

Polimer fröccsöntő inzerterek deformációs viselkedésének modellezése numerikus számításokkal

Numerical analysis of the deformation behaviour of polymer injection molding inserts

HAJAGOS Szabolcs¹ PhD hallgató, ZINK Béla² adjunktus

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék,
H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., +36-1-463-1459,
e-mail: ¹ hajagosz@pt.bme.hu, ² zink@pt.bme.hu

Abstract

In our work, we have modelled polymer injection molding inserts by numerical analysis. These inserts are subjected to high thermal and mechanical stresses during the injection molding process and that is why it is important to understand the process of these stresses. As a first step, the forces acting on the inserts were investigated and then the whole deformation process was modelled. Afterwards, the accuracy of the calculations was checked by comparing the calculated and measured values, which show good agreement.

Keywords: injection molding, insert, deformation, numerical simulation, additive manufacturing

Kivonat

Munkánk során numerikus számításokkal modelleztünk polimer alapanyagú fröccsöntő inzertereket. Ezeket az inzertereket a fröccsöntési folyamat során nagy termikus és mechanikai igénybevételek terhelik, ezért fontos megismerni ezeknek a terheléseknek a folyamatát. Ennek első lépéseként az inzertereket érő erőket vizsgáltuk meg, majd a teljes deformációs folyamatot modelleztük. Ezek után a számítások pontosságát ellenőriztük a számított és mért értékeket összehasonlításával és ezek jó egyezést mutatnak egymással.

Kulcsszavak: fröccsöntés, inzerter, deformáció, numerikus szimuláció, additív gyártástechnológia

