adatrögzítő egység

3.3.6. Nyúlásmérő bélyeg

A méréseket két, KMT-LIAS-06-1,5-350-5E típusú 350 Ω ellenállású, 1,5*2,5 mm nagyságú nyúlásmérő bélyeg segítségével hajtottam végre.



25. ábra KMT-LIAS-06-1,5-350-5E típusú nyúlásmérő bélyeg [25]

3.3.7. Zwick-Z005-ös szakítógép

A kalibrációs vizsgálatokat egy Zwick-Z005 típusú szakítógépen végeztem, ami egy számítógép vezérlésű mechanikai szakítógép, szakító, hajlító, nyomó, lefejtő, rétegeközi vizsgálatokhoz. Maximális terhelhetősége 5 kN.



26. ábra Zwick-Z005-ös szakítógép [26]

4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

Munkám fő célja a korábban leírt polimer inzert deformáció mérésének pontos megvalósítása. Mivel a mérés során ezeknek az inzerteknek a szenzorozása nehezen kivitelezhető, a mérési lehetőségeim az indirekt módszerekre korlátozódtak.

4.1. Inzertek geometria kialakításai

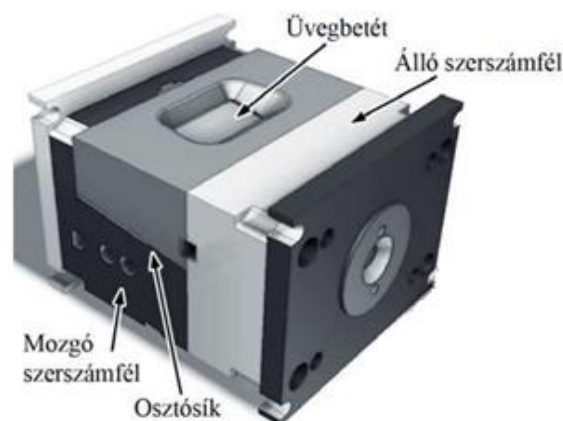
Fröccsöntés során az inzertekre kétfajta igénybevétel hat. Az egyik a nyíró igénybevétel a másik a hajlító igénybevétel. Ezek vizsgálatára alakítottam ki az inzerteket. A nyíró igénybevétel vizsgálatára kétfajta keresztmetszetet is kialakítottam. Az egyik esetben vizsgáltam a magasság különbség hatásait is. Hajlító esetben pedig a vastagság különbség hatásait is. Minden inzerttípusból három-három darabot vizsgáltam. A 3. táblázat foglalja össze az egyes geometriákat.

Sorszám	Geometria	Keresztmetszet [mm ²]	Szélesség/ Átmérő [mm]	Magasság [mm]	Igénybevétel
1	Négyzet	4	2	6,5	Nyíró
2	Négyzet	4	2	6,75	Nyíró
3	Négyzet	4	2	7	Nyíró
4	Négyzet	4	2	7,25	Nyíró
5	Négyzet	4	2	7,5	Nyíró
6	Négyzet	16	4	7	Nyíró
7	Négyzet	36	6	7	Nyíró
8	Kör	3,14	2	7	Nyíró
9	Kör	12,57	4	7	Nyíró
10	Kör	28,27	6	7	Nyíró
11	Téglalap	50	2x25	7	Hajlító
12	Téglalap	37,5	1,5x25	7	Hajlító

3. táblázat: Deformációs mérésekhez használt inzertek geometriái és adatai

4.2. Mérési módszer meghatározása

Korábbi munkám során nagysebességű kamerás felvételeket végeztem egy, a tanszéken található üvegbetétes szerszámmal (27. ábra), azonban a fekete fehér felvételek során kézzel a deformáció mértéke nehezen volt kielemezhető, mivel az inzertek határai nem voltak egyértelműen kivehetők a videókon.



27. ábra Üvegbetétes fröccsöntő szerszám [27]

Mérésem fejlesztésében két irányt akartam ezáltal meghatározni. Egyrészt, a felbontás javításával és színes felvételek készítésével jobb képminőséget próbáltam elérni, másrészt kiküszöbölve az emberi tényező korlátozó hatását, a deformáció meghatározására szoftveres elemző szoftvert szeretnék használni. Természetesen, a szoftveres kiértékelés mellett egy manuálisat is elvégeztem, ellenőrzés, illetve referenciaképpen.

4.2.1. Optimális felvevő eszköz meghatározása

A méréseket több különböző módszerrel próbáltam végrehajtani, azonban rá kellett jönnöm, a Digitális Képkorrelációs rendszer (Digital Image Correlation, DIC) szoftverének érzékenysége miatt korlátozottak a lehetőségeim. A tanszéken található berendezés kamerája nem teszi lehetővé a méréseket, mivel a vizsgálati terület olyan kicsi, hogy a DIC-ra szerelt 5 megapixeles kamera nem tud elég részletes és nagy képet biztosítani a programnak, hogy az követni tudja a felvételek során az inzer deformációját. Ennek az oka, hogy a szoftver nem csak egy pontot, hanem annak környezetét is figyeli, és amikor a vizsgálati területbe megérkezik a befröccsöntött polimer ömledék, a vizsgált pontnak a környezete olyan mértékben változik meg, hogy azt a szoftver nem tudja lekövetni, és egyszerűen elveszti a jelet közvetlenül a deformáció előtti pillanatban.

Erre a problémára megoldást jelenthet, hogy a program előre felvett, külső forrásból származó felvételekkel is tud dolgozni, ami miatt, ha tudok megfelelően nagy felbontású, illetve nagyítású képet készíteni, a szoftver reményeim szerint képes lesz vizsgálni a deformáció mértékét.

A felvételek elkészítésére több eszközt is kipróbáltam. Az eszközválasztás problémáját három különböző faktor korlátozta. A felvételek felbontása elég nagy kell, hogy legyen, hogy jól beazonosíthatóak legyenek a program számára az egyes pixelek, másrészt a képkocka per másodperc (FPS, frame per second) számnak is elég

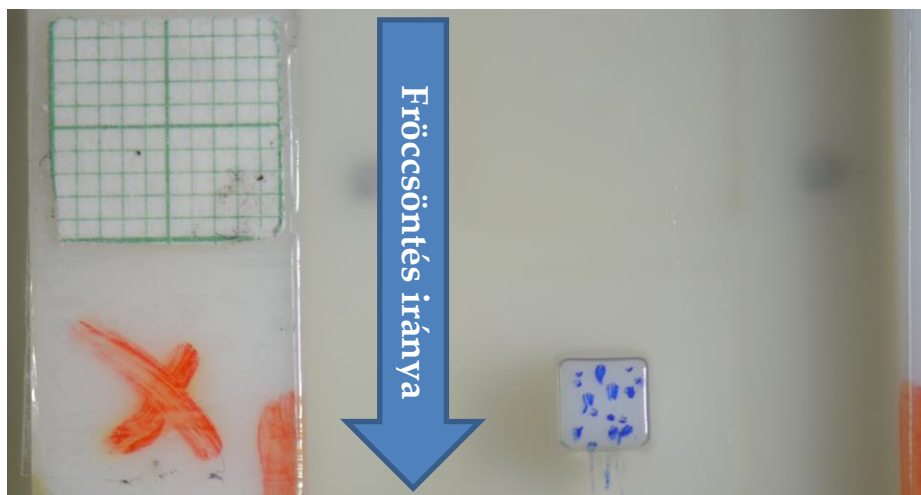
magasnak kell lennie, hogy elég időpillanatot tudjon vizsgálni a program, és pontos deformációs görbét tudjon kirajzolni. A harmadik tényező a rendelkezésre álló géppark, mivel egy az előző két feltételt is teljesítő kamera beszerzése objektívekkel együtt nem állt rendelkezésre. Emiatt a mérés során kompromisszumot kellett kötni, hogy magasabb FPS számmal vagy magasabb felbontással és nagyítással akarok dolgozni.

Első próbálkozásom egy iPhone 13 Pro Max telefon szuperlassított kamerája volt, ami 240 FPS-ben, viszont 1920x1080 pixeles felbontásban tudott rögzíteni. Sajnos ezek a felvételek nem bizonyultak optimálisnak, mivel bár a felbontás megfelelő volt, azonban a kamera háromszoros nagyítása nem volt elegendő ahhoz, hogy megfelelő képeket készítsék (28. ábra).



28. ábra: iPhone 13 Pro Max szuperlassított felvétele

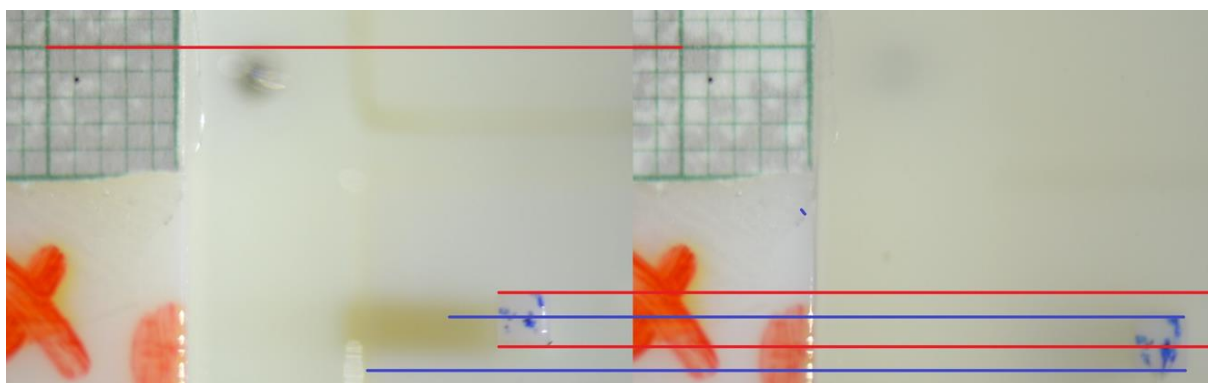
Ezek után egy Nikon D600-as kamerával és egy NIKKOR 28-300mm f/3.5-5.6G ED VR típusú objektívvel készíttetten felvételeket, amelyek már sokkal jobbnak bizonyultak (29. ábra). Az objektív segítségével olyan nagyítást tudtam elérni, amely már elegendő lehet a szoftver számára. Ebben az esetben viszont kompromisszumot kellett kötnöm, mivel a kamera mindössze 30 FPS-es rögzítése nem fog annyi pontot biztosítani a számomra a görbe felvételéhez. Egy átlagos befröccsöntési idő jelen esetben hozzávetőlegesen 1,2 s volt, ami 36 képkockát és felvehető pontot jelent.



29. ábra Nikon D600 és Nikkor 28-300mm f/3.5-5.6g ED VR típusú objektív segítségével készített felvétel

4.3. Kézi kiértékelés

A DIC mérések ellenőrzésére a felvételek kézi kiértékelését is elvégeztem, hogy a hozzávetőleges deformációs nagyságrendekkel tisztában legyek a szoftveres kiértékelés elemzésénél. A kézi kiértékelés során kézzel kikerestem a felvételekből azokat a képkockákat, amelyekben a maximális deformáció látható, majd képfeldolgozó szoftversegítségével összehasonlítottam őket egy deformáció előtti pillanattal. Ilyenkor a mindkét képen látható milliméterpapír középpontját használtam referencia pontnak, hogy a képek egyvonalban legyenek, és pontosan leolvasható legyen a deformáció (30.ábra). Ezek után vízszintes egyeneseket húztam az inzert alján és tetején mindkét időpillanatban és az egyenesek közti távolság megadta a deformáció mértékét. A pontos értéket a referenciának használt milliméterpapír segítségével határoztam meg, mint viszonyítási alap. Utána ugyanezt elvégeztem a visszarugózás utáni állapotnál is.