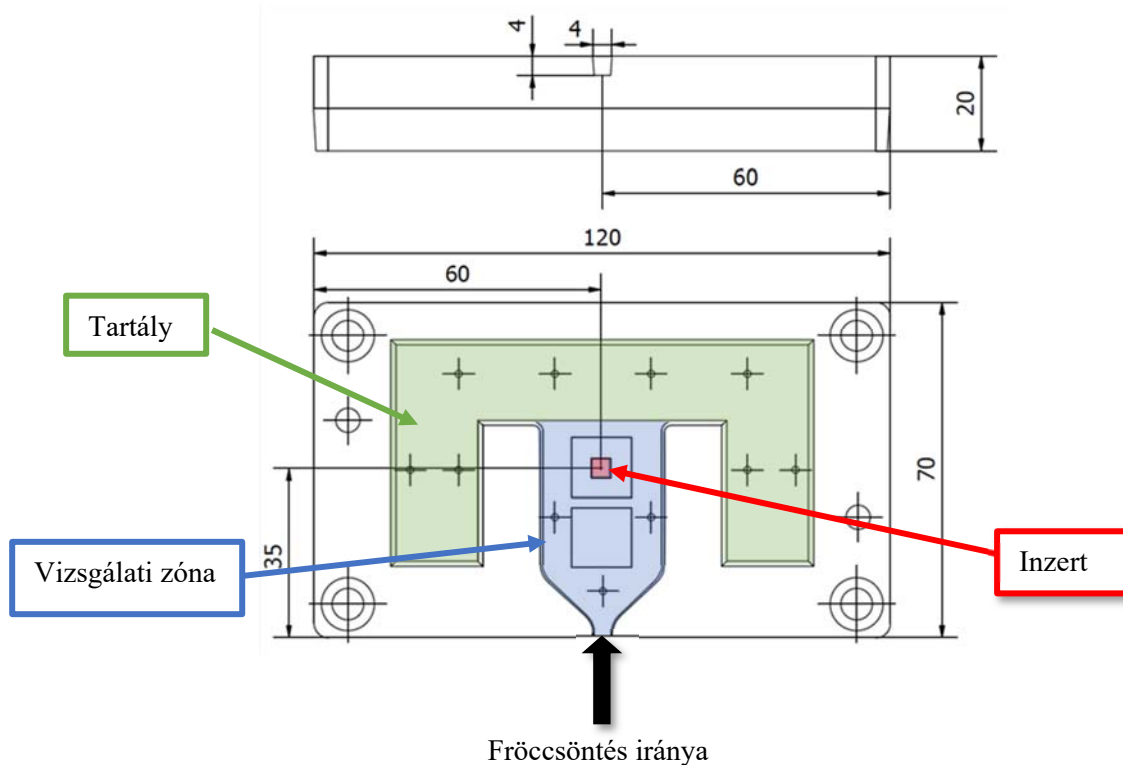
1. Bevezetés

A mai gazdaság egyik meghatározó eleme a műanyagipar, beleértve az alapanyag-előállítás és a feldolgozást is. Az egyik legelterjedtebb polimer feldolgozási módszer a fröccsöntés, Magyarországon 2018-ban 328 000 tonna terméket állítottak elő ezzel a technológiával [1].

A fröccsöntéssel előállított termékekbe lehetőség van előgyártmányok elhelyezésére, ezek előre, egy külön eljárással előállított alkatrészek, amelyek fröccsöntési ciklus elején, a befröccsöntés előtt kerülnek be a szerszámba. Munkánk során olyan előgyártmányokat (továbbiakban inzerterek) vizsgáltunk, amelyek additív gyártástechnológiával készültek és a kész alkatrész erősítésére szolgálnak. Ezeket az inzertereket a fröccsöntési ciklus során mind mechanikai mind termikus terhelések is érik és ezeknek ellen kell tudnia állni, ahhoz, hogy megfelelően tudja erősíteni a kész alkatrészt. Fő célunk az inzertereket ért mechanikai terhelések megismerése és numerikus számítása. A numerikus számítások felhasználásával könnyen megismerhető a fröccsöntési ciklus során lejátszódó folyamatok így az ilyen inzerterek tervezéséhez nagy segítséget nyújtanak.

2. Kísérleti rész

A számítások során használt szerszámbetét geometriát az 1.ábra mutatja be. A számítások egyszerűsítése érdekében egyszerű geometriákat vizsgáltunk, amelyek esetében a legfőbb igénybevétel a nyírás volt. Ilyen egyszerű geometriák a négyzet alapú hasábok és a kör keresztmetszetű rudak. Az alkalmazott inzerterek méreteit pedig az 1.táblázat mutatja be.



1.ábra: A modellezés során használt szerszámbetét kialakítás (semikus ábra)

Inzertek jellemzői méretei és keresztmetszeteinek méretei

1. táblázat

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

A modellezés során mind a szerszámbetét, mind az inzertek alapanyagául FullCure 835 fotopolimer anyagot választottunk. Ez az anyag epoxi-akrilát alapú fotopolimer, amelyet PolyJet technológiával dolgoznak fel. A fröccsöntéshez szolgáló alapanyagul pedig a MOL Petrolkémia Zrt. H145F polipropilénjét választottuk, ez egy széleskörben használt homopolimer alapanyag.

A numerikus számításokhoz szükségünk volt a szerszámbetét és az inzert alapanyagának fajhőjének változására a hőmérséklet függvényében. Ehhez egy differenciál pásztázó kalorimetriai analízisnek (DSC- differential scanning calorimetry) vetettük alá. Ezt egy TA Instruments DSC Q2000 berendezésen végeztük és a következő paramétereket alkalmaztuk:

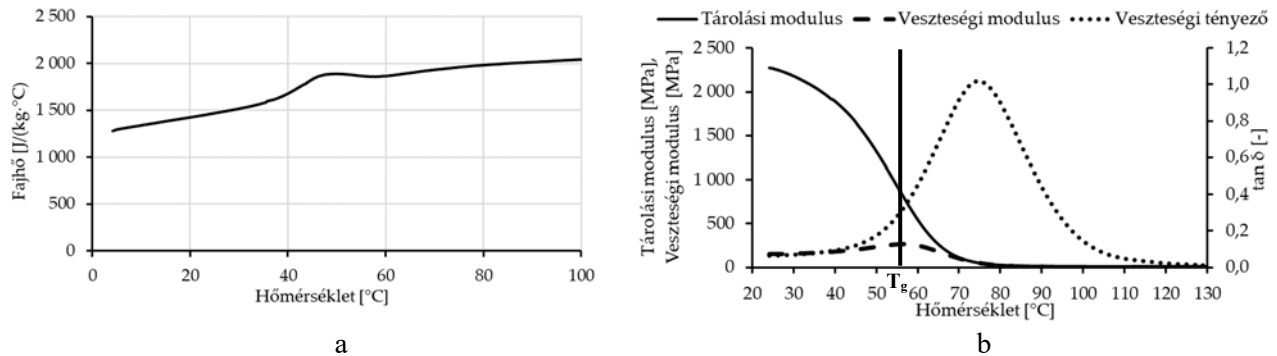
- mérési ciklus: egyszeri felfűtési program,
- minta tömege: 10,2 [mg],
- hőmérséklettartomány: 0- 220 [°C],
- fűtési sebesség: 10 [°C/min],
- nitrogén gáz közeg, gázáramlás: 50 [ml/perc].

Továbbá szükségünk volt ennek az alapanyag tulajdonságainak hőmérsékletfüggésére, illetve üvegesedési hőmérsékletére, ehhez egy dinamikus mechanikai analízisnek (DMA- dynamic mechanical analysis) is alávetettük. Ezt egy TA Instruments DMA Q800 berendezésen végeztük és a következő paramétereket alkalmaztuk:

- hőmérséklettartomány: 24- 130 [°C],
- felfűtés sebessége: 5 [°C/perc],
- mintára ható feszültség frekvenciája: 1 [Hz],

- amplitúdó: 10 [μm],
- mérőfej: dual cantilever,
- próbatest méretei: 35x10x4 [mm].

A DSC mérés után a fahő hőmérsékletfüggését az 2/a.ábra mutatja, A DMA mérés után ábrázoltuk a tárolási és veszteségi modulusot, illetve a veszteségi tényező értékét is a hőmérséklet függvényében ezt mutatja az 2/b.ábra. A DMA mérés eredményéből meghatároztuk az alapanyag üvegesedési hőmérsékletét (a veszteségi modulus maximumához tartozó hőmérséklet), ami körülbelül 56°C.



2. ábra. FullCure 835 fotopolimer fahője a hőmérséklet függvényében (a) és DMA görbéi (b)

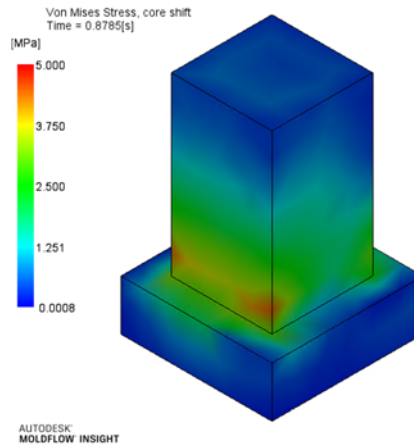
2.1. Inzertet érő erők számítása

Az inzertekre ható erők meghatározásához két különböző szimulációs programot is használtunk. Az első numerikus számításokat az Autodesk CFD 2023-ban végeztük el. Első lépésként Autodesk Inventor segítségével modelleztük az ömledékteret, illetve az áramlási térben lévő inzertet. Ezt a modellt importáltuk be a CFD programba. A polimer ömledéket fluid-ként, az inzertet solid-ként definiáltuk. Az ömledéktér alapanyagtulajdonságait, a Moldex3D fröccsöntő szimulációs program adatbázisból importáltuk ki. Az inzert alapanyagtulajdonságai közül pedig a sűrűséget, a fahőt és a hővezetési tényezőt adtuk meg. A fahőt a DSC mérésünk alapján adtuk meg, míg a sűrűséget és a hővezetési tényezőt a szakirodalomból határoztuk meg [2, 3]. Az alapanyagtulajdonságok megadása után meghatároztuk a szükséges perem- és kezdetifeltételeket. A peremfeltételek a következők voltak: az áramlási tér belépő felületén a térfogatáram 40 cm³/s, az áramlási tér kilépő felületén a nyomás 0, az áramlási tér palástfelületein a sebesség minden irányban 0, az inzert felületén a sebesség minden irányban 0. Kezdetifeltételek pedig az egyes térfogatoknak a kezdőhőmérsékletét adtam meg: áramlási térben a hőmérséklet 200°C, inzert teljes térfogatában pedig 23°C. A következő lépés a modell hálózása volt. Ezt automatikus hálózással végeztük el. A felületi finomítás: kikapcsolva, a hézag finomítás: kikapcsolva. Ezek után tudtuk a számításokat elvégezni, amely során az áramlást lamináris, stacioner áramlásként modelleztük. Ezt a folyamatot minden egyes inzertgeometriára elvégeztük.