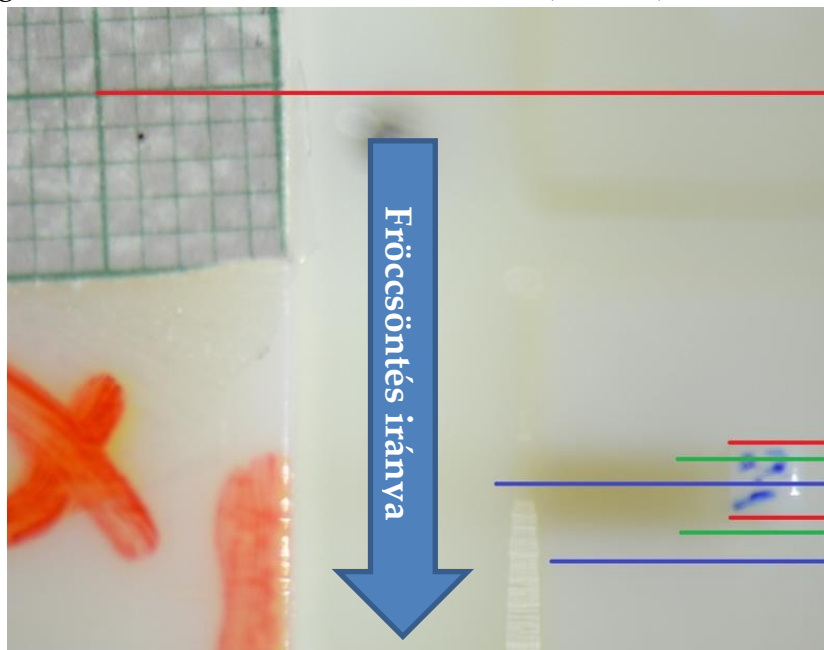
30. ábra Kézi kiértékelés menete

4.3.1. Inzert magasságának hatása a deformációra

Ezen mérések során azt vizsgáltam, hogy a deformáció nagysága és jellege milyen mértékben változik abban az esetben, ha az inzert magasságát változtatom, és ezzel különböző módokon előfeszítem a szerszámmázárás során. Különböző magasságú inzerteket vizsgáltam (3.táblázat), amelyek közül a 6,5 és 6,75 mm-es minták nem érintkeznek a szerszám tetejével, a 7 mm-es inzertek és az üveg betét között egy érintkezési kapcsolat van, amíg a 7,25 és 7,5 mm magas minták a zárás hatására már előfeszített állapotban kerülnek terhelés alá.

A befröccsöntési sebesség minden esetben $40 \text{ cm}^3/\text{s}$ volt, a befröccsöntési nyomás 600 bar, a befröccsöntési térfogat pedig 60 cm^3 . A mérés egyszerűsítése érdekében utónyomást nem alkalmaztam, viszont egy 140 s-es hűtést beiktattam a ciklusba, hogy a betét ne károsodjon, illetve, hogy a PP-nek legyen ideje megszilárdulni a hűtőkörök hiányának és a nagy „falvastagság” ellenére.

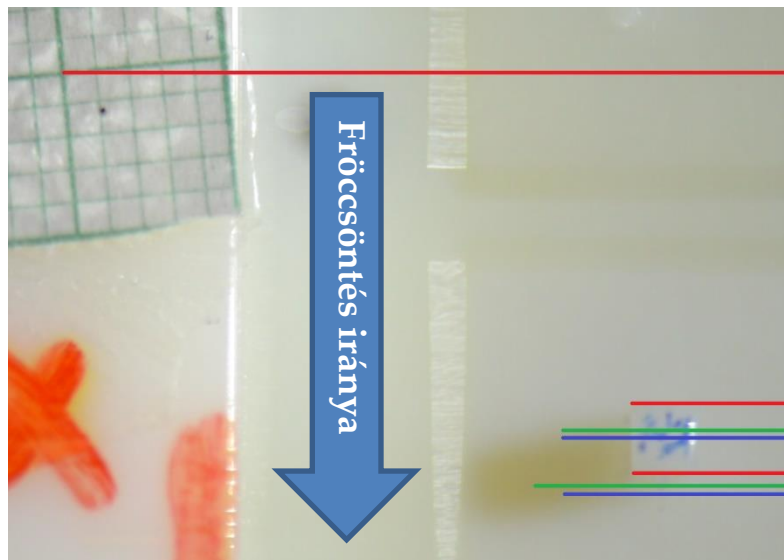
A 6,5, illetve 6,75 mm-es minták esetében a deformáció a felvételek során több szakaszból áll. A befröccsöntés során egy erős terhelést kapnak az inzertek, amelyek egy 0,8-1,1 mm-es deformációt szenvednek el ebben az időszakban mindkét magasság esetén, majd a mechanikai terhelés megszűnése után egy visszarugózás történik, ami után a végleges deformáció mértéke 0,3-0,6 mm nagyságrendű lesz, tehát megközelítőleg fele lesz a maximális deformációnak (31.ábra).



31. ábra 6,75 mm magas inzert deformációjának szemléltetése
(zöld: végleges deformáció, kék: maximális deformáció)

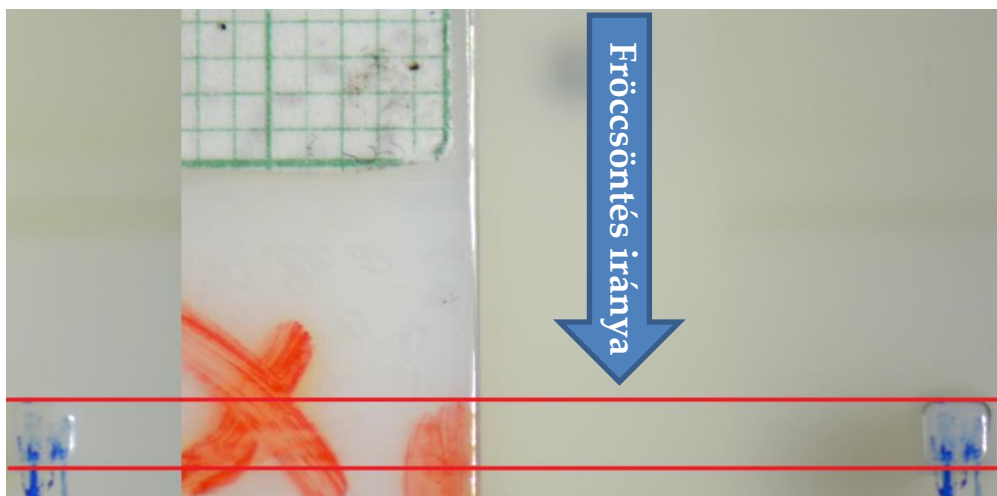
A 7 mm minták esetében egy érintkezési kapcsolatról beszélünk a szerszám fala és a vizsgált inzert teteje között, ami miatt a mozgásában bár korlátozottabb az inzert, befeszítve nincsen. Ezen minták esetén a deformáció mértéke változott, mivel az a súrlódási erő miatt, amit az üveglap okoz nála, nem tudott olyan mértékben kihajolni.

Ezen kívül meg kell jegyezni, hogy a visszarugózás mértéke is lecsökkent, ugyanis a maximális 0,9-1,1 mm deformációról csak 0,65-0,85 mm-re csökkent vissza az kihajlás, ami a korábbi majdnem 50%-os csökkenéshez képest jelen esetben csak 20-30% volt (32.ábra).



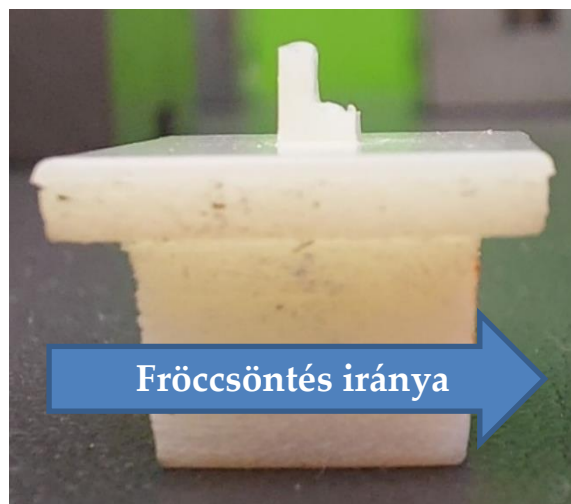
32. ábra 7 mm magas minta deformációjának szemléltetése
(zöld: végleges deformáció, kék: maximális deformáció)

A 7,25 mm magasságú minták előfeszített állapotba kerültek a szerszám zárásakor, mivel 0,25 mm-es a túlfedés az inzert és a szerszám között. A súrlódási erő az üveglap és az inzert között, olyan mértékű, hogy az képes kompenzálni a fröccsöntés során az inzert felületét terhelő nyomásnak. Ennek következtében az inzertek a fröccsöntés során szinte semmilyen deformációt nem szenvednek el, legalábbis szabad szemmel egyáltalán nem megállapítható annak a mértéke. Ennek okán visszarugózásról sem beszélhetünk (33.ábra).



33. ábra 7,25 mm-es minták esetén nem történik deformáció

A legnagyobb, 7,5 mm inzertek esetén viszont már ennél jelentősebb folyamatok játszódtak le. Ilyen magasságnál már a túlfedés olyan mértékű volt, hogy a szerszám zárásakor itt is előfeszített állapotba került az inzer. Emiatt az előfeszítettség és a befroccsöntés által kifejtett igénybevétel miatt a veszélyes keresztmetszetben (inzer töve) eltört (34.ábra).

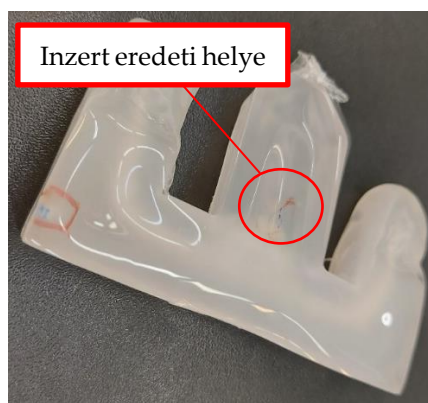


34. ábra 7,5 mm magas inzer töretképe a fröccsöntés után

A törés ideje eltérő volt, volt, ahol már a fröccsöntés legelején, aminek következtében az inzer a termék hátsó felébe sodródott (35.ábra), volt, ahol csak a terhelés végén, így azt az ömledékáram a helyén tartotta Ennek oka lehet a nyomtatási pontatlanság.



a)



b)

35. ábra 7,5 mm magas inzer pozíciója a fröccsöntés után

Az eredményeket összefoglalva elmondhatom, hogy a gyártási pontosságra kiemelt figyelmet kell szánni az inzertek előállításánál a magasság esetében. Kis mértékű változtatás is drasztikusan befolyásolja a termék viselkedését, hiszen, ha megnézzük, hogy míg 7,25 mm-es névleges méretnél minimális deformációt tapasztaltam, addig

7,5 mm-es magasságnál már minden esetben törés következett be, pedig az inzertr magasságához képest alig 3%-os változtatás történt. Emellett meg kell említeni persze, hogy a negatív irányú túrés nagy változtatásokat nem okoz a viselkedésben, viszont ebben az esetben pedig nagyobb mértékű deformációval kell számolnom, hiszen az inzertr végének elmozdulását semmilyen kényszer nem korlátozza, nem úgy, mint az előfeszített esetekben.

Ezekből következik, hogy a gyártás esetében vagy nagy mértékű túréssal kell dolgozni, vagy nagyon nagy pontosságú géppel kell gyártani, ami utóbbi esetben erősen lekorlátozza a választható additív gyártási technológiák listáját, többek között az FDM nyomtatók sem lesznek ideálisak, ami nagy veszteség lenne az ipari alkalmazhatóságra nézve, mivel ez a legelterjedtebb és leginkább alkalmazott technológia az iparban.

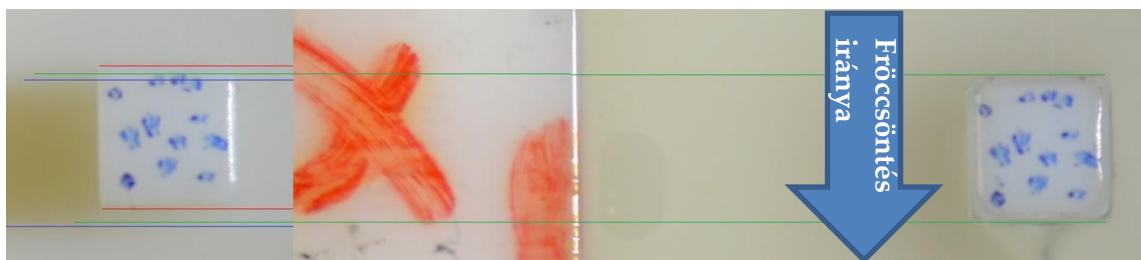
4.3.2. Inzertr keresztmetszetének hatása

Annak érdekében, hogy vizsgálni tudjam a keresztmetszet méretének és alakjának hatását, a 7 mm-es mintamagasságot választottam, mivel előfeszített esetben vagy nem történne megfelelő deformáció, vagy túl nagy átfedés esetén fennállna a törés esélye. A kisebb inzertr magasság ezek mellett pedig azért nem volt megfelelő mert ilyenkor az ömledék be tudott folyni az üveglap és a szerszám közé, és a szoftver elvesztette volna a jelet.

Vizsgálatom során kör és négyzetes keresztmetszetű 2, 4, illetve 6 mm átmérőjű, illetve oldalhosszúságú inzerterket vizsgáltam, mindegyikből 3-3 darabot. Emellett megvizsgáltam egy pengeszerű elrendezést, aminek elve, hogy az ömledékcsatorna két különböző nagyságúra való szétválasztásával a két részben áramló különböző sebességű ömledék a csatornák falát feszítve meghajlítja az inzerteret. Ez egy áramlástani elv kihasználásából adódik, ami szerint azonos nyomás esetén a nagyobb keresztmetszetű részben nagyobb sebességgel fog áramlani a közeg, mint a kisebb keresztmetszetű részben [28]. Ebből, a konstrukcióból 3 db 2x25, illetve 3 db 1,5x25 mm-es keresztmetszetű mintát figyeltem meg.

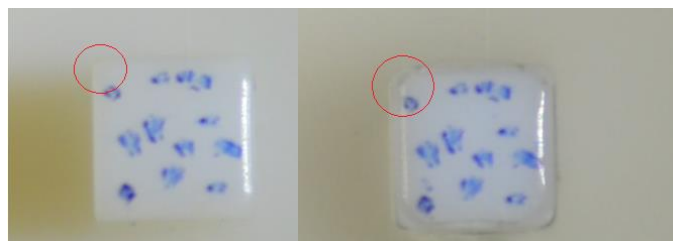
A négyzetes keresztmetszet esetén a 2 mm-es mintát külön nem vizsgáltam meg még egyszer, hanem az előző fejezetben taglalt mérés eredményét vettem figyelembe (32.ábra), ahol a maximális deformáció 0,9-1,1 mm volt és 20-30%-os visszarugózásról beszélhettünk.

A 4 mm átmérőjű minta esetén a vártaknak megfelelően csökkent a deformáció mértéke, a 2 mm-es minta hozzávetőlegesen 1 mm-es deformációjáról 0,3-0,5 mm-re. A visszarugózás mértéke azonban hasonló maradt, 20-30% (36.ábra).



36. ábra 4 mm-es oldalhosszúságú négyzet deformációja
(zöld: végleges deformáció, kék: maximális deformáció)

Ennek oka, hogy a keresztmetszet növelésével egyrészt az inwert karcsúsága csökkent, másrészt a nagyobb mérete miatt nehezebben melegedett át, és bár a FullCure 835-ös fotopolimer üvegesedési hőmérséklet feletti kilágyulása 60°C fölött megtörténik, ezt az inwert még kevésbé közelíti meg. Érdekes azonban megjegyezni, hogy a kilágyulás egy helyen, az inwertek sarkain látványosan megjelenik (37.ábra).

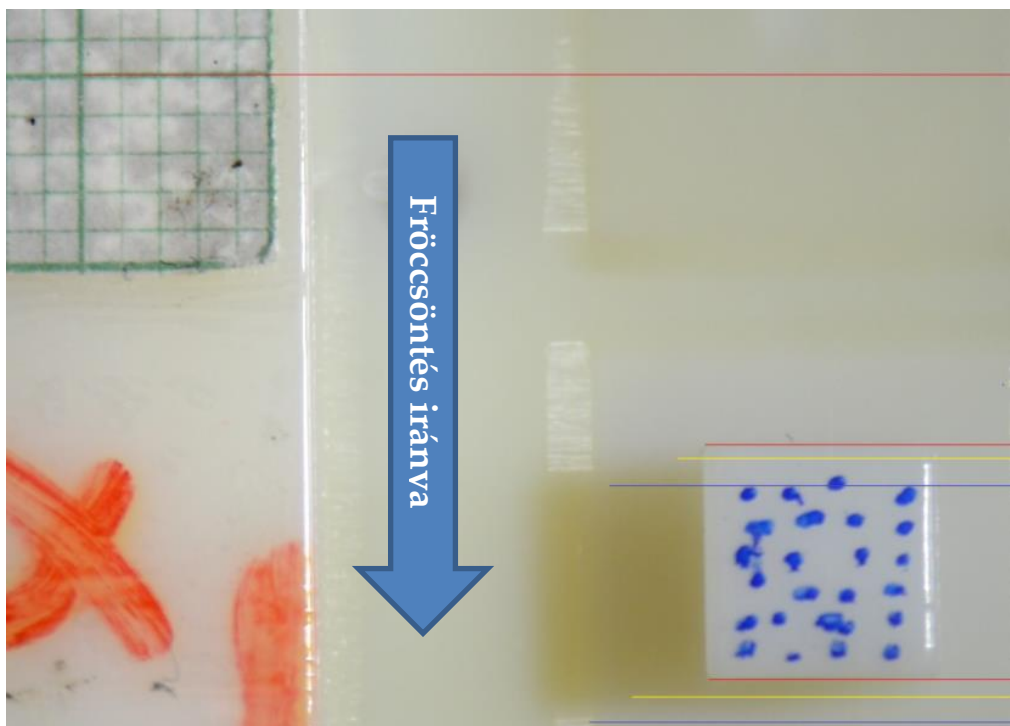


37. ábra Leolvadás a minták sarkain a nagy hő hatására

A legnagyobb, 6 mm-es minta esetén érdekes tendencia volt megfigyelhető. A maximális deformáció mértéke nagy mértékben megnőtt, közel 1 mm-es volt, azonban a visszarugózás is sokkal jelentősebb lett, 70-75% (38.ábra). Ennek okát abban véltem felfedezni, hogy egyrészt a betét felmelegedett, másrészt a homlokfelület, ami találkozott az ömledékkel, is jelentősen nőtt, így bár az inwert kevésbé lágyult ki, sokkal nagyobb erőhatás érte a testet, viszont a nyomásesés után ennek az erőnek a megszűnése után jobban vissza is tudott hajolni megközelítve az eredeti geometriáját.

Sorszám	1	2	3	4	5	6	7
Magasság [mm]	6,25	6,5	7	7,25	7,5	7	7
Szélesség [mm]	2	2	2	2	2	4	6
Homlokfelület [mm ²]	12,5	13	14	14,5	15	28	42

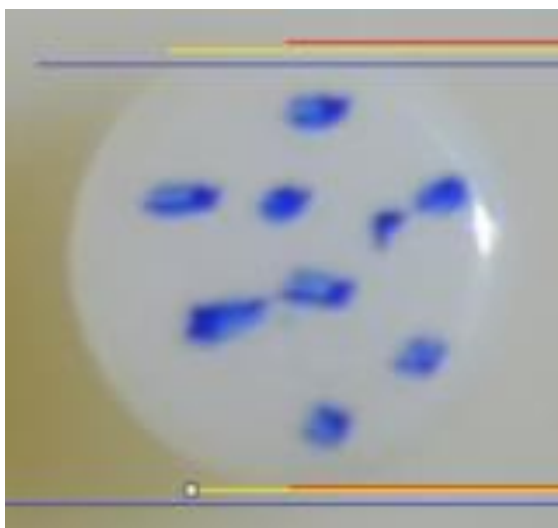
4. táblázat: A szélesség és magasság hatása a homlokfelületre



38. ábra 6 mm-es minta deformációja
(sárga: terhelés megszűnése utáni maradó deformáció, kék: maximális deformáció)

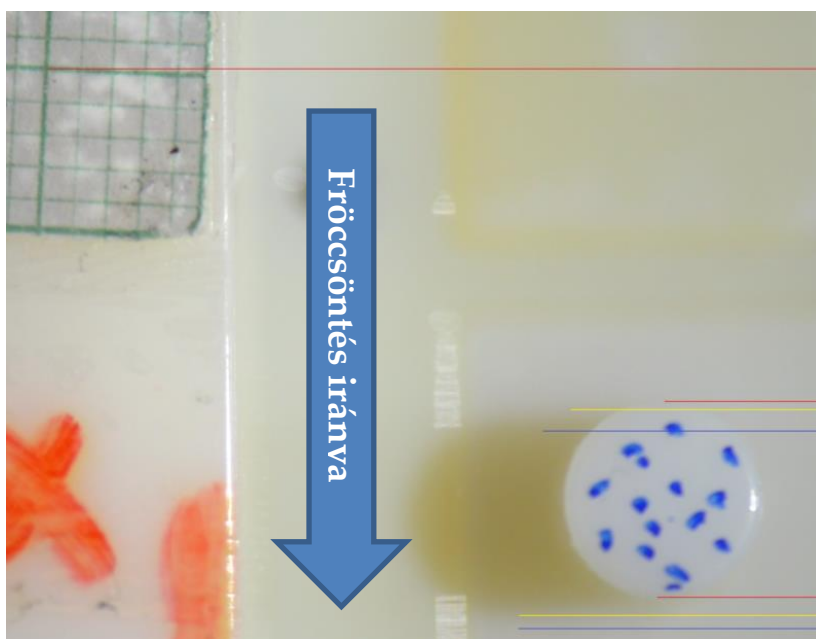
A kör keresztmetszetű minták esetén 2, 4, illetve 6 mm átmérőjű, 7 mm magas inzertereket vizsgáltam, azonos fröccsöntési paraméterekkel. A 2 mm-es minták esetén minden esetben törés következett be. Ennek oka az lehet, hogy már a négyzetes keresztmetszetnél is a 2x2 mm-es minta nagy terhelésnek volt kitéve, a kör keresztmetszet pedig még ennél is kisebb, mivel a négyzetes 4 mm²-hez képest ez csak 3,14 mm², ami már túl kevésnek bizonyult a fotopolimer számára, hogy az elviselje a hő- és mechanikai terhelés együttes hatását.

A 4 mm-es átmérő esetén minimális deformáció lépett csak fel. Az inzerterek maximális deformációja 0,15-0,2 mm között változott, a visszarugózás közel 100%, csupán néhány század mm maradó deformációt tudtam lemérni a felvételekről (39.ábra).



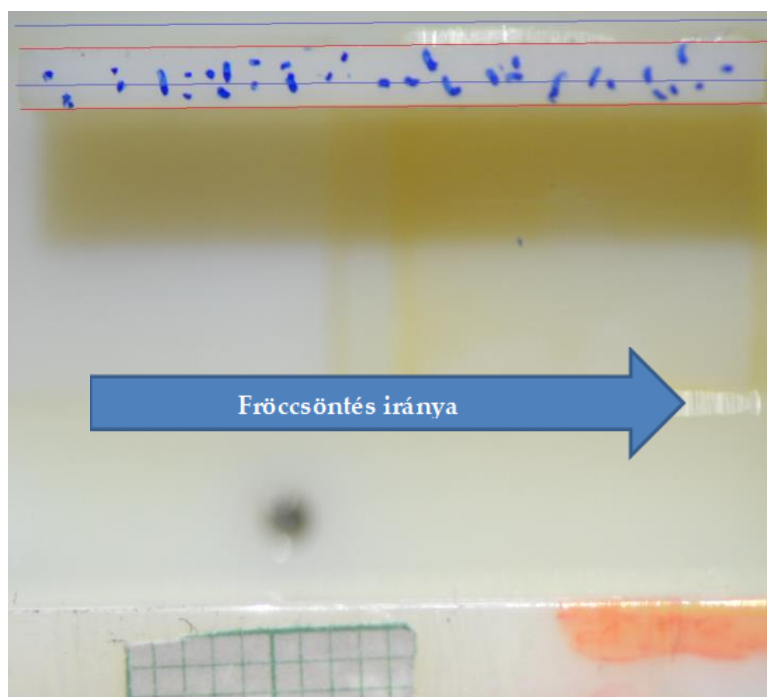
39. ábra 4 mm-es kör keresztmetszetű minta deformációja
(sárga: végleges deformáció, kék: maximális deformáció)

A 6 mm-es átmérő esetén a deformáció négyzetes minták tendenciáját követve nőtt, 0,8-0,95 mm közé esett és visszarugózás is jelentős volt a nyomásesés után, hozzávetőlegesen 60-75% (40.ábra).