Az Autodesk CFD 2023 után az Autodesk Moldflow Insight 2021-ben segítségével is modelleztük a folyamatot. A program lehetőséget ad egy úgynevezett core shift analízisre, amely felhasználásával a szerszámínzertek deformációját is tudtuk számolni, valamint bennük ébredő feszültségeket is meg tudtuk határozni. Ennek első lépéseként a korábban, az Autodesk Inventorban elkészített modellt importáltuk be a szoftverbe, majd hálóztuk, ezúttal tetragonális 3D-s elemekkel. A hálózás során 1 mm oldalhosszúságú elemeket használtunk. Az inzert és az ömledékteret külön részként kezeltük és a hálózás során figyeltünk arra, hogy a két rész találkozásánál az elemek pontosan találkozzanak egymással. Ezek után kényszerítettük a modellt, az inzert alsó, nagyobb oldalhosszúsággal rendelkező része nem ér bele az ömledéktérbe, itt alkalmaztuk a megfogást mindhárom irányban. Fixed constrain-t használtunk, ami meggátolja a csomópontok elmozdulását és elfordulását is, ügyelve arra, hogy az inzert és a talprész csatlakozásánál lévő csomópontokat ne fogjuk meg. Utolsó lépésként megadtuk az anyagtulajdonságokat, a fröccsöntési paramétereket és lefuttattuk az analízist. Az alapanyagtulajdonságokat mind a fröccsöntésre használt polimerre, mind az inzertre megadtuk. A fröccsöntésre használt polimer esetében a program adatbázisában nem volt megtalálható, így itt is a Moldex3D programból importáltuk. Az inzert alapanyagának tulajdonságait mi adtuk meg a programnak, úgy, mint a sűrűség (1,17 g/cm³), fahő (1467 J/kg°C), rugalmassági modulus (2500 MPa) és Poisson-tényező (0,37).

A fröccsöntési paraméterek pedig a következők voltak: szerszámhőmérséklet: 25°C, ömledék hőmérséklet: 200°C, fröccssebeség: 40 cm³/s, az átkapcsolás 99%-os kitöltöttségnél történik meg,

Core shift analízis a befröccsöntési szakaszban is aktív és a Core shift analízis 5%-os kitöltöttségi lépésenként történik meg. Ezek után tudtuk a számításokat lefuttatni és eredményül megkaptuk az inzertek feszültségeloszlását. A 4 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzert feszültségeloszlását mutatja be a 3.ábra.