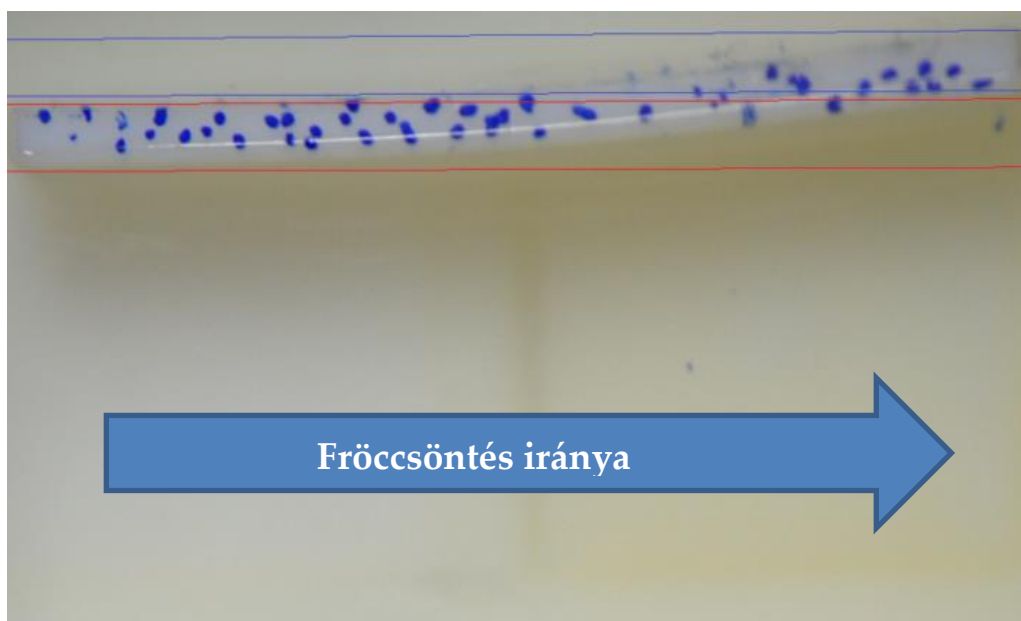
40. ábra 6 mm-es minta deformációja
(sárga: végleges deformáció, kék: maximális deformáció)

A hajlító elrendezés esetén a minták kihajlását vizsgáltam. A 2 mm vastag minták esetén megfigyelhető volt, hogy a nyomásesés után nem történt visszarugózás, ellentétben a korábban vizsgált oszlopos kialakítással. A deformáció mértéke a terhelés után tehát nem változott, 0,75-0,85 mm maradt (41.ábra).



41. ábra 2 mm vastag hajlító inzer deformációja
(piros: nullpont, kék: maximális deformáció)

A vékonyított, 1,5 mm-es minták esetében a mindössze 25% vastagságcsökkenés egy több mint 100%-os deformáció növekedést eredményezett, vagyis ebben az esetben a maximális deformáció 1,65-1,85 mm nagyságrendű volt (42.ábra).



42. ábra 1,5 mm vastagágú hajlító inzer deformációja
(piros: nullpont, kék: maximális deformáció)

A méretváltoztatásokat értékelve elmondható, hogy a keresztmetszet méretének változtatása a vártaknak megfelelően jelentősen befolyásolja a deformáció mértékét,

illetve nagy hatással van a visszarugózásra is. Emellett persze ki kell emelni, hogy a vártakkal ellentétben nem a legnagyobb keresztmetszet esetén történt a legkisebb deformáció, ami bár visszavezethető a homlokfelületek nagyságához és az ezeken keresztül átadott terheléséhez, azonban ahhoz, hogy végső következtetést lehessen levonni, további méréseket kell végrehajtani kisebb méretváltoztatásokkal, hogy kiderüljön egy nagyobb minta esetében is, hogy ez valós feltételezés vagy valami más, akár gyártás, akár mérési pontatlanság, okozta ezt a jelenséget.

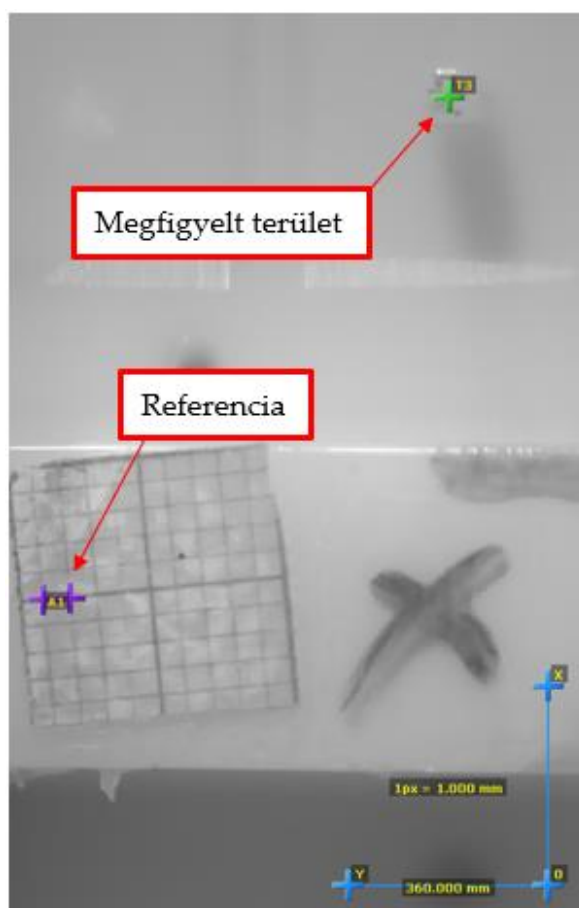
További érdekes tendencia emellett, hogy a kör keresztmetszetű minták esetén a deformáció mértéke kisebb volt, ami visszavezethető a keresztmetszet áramvonalasságára is. Emellett azonban figyelembe kell venni a kialakításnál, hogy a keresztmetszet mérete nem lehet túl kicsi, ugyanis ahogy az 2 mm-es oldalhosszúságú, illetve átmérőjű minták esetében kiderült, hiába volt elvileg áramvonalasabb kialakítású a kör keresztmetszetű inzer, mivel jóval kisebb mérete miatt nem tudta elviselni az őt ért terheléseket és törés következett be, ami a négyzetes minta esetén nem történt meg.

4.4. Mérés kiértékelés DIC felhasználásával

A kézi kiértékelések után elvégeztem egyet DIC felhasználásával is, hogy a korábban kifejtett emberi tényező hatását minimálisra csökkentsem. További előny ebben az esetben a manuális kiértékeléssel szemben, hogy a deformációs folyamatot nem csak egy-egy pontban, hanem az egész időtartam alatt tudom vizsgálni, így nem csak konkrét értékeket, hanem egy deformációs görbét is kaphatok, ami jó összehasonlítási alap szimulációs eredmények megítélésre.

A mérés végrehajtásához, ahogy azt korábban leírtam, nem tudtam használni a programhoz használt mérőberendezést, ezért a nagy felbontású kamera felvételeivel dolgoztam. A program szerencsére lehetőséget ad előre felvett, külső forrásból származó képanyagok elemzésére is, mindössze annyi teendőm volt ehhez, hogy a felvételt külön képkockák sorozataira felbontsam.

Először csak a 7 mm magas, 2x2 mm-es négyzetes keresztmetszetű inzeret és a 1,5 mm vastag pengés elrendeződést vizsgáltam, mivel egyrészt előbbihez készítettünk numerikus számításokat is egy Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat keretein belül [28], és csak ennek az eredményeivel tudom összehasonlítani a szoftver által mért deformációkat, a második esetben pedig olyan gyorsan történt a deformáció, hogy a felvételek lassításával sem tudtam kézi kiértékeléssel megtalálni a maximális deformációt. A mérések végrehajtásához az első képkockán meg kellett határoznom egy referencia méretet, ami alapján a program vizsgálni tudja a deformációt, majd meg kellett adni azt a pontot, amelynek az elmozdulását vizsgálta DIC algoritmus az egyes képkockákon (43.ábra).



43. ábra DIC által használt referencia és a vizsgált pont

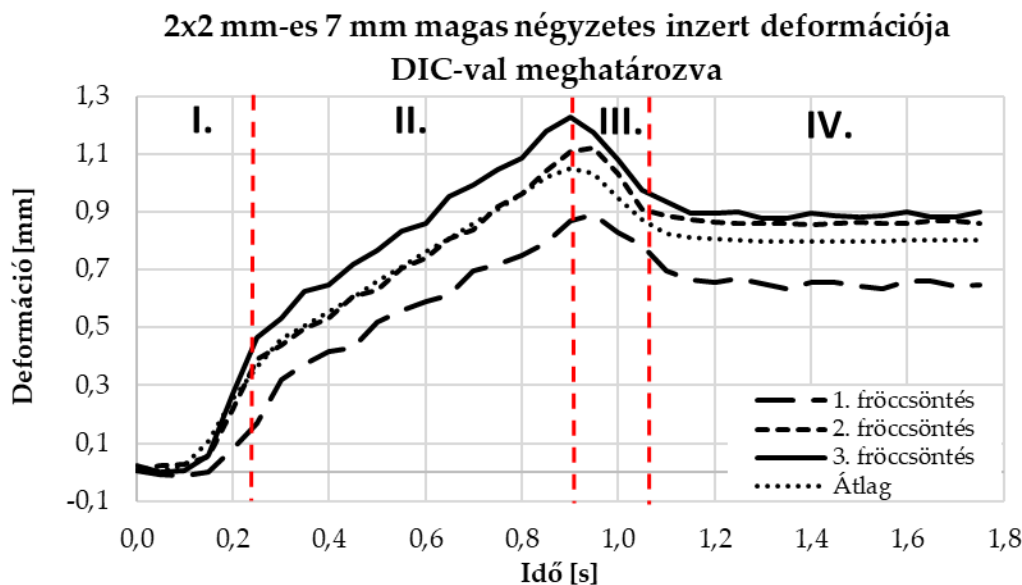
A 7 mm magas inzert esetében bebizonyosodott, hogy a kézi kiértékelés során kapott deformációk jellegre megegyeznek a DIC által kiértékelte eredményekkel, és nagyságukat tekintve is közel hasonlóak, a DIC esetében kicsit nagyobbak. Ennek okát abban véltem felfedezni, hogy a kézi kiértékelés során könnyen előfordulhatott, hogy akár 1-2 képkockával későbbi mintát vizsgáltam, ami jelentősen, akár 20-30%-kal kisebb eredményt is adhatott a DIC eredményei alapján.

Sorszám	Maximális deformáció [mm]	Maradó deformáció [mm]
1	0,893	0,635
2	1,119	0,854
3	1,227	0,879

5. táblázat DIC által mért maximális és maradó deformáció a 7 mm magas, 2x2-es négyzetes inzert esetében

A DIC által kirajzolt görbe 4 szakaszra osztható fel, ahogy az a 44. ábrán is látható. Az első szakasz egy meredeken felfutó rész (44. ábra/I.), ahol a legdrasztikusabb deformáció történik. Ezután egy kisebb meredekségű rész következik hosszabb

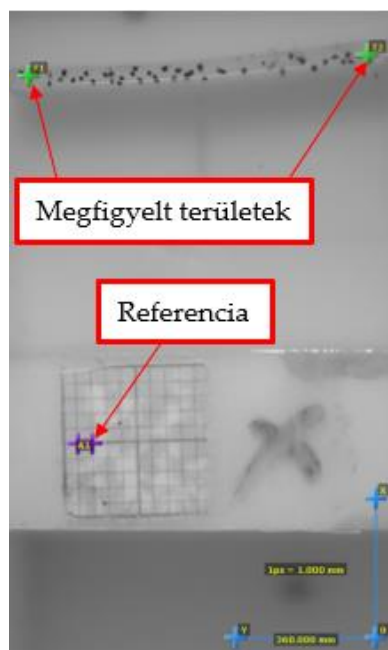
időtartamig (44. ábra/II). Ilyenkor az inzeret deformációjának idő szerinti növekedése lecsökken, mivel a termék mögött már nem levegő, hanem az ömledék található, ami csökkenti a deformáció mértékét, mivel enyhe támasztásként funkcionál ekkor a polimer az inzeret számára. A harmadik szakasz egy lefele tartó rövid rész (44. ábra/III.), ahol a visszarugózás történik, közvetlenül a befröccsöntés folyamata után, a nyomásesés következtében. A legutolsó szakasz pedig egy vízszintes egyenes (44. ábra/IV.), ahol a visszarugózás után beáll a végleges deformáció.



44. ábra: DIC-val meghatározott deformációk és annak átlaga

Érdekes tendenciát mutat emellett, hogy minden egyes fröccsöntéssel nő a deformáció mértéke, ami következhet abból, hogy a hűtőkörcsök hiánya miatt a betét nem húlt vissza eléggé és ebből adódóan az inzeret már a fröccsöntés előtt elkezdett felmelegedni, de a 0,1 mm-es nyomtatási pontatlanság is döntő tényező lehet. Ezen kívül pedig az is szerepet játszhat, hogy a hőtágulás miatt a fémkeretbe bezárt betét elkezd púposodni, ami miatt az inzeret magassága is változik. Ezen felül azt sem lehet kizárni, hogy az inzeret befogása sem végtelenül merev, és a ciklusok előrehaladtával a talpazatot tartó zseb szélei is kilágyultak, amelyek már nem tudták megfelelően tartani a beléjük helyezett inzeretet.

A hajlító próbatest vizsgálata esetében nem egy, hanem két pontot figyeltem, egyet az inzeret egyik, egyet pedig a másik végében, referenciapontnak és távolságnak pedig jelen esetben is a milliméterpapír osztásközét használtam (45. ábra).

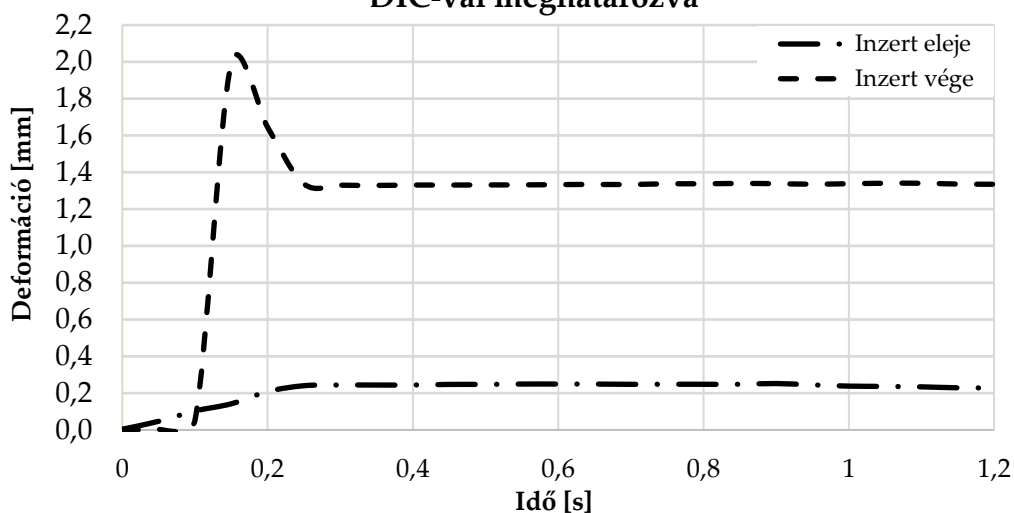


45. ábra: Hajlító inzer deformációjának vizsgálati pontjai

A vizsgálat során kiderült, hogy az előzetes kézi kiértékeléssel ellentétben történt visszarugózás, de nem a befröccsöntés után, hanem közvetlenül az ömledékáram elhaladás után, körülbelül 0,15 másodpercnél és ez olyan rövid ideig tartott, hogy mindössze néhány képkocka mutatja ezt meg (46.ábra). Emellett fontos kiemelni, hogy nem csak az inzer vége, hanem annak eleje is deformálódott, ahogy az a diagrammon is látszik, azonban ez jóval kisebb arányú volt.

1,5 mm vastag hajlító inzer deformációja

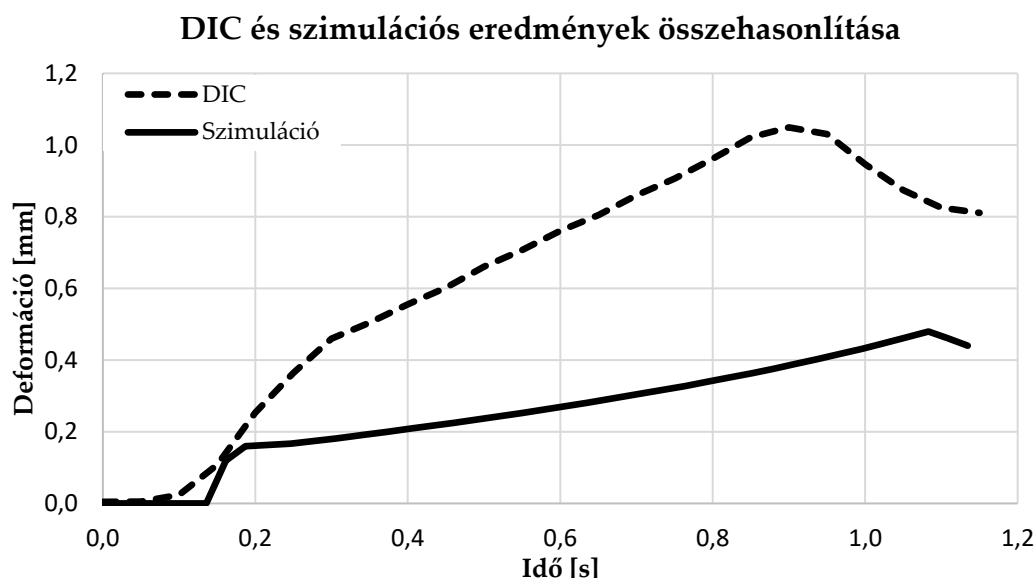
DIC-val meghatározva



46. ábra: Hajlító próbatétel DIC-val meghatározott deformációja

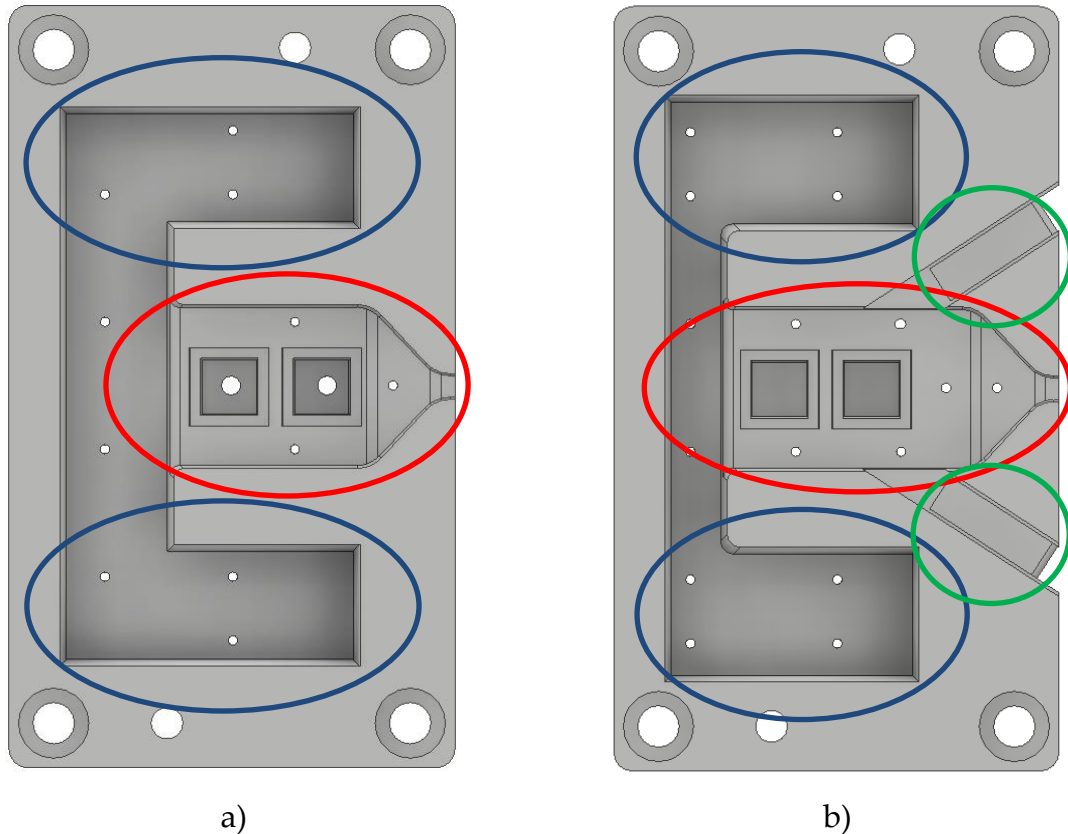
4.4.1. Erőmérés a fröccsöntési ciklus közben

A korábbi Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat [28], melyet társammal közösen készítettünk el, szimulációs eredményekkel hasonlította össze az általam mért deformációs értékeket. Ennél komoly eltérés mutatkozott a valós és a számított eredmények között, ezt mutatja meg a 47.ábra.



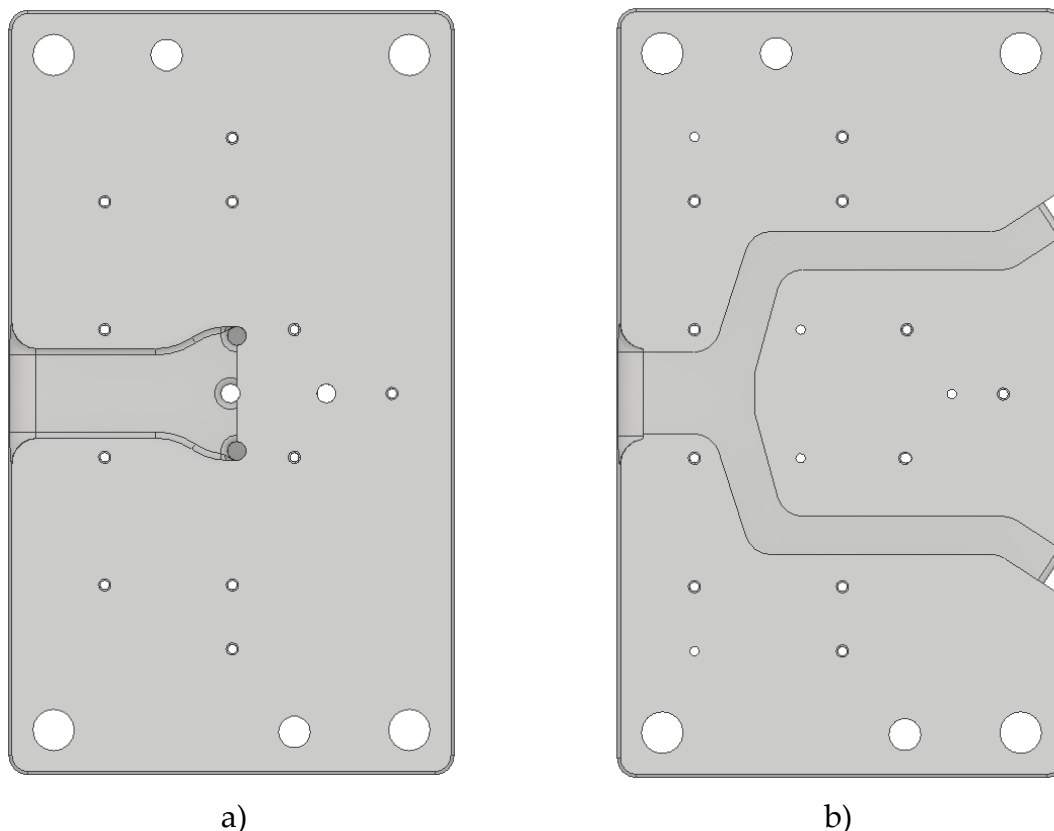
47. ábra Mért és szimulált deformációs értékek összehasonlítása
2x2 mm²-es négyzetes inzertek esetén [28]

Ennek okát keresve, meg akartam vizsgálni, hogy az áramlás által okozott erőhatást pontosan számolta-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 tudjam mérni ezt az értéket, emiatt azt át kellett terveznem, ahogy azt a 48.ábra szemlélteti.