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

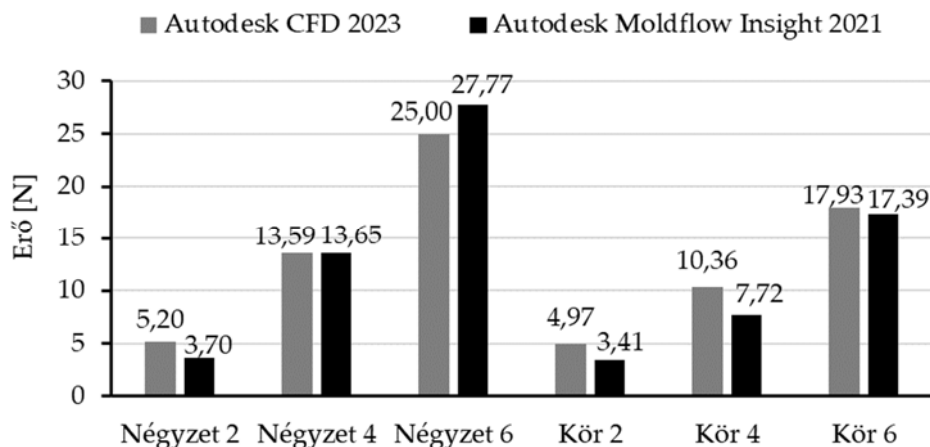
A kapott maximális feszültség és a Navier képlet felhasználásával [4] átszámítottuk a maximális feszültséget erőre a négyzet keresztmetszet esetében az (1) egyenlet, a kör keresztmetszet esetében pedig a (2) egyenlet felhasználásával:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_h}{K_z} = \frac{F_{\max} \cdot \frac{b}{2}}{\frac{a^3}{6}} \rightarrow F_{\max} = \frac{a^3 \cdot \sigma_{\max}}{3b}, \quad (1)$$

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

ahol σ_{\max} [MPa] a leolvasott maximális feszültség -, M_h [MPa] a hajító nyomaték, K_z [mm³] pedig a keresztmetszeti tényező, F_{\max} [N] a keresett erő, a [mm] a négyzet keresztmetszet rövidebb oldalának hossza, b [mm] az inzert magassága, D [mm] pedig a kör keresztmetszet átmérője.

A programokkal számított erőértékeket összehasonlítottuk egymással, minden keresztmetszet esetében. Az eredmények összehasonlítását a mutatja be a 4.ábra.



4. ábra. Inzerteket érő maximális erők különböző szimulációs programok esetében.

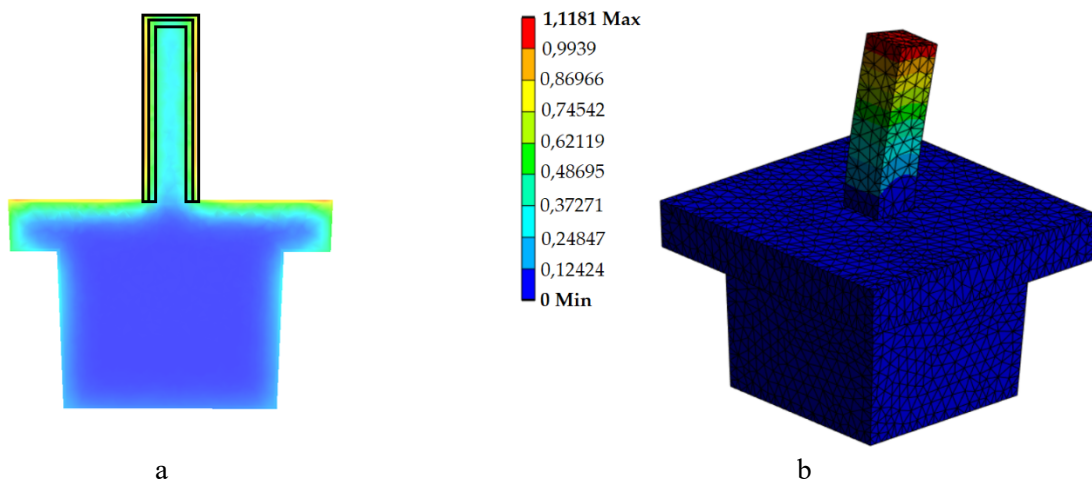
Az eredményekről elmondható, hogy a két program közel azonos értékeket számol. Azonban a kör keresztmetszetű inzertek, különösen a kisebb átmérők esetében a Moldflow értékei kisebbek voltak, amelynek több oka is lehet, az egyik lehetséges ok az, hogy az elem nagyság túl nagy volt, így a kör keresztmetszet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

okozhatja ezen felül az is, hogy a két program számítási algoritmusai eltér egymástól, ez magyarázatot ad a négyzet keresztmetszetű inzerterek eltérésére is.