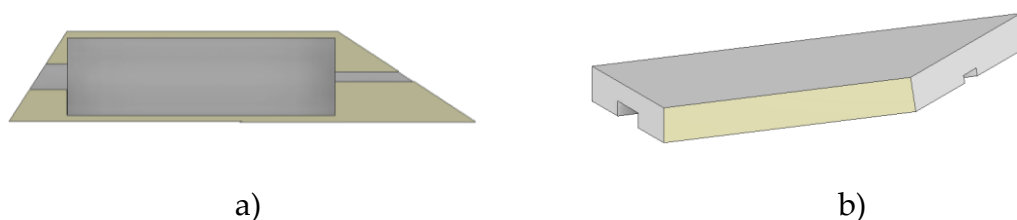
48. ábra A korábbi (a) és az átalakított (b) szerszámvetét felülnézete (vizsgálati terület-piros; tartály-kék; bélyeg helye-zöld)

A betét méretéből (120x90x20 mm) és a szerszám kialakításából adódóan, a fröccsöntés közbeni erők mérésére a nyúlásmérőbélyegek voltak a legalkalmasabbak kis méretük miatt. Az inzertekre közvetlen rá nem tehettem 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. Továbbá költséges is lett volna, mivel minden egyes méréshez új bélyegre lett volna szükség. Ezek az indokok miatt a bélyegeket a betét belsejében kellett elhelyezni és összekapcsolni az inzeretekkel. A kapcsolatot egy fémlemez és egy drót segítségével biztosítottam. 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 akartam dolgozni. Ennek következtében, a befröccsöntési térfogat megtartása mellett megnyújtottam az vizsgálati területet (piros kör), szélesítettem, ugyanakkor rövidítettem a tartályként funkcionáló hátsó területet és a kilököket is átterveztem a fröccsöntő szerszám geometriájának megfelelően. Ezen kívül áttervezésre került a kábelcsatorna is, amelyet a 49.ábra szemléltet.



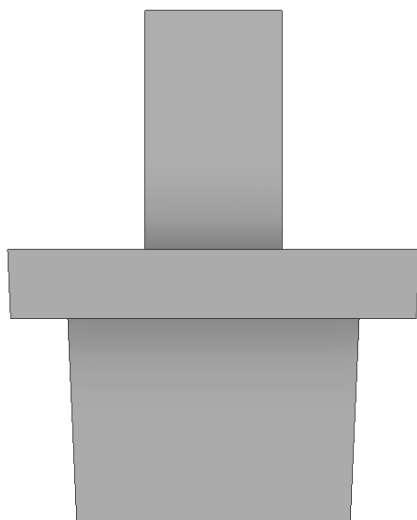
49. ábra A régi (a), illetve az áttervezett szerszámbetét kábelcsatornája

A könnyebb eltávolíthatóság miatt mindkét betét oldalferdeséggel van ellátva. Annak érdekében, hogy a nyúlásmérő bélyeget és a fém lapot, amin rögzítettem, ne lepje el fröccsöntés közben az ömledék, föléjük egy takaróelemet terveztem mindkét oldalra (50.ábra). Ezek alján kivágások találhatóak, hogy a mérést végrehajtó nyúlásmérő bélyegek, illetve az ahhoz használt fém lapok elérjenek, valamint, hogy a réz drótokat és a kábeleket el tudjam vezetni.

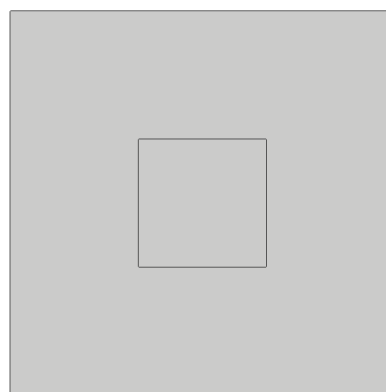


50. ábra A takaró elem alja (a), illetve teteje (b)

Annak érdekében, hogy pontos értékeket kapjak 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 mértem, a kiálló rész csatlakozott a talpazathoz (51.ábra).



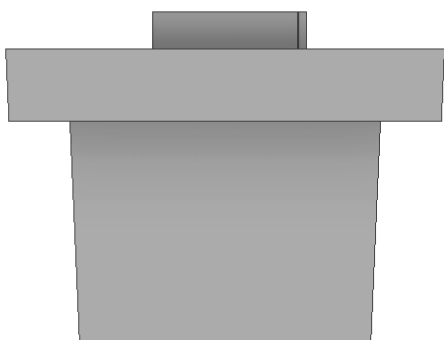
a)



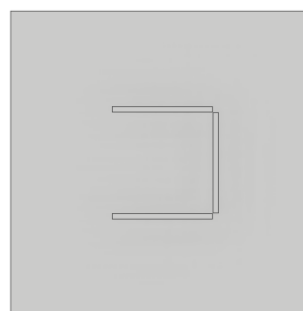
b)

51. ábra Korábbi inzertkialakítás oldal (a) és felülnézete (b)

A mostani kialakítás esetében (52.ábra) azonban a talapzattól 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 dolgoztam, melyeknek magassága minden esetben 7 mm volt.



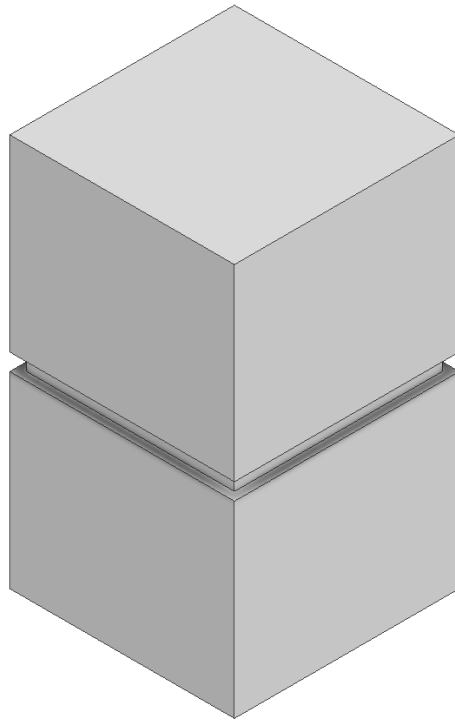
a)



b)

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

A 31/b). ábrán látható zsebbe lehet beilleszteni az inzerteket (53.ábra), amelyeket rézdróttal kötöttem össze a nyúlásmérő által figyelt fémlappal.

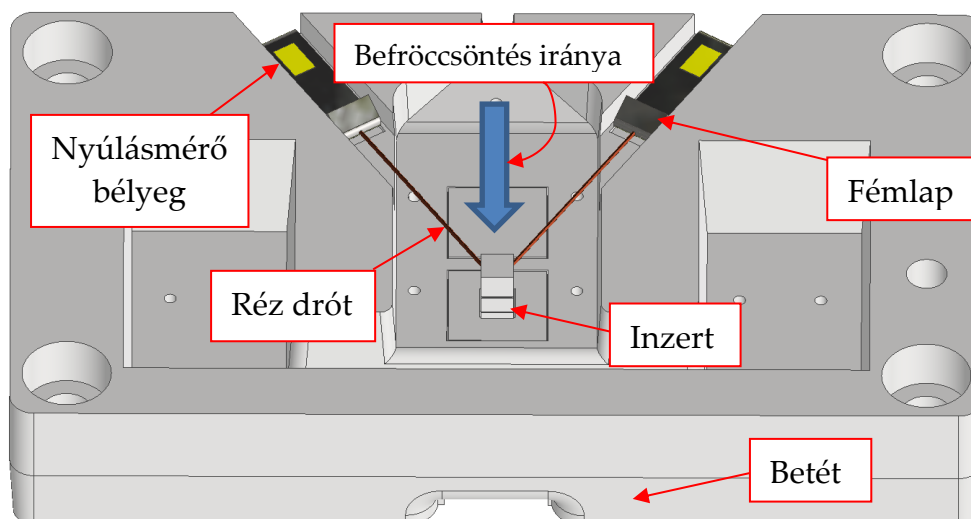


53. ábra Négyzet alapú inzeratkialakítás

4.4.2. Mérés felépítése

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

A nyúlásmérő bélyegek az utólag kialakított üregben található fémlemezeken helyezkedtek el. A fémlemezeket a betét hátuljánál rögzítettem, amelyek így a vizsgálati síkban szabadon tudtak mozogni, ezzel lehetővé téve a mérést. A lemezt másik, ömledéktérhez közelebbi részénél visszahajtottam, hogy abba bele lehessen akasztani a réz drótot, amivel végül a lapot és a vizsgált inzeret összekötöttem. Az egészre ráhelyeztem a korábban bemutatott fedőelemet, amivel egyrészt merevítettem a betétet, másrészt megakadályoztam, hogy az ömledék befolyjon a nyúlásmérőkhöz, amivel tönkre tehetné volna a mérési eredményeket. A teljes konstrukció felépítését mutatja be az 54.ábra.

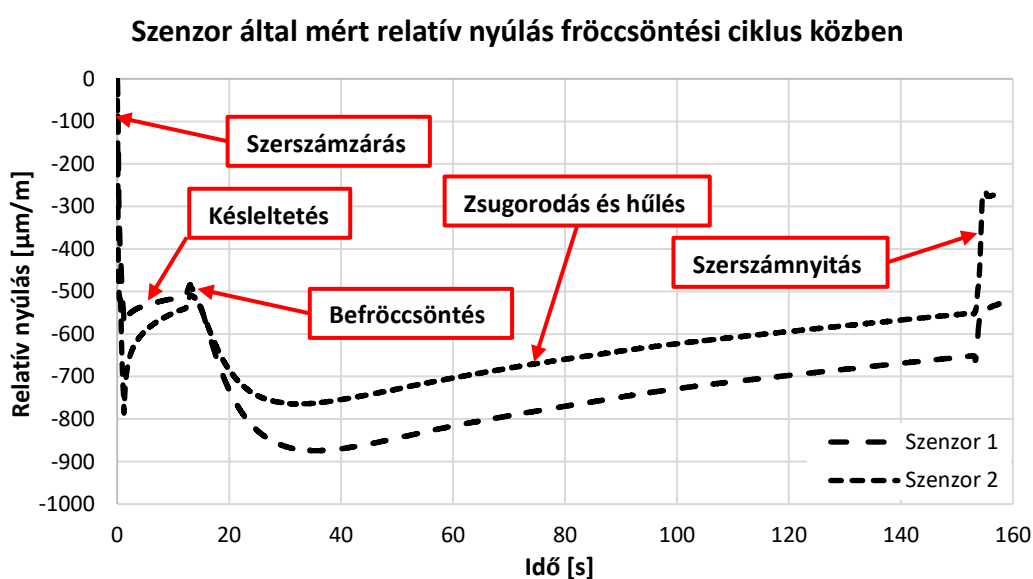


54. ábra Fizikai mérés elvi modellje (fedőelem nélkül)

A mérések során több problémába ütköztem. 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 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 váltottam, amivel már megfelelő méréseket tudtam végezni.

4.4.3. Mérési eredmények kiértékelése

A mérésekből kapott adatokat átlagoltam, majd diagrammban ábrázoltam a relatív nyúlást az idő függvényében (55.ábra).



55. 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 a deformáció csökken, majd befröccsöntés során egy ehhez képest kisebb nyúlás mérhető. Ezek után az ömledék zsugorodása és hűlése ismét nagy mértékű erőhatásnak teszi ki a fém lapot, ami a lehűlés közben folyamatosan csökken. Végül a szerszámnyitásnál ismét egy nagyobb mértékű kilengés tapasztalható.

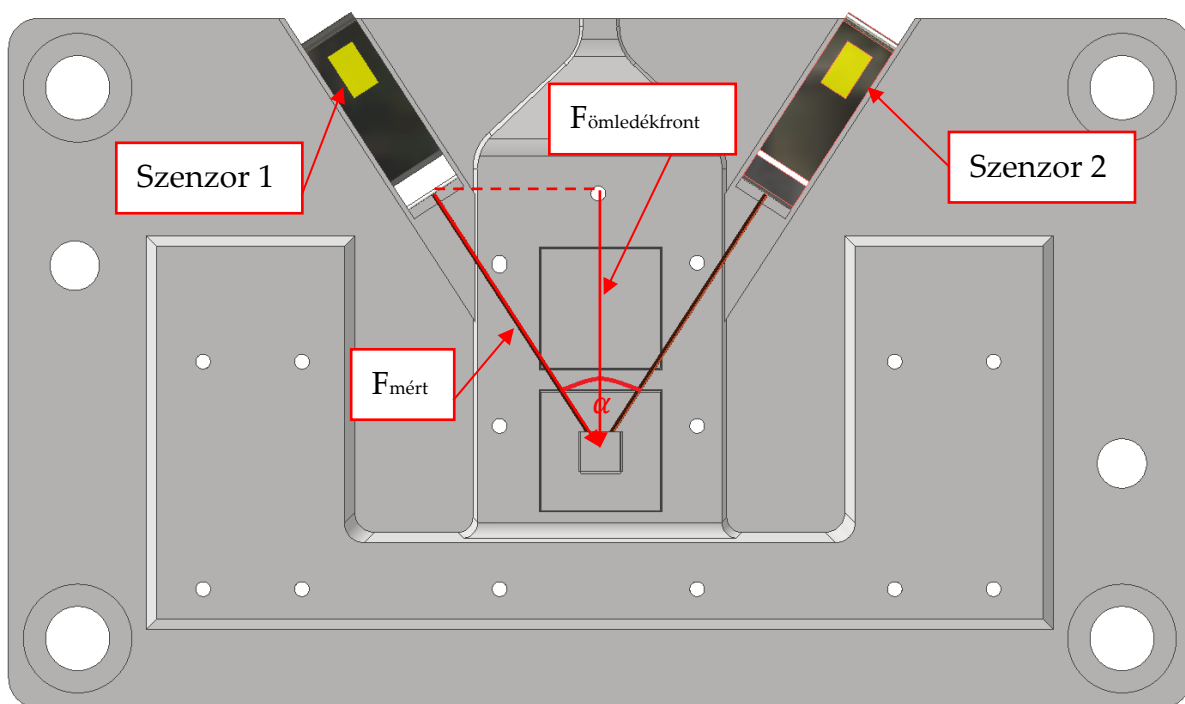
Ezek közül az erőhatások közül a befröccsöntés folyamata az, ami a korábbi mérések és szimulációk ellenőrzése szempontjából hasznos számomra, így ezt a görbeszakaszt vizsgáltam elsődlegesen. Az eredményekből megállapítottam, hogy a mérések konzisztensek és közel egységes eredményeket adtak. Ebből arra lehet következtetni, hogy a mérések hasonló körülmények és erőhatások mellett játszódtak le.

A kapott relatívnyúlásokkal és a fémlap rugalmassági modulusával ki tudtam számítani a feszültség értékeket a Hooke-törvény segítségével az alábbi módon (12):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (12)$$

ahol σ a feszültség MPa-ban, E a fémlap rugalmassági modulusa szintén MPa-ban, ε 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 56.ábra is mutatja.



56. ábra Erőkomponensek a mérés során

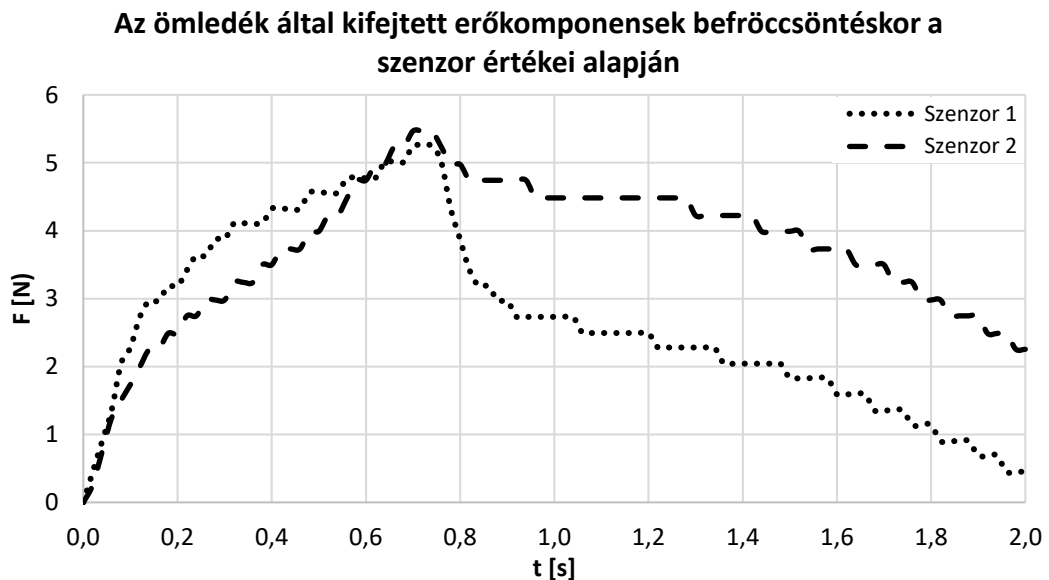
Ezek alapján az inzertre ható ömledékfront által kifejtett erő (13):

$$F_{\text{szenzor}} = F_{\text{mért}} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = F_{\text{mért}} \cdot \cos\left(\frac{66}{2}\right), \quad (13)$$

ahol F_{szenzor} a szenzor mérése alapján az ömledékfront által az inzertre kifejtett erő N-ban, $F_{\text{mért}}$ a fémlapra ható erő mértéke szintén N-ban, α pedig a konstrukcióból adódó szög, a kettes szorzó pedig a két szenzorból adódik. Az ömledékfront által kifejtett erőt pedig a két szenzor által érték összege adja meg (14):

$$F_{\text{ömledékfront}} = F_{\text{szenzor1}} + F_{\text{szenzor2}}, \quad (14)$$

ahol F_{szenzor1} és F_{szenzor2} a nyúlásmérő értékeiből számolt erőhatások, $F_{\text{ömledékfront}}$ pedig a teljes erőhatás N-ban. Az így számított eredményeket ezek után diagramokban ábrázoltam (57.ábra).



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

A két szenzor értékei közti eltérésben több ok 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.

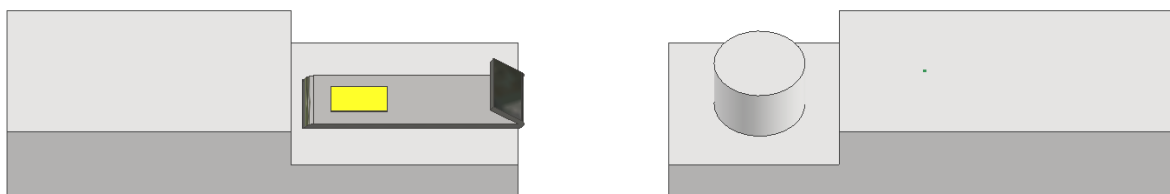
Ez az erő összhangban van a szimulációban kapott értékekkel, 1-2 N-os eltérések vannak csupán például a CFD-s számításokhoz képest [29]. Mindezekkel együtt elmondható, hogy a mért és a számított erőértékek között nincs nagyságrendi eltérés,

ami alapján kijelenthető, hogy a két deformációs érték közötti nagyságrendi eltérést nem ez okozta elsősorban.

4.4.4. Nyúlásmérő szenzorok kalibrációja

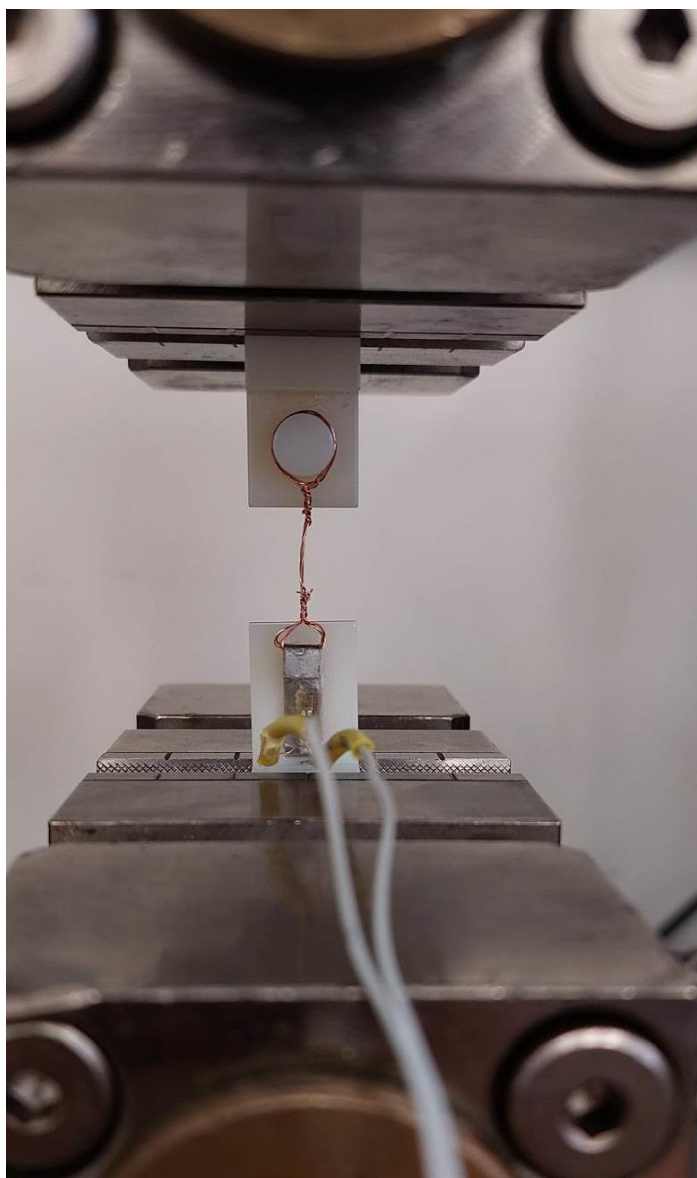
Az eredmények hitelesítéséhez, a korábban említett ragasztási pontatlanságokból adódó eltérések és egyéb pontosítások miatt elvégeztem egy kalibrációs vizsgálatot. Ennek során a két nyúlásmérő bélyeget a korábban bemutatott fémlapokkal egy szakítógépben terheltem, ami során rögzíttem mind a szakítógép, mind a nyúlásmérő bélyeg által mért értékeket. Ennek köszönhetően meg lehet állapítani, hogy a valós erőviszonyokhoz képest milyen értékeket mért a bélyeg és ezzel a korrelációt megállapítani a mért és valós erőviszonyok között.

Ehhez egy külön mérőeszközt kellett terveznem, mivel magában a hajlított fémlapot nem tudnám megfelelően befogni a szakítógépbe. A konstrukció, amelyet a 58.ábra mutat be két részből áll. Az egyik felébe az ennek kialakítható kis zsebbe be lehet csúsztatni a hátrahajlított részét a lemeznek, amely így a szoros illesztés miatt egyből rögzítve van. A szakítógép másik befogó pófájába lévő elemre pedig rá lehet tekerni a rézdrótot, így összekötve a két részt.



58. ábra Kalibrációs méréshez használt mérési összeállítás modellje

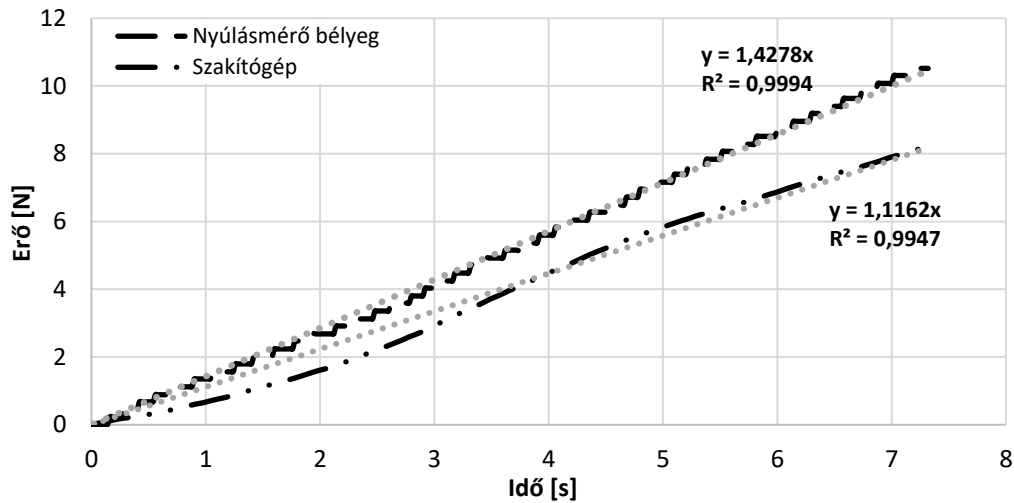
A kalibrációs mérések során több problémába futottam. Az első mérések során felmerült az a probléma, hogy a megsodort rézdrótok a mérések alatt nem tudták megfelelően tartani az alakjukat és nagyobb terhelés során egyszerűen szétcsúsztak. Ez az erőérték, ahol ez bekövetkezett, nagyobb volt, mint a befröccsöntés során mért erőhatások, azonban mivel a lemez a rászorult fedő a mérések során terhelte a lemezt, így azzal az erőhatással is számolnom kellett a kalibráció során, amit viszont már a rézdrót nem viselt el. Ennek okán a rézdrótok sodort végén pillanatragasztó segítségével rögzítettem, ezzel elkerülve az esetleges szétcsúszást. A végleges mérési összeállítást mutatja be a 59.ábra.



59. ábra Mérési konstrukció a kalibrációhoz

A kapott eredmények azt mutatták, hogy a szakítógéppel, illetve nyúlásmérő bélyeg által rögzített erőértékek között eltérés tapasztalható (60. ábra). Sajnos a réz drót terhelhetősége miatt nem tudtam azt a teljes erőtartományt vizsgálni. A befröccsöntés során annak ellenére, hogy csak 10 N körüli erők hatottak az inzertra, magára a fémlapra a rászorított fedő miatt nagyobb erők is hatottak, amivel számolni akartam, azonban ezt a tartományt nem tudtam megközelíteni a kalibráció során, mivel a fém drótok majdnem minden esetben 40 N körüli erőnél elszakadtak. Ebből azonban azt a következtetést is lehet vonni, hogy nagy eséllyel az inzer se szenvedhetett el nagyobb terhelést befröccsöntés során, mivel akkor abban az esetben is el kellett volna szakadnia a rézdrótnak, ami nem történt meg.

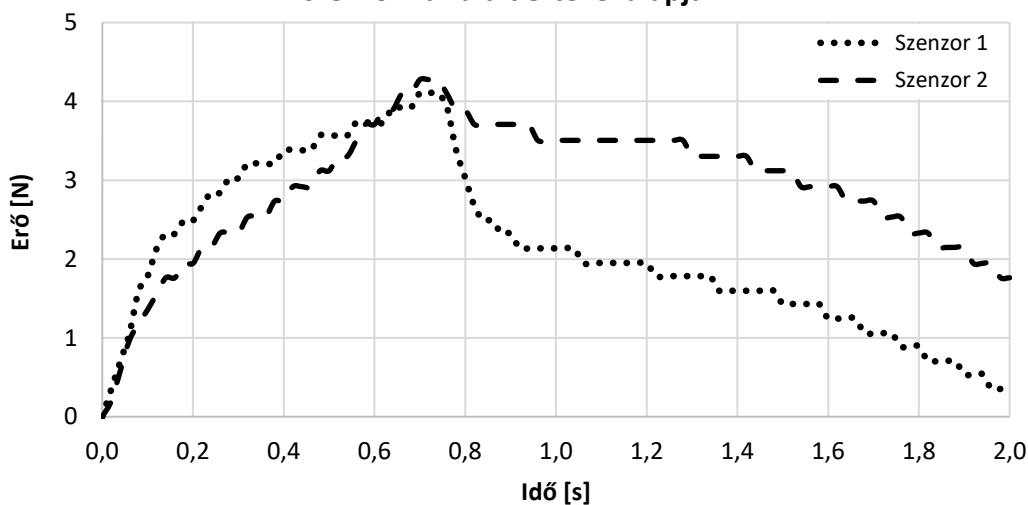
A szakítógép és az nyúlásmérő bélyeg által mért erők kalibrációja



60. ábra Nyúlásmérő bélyeg kalibrációja szakítógép segítségével

Az eredményeket tekintve el lehet mondani, hogy mindkét erőérték lineárisan nő az idő függvényében, illetve kis értékeknél, amelyeknél az általam vizsgált erőhatások történtek, kis mértékű eltérések jelentkeznek, aminek köszönhetően az eredmények a kalibráció következtében se változtak nagy mértékben. Sajnos azonban meg kell jegyezni, hogy a kalibrációt nem lehetett teljes mértékben elvégezni, mivel az egyik nyúlásmérő szenzor meghibásodott, így annak a kalibrációját nem tudtam végrehajtani. Ennek okán ennél a szenzornál is másik szenzornál kapott értékkel korrigáltam az eredményeket. Ezek alapján kapott erőértékeket mutatja a 61. ábra.

Az ömledék által kifejtett erőkomponensek befröccsöntéskor a szenzor kalibrált értékei alapján



61. ábra Az ömledék által az inzeretre kifejtett erőértékek kalibrálás után

Ezt vizsgálva a maximális erőérték 8,38 *N*-ra adódott, ami valamivel kisebb, mint a szimulációs értékek, így nagy valószínűséggel kijelenthető, hogy a mért és számolt deformációs értékek között nem az erőértékek számítása jelentette az eltérést.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

5.1. Magyar nyelvű összefoglaló

Diplomamunkámban megvizsgáltam a polimer inzertek fröccsöntés közbeni deformációjának mérési lehetőségeit és azok értékeit. Több különböző geometriát vizsgáltam, amely során kiderült, a homlokfelület és a keresztmetszet méretének hatása egyaránt hat a deformáció mértékére és jellegére, azonban az inzert növekedésének mértéke nem áll fordított arányosságban a deformáció csökkenésével. Ezt támasztja alá, hogy a közepes méretű minták esetén volt a legkisebb a deformáció mértéke, nem pedig a legnagyobb, legvastagabb minták esetén, ahol a nagy homlokfelület miatt nagy erőhatások érték az inzerteket.

Ezen kívül megállapítottam, hogy a keresztmetszet alakja is döntően befolyásolja a deformáció mértéket, és egy ilyen jellegű termék esetén figyelembe kell venni azt az irányt, amely felől az inzertet megközelíti az ömledék.

Vizsgálatokat végeztem a gyártási pontatlanságok hatásának feltérképezésére, amelyek során megállapítottam, hogy a gyártási pontatlanság is nagy mértékben tudja befolyásolni a deformáció mértékét. A névleges mérethez képest deformáció a mértéke nagy mértékben eltérhet már kis mértékű pontatlanság esetén, és bizonyos esetekben ez töréshez is vezethet, amely miatt kimondható, hogy az inzertek egyes geometriáira igen szigorú méretpontosságot kell előírni, hogy gyártás során megfelelően elviseljék az adott deformációt. Mindezek mellett azonban meg kell jegyezni, hogy kis mértékű túlfedésnél minimalizálni lehetett a deformációs értékeket, ami egy érdekes és jövőben megvizsgálandó jelenség, mivel ennek segítségével talán csökkenteni lehet az erőhatások befolyását egy polimer inzert esetén.

Legvégül, a korábbi TDK dolgozatomban a számolt és mért deformációs értékek között, tapasztalt eltérések miatt megvizsgáltam, hogy ezt az eltérést az erőhatások pontatlansága okozza-e. Ennek vizsgálatához egy módosított szerszámbetét-konstrukciót alakítottam ki, amely felhasználásával nyúlásmérő bélyegekkkel mérni tudtam az inzerteket ért erőhatásokat. A kapott értékeket kalibráció segítségével hitelesítettem. Megállapítottam, hogy a mért erőértékek megfelelnek a numerikus számítások eredményeivel, így megállapítható, hogy nem elsősorban ez okozta az eltérést a számolt és mért deformáció érték között.

5.2. Idegen nyelvű összefoglaló

In my thesis I investigated the deformation values of polymer inserts during injection moulding. I investigated several different geometries, which showed that both the amount and nature of deformation is affected by the size of the frontal surface and the cross-section, but that it is not a linear process. This is supported by the fact that the medium sized specimens had the smallest deformation rates, rather than the largest, thickest specimens, where the large frontal area meant that the inserts were subjected to large forces.

In addition, I found that the shape of the cross-section also has a decisive influence on the degree of deformation, and that the direction from which the inserts are approached by the slurry should be taken into account for a product of this type.

I have then concluded that manufacturing inaccuracies can also have a major influence on the degree of deformation. The degree of deformation relative to the nominal size can vary greatly even for small inaccuracies and in some cases can lead to fracture, which means that very strict dimensional accuracy must be specified for certain geometries of inserts to ensure that they can withstand the deformation during manufacture. However, it should be noted that for small overlaps, deformation values could be minimised, which is an interesting phenomenon to be investigated in the future, as it may help to reduce the importance of force effects in a polymer insulator. Finally, due to the discrepancies between the simulated and real deformation values observed in my previous TDK thesis, I investigated whether this phenomenon is caused by inaccuracies in the force effects caused by the injection moulding conditions obtained in the simulation. For this purpose, I developed a modified tool insert design, which allowed me to measure the forces on the inserts using strain gauges. The values obtained were validated by calibration. I found that the force values obtained corresponded to those obtained in the numerical calculations, so it can be concluded that this was not the main cause of the discrepancy between the two values.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. Dunai A., Macskási L.: Műanyagok fröccsöntése, Lexica Kiadó, Budapest (2003)
2. Kovács J. G.: Fröccsöntött termékek tervezése és szimulációja, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép szerkezetek Intézet (2007)
3. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest (2006)
4. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Polimertechnika Tanszék: Hőre lágyuló polimerek fröccsöntése című laborsegédlete (2019)
5. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Polimertechnika Tanszék: Fröccsöntés című laborsegédlete (2019)
6. R. Spencer, G. Gilmore, R. M. Willey: Behavior of Granulated Polymers under Pressure, Journal of Applied Polymer Science, Volume 21, 1950, 527-531
7. Kazmer, D. O.: Injection Mold Design Engineering, Hanser Publications, Cincinnati, második kiadás (2016)
8. Kovács J.G.: Gyors prototípus eljárások I. Az elmélet és annak felülvizsgálata, Műanyag és Gumi, 39, 2002, 46-50
9. Kovács J.G.: Gyors prototípus eljárások II. Gyakorlati megvalósítások, Műanyag és Gumi, 39, 2002, 103-107
10. I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker: Additive Manufacturing Technologies, Springer, New York, (2015)
11. Kovács N. K.: Prototípus fröccsöntő szerszámozás technológiájának fejlesztése. PhD értekezés. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki kar, Polimertechnika Tanszék (2014)
12. Omer Sagi: White Paper: PolyJet Matrix Technology A New Direction in 3D Printing (2009)
13. A. Kęsy, J. Kotliński: Mechanical properties of parts produced by using polymer jetting technology, Archives of civil and mechanical engineering, 10/3, 2010, 37-50
14. J.S. Colton, J. Crawford, G. Pham, V. Rodet: Failure of Rapid Prototype Molds during Injection Molding, Atlanta (2001)
15. Béda Gy.: Szilárdságtan, Műegyetemi kiadó, Budapest (1996)
16. Lajos T.: Az áramlástan alapjai, Műegyetemi kiadó, Budapest (2004)
17. S. Rahmati, P. Dickens: Rapid tooling analysis of Stereolithography injection mould tooling, Tehran (2006)
18. M. Heinle, D. Drummer: Measuring mechanical stresses on inserts during injection molding, Advances in Mechanical Engineering, Volume 7(5) 1-6 (2015)

19. https://www.molgroupchemicals.com/userfiles/products/68/68_tds_hu.pdf
(2020.04.)
20. Strarasy Vero Material Data Sheet VeroWhitePlus
21. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=181&l=m> (2022.12.05.)
22. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=193&l=m> (2022.12.05.)
23. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=162&l=m> (2022.12.05.)
24. https://www.nikon.hu/hu_HU/product/nikkor-lenses/auto-focus-lenses/fx/zoom/af-s-nikkor-28-300mm-f-3-5-5-6g-ed-vr (2022.12.05.)
25. <http://www.kaliberkft.hu/documents/9EE4FDDDD3F6D411BAD7984342F7984C7B5C65FC1.html> (2022.12.05.)
26. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=29&l=m> (2022.12.05.)
27. Tari G., Szabó F., Suplicz A.: Áramlási egyenetlenségek valós idejű elemzése fröccsöntő szerszámban, Polimerek Műanyagipari Szaklap, V. évfolyam, 3. szám, 424-428 (2019)
28. Hajagos Sz., Széplaki P.: Polimer inzert fröccsöntési ciklus közbeni deformációjának mérése és modellezése, Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat, Polimer Technológia szekció (2021)
29. Hajagos Sz., Széplaki P.: Polimer inzert fröccsöntés közbeni deformációjának vizsgálata és szimulációjának pontosítása, Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat, Polimer Technológia szekció (2022)