2.2. Teljes deformációs viselkedés modellezése

Miután meghatároztuk az inzertereket érő erőket, ezután az inzerterek teljes deformációs viselkedését is modelleztük. Ehhez két szoftvert kapcsolatosan alkalmaztunk a kitöltést Moldex3D segítségével modelleztük, míg a deformációs számításokat ANSYS 2021 R2-ben végeztük el. Tehát első lépésként Moldex3D segítségével modelleztük a folyamatot. A modellt importálás után hálóztuk be 0,3 mm elemnagyságú, tetraédres elemekkel. Ezek után mind az ömledéktérnek, mind az inzert alapanyagának megadtuk az alapanyagtulajdonságait, ahogy korábbi számításaink során. Miután az alapanyagtulajdonságokat hozzárendeltük az adott modellrészhez, megadtuk a fröccsöntési paramétereket. Ezek után lefuttattuk a szimulációt és az itt kapott eredményeket felhasználva folytattuk a modellezést az ANSYS 2021 R2-ben.

A Moldex3D szoftver eredményei közül az inzertet erő nyomásterheléseket és inzert hőmérsékleteloszlást használtuk fel. Az inzertet érő nyomás terhelést minden egyes időpillanatban, több pontban meghatároztuk és ezek átlagát használtuk, mint időfüggő felületre ható nyomás terhelés. Az inzert hőmérsékletének megadásához egy olyan modellt hoztunk létre, amelynek a lényege az, hogy az inzert rétegekből áll és az egyes rétegekben található elemeknek a hőmérséklete azonos egy-egy időpillanatban, azaz a különböző rétegnek a hőmérsékletlefutása különböző. Ez a modell a térfogati hőmérséklet eloszlás kezelésének egy egyszerűsített módja, így a valóságot jobban tudjuk modellezni. Azonban mivel az egyes rétegeknek a hőmérséklete állandó, így egyelőre a modell nem képes kezelni azt, hogy melyik oldalt éri el hamarabb az ömledék. A rétegek számát, méretét és hőmérsékletét a Moldex3D-ben végzett számítások alapján adtuk meg. Ezeknek a rétegeknek a hőmérsékletét exportáltuk ki minden egyes időpillanatban és ezeket hőterhelésként adtuk meg ANSYS-ban, mint térfogati hőmérséklet. A 2 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzert esetén 3 réteget határoztam meg, ezt mutatja a 5/a.ábra.

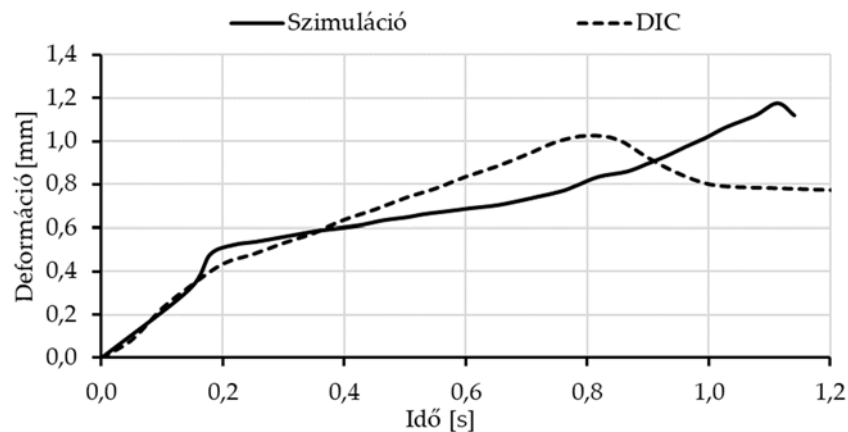


5. ábra. A 2 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzert hőmérsékleteloszlása a fröccsöntési irányra merőlegesen a szimmetria síkban (a). A 2 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzert deformációja a folyamat során (b).

Az egyes rétegeket külön testként modelleztük, és ANSYS-ban külön hálóztuk be. Azonban a program képes kezelni ezt és úgy hálózza be az egyes részeket, hogy összekapcsolódnak, így a mechanikai analízisnél ezek a modellrészek együtt mozognak el, így a deformációs számítást ez a réteges szerkezet nem befolyásolja. Ezek után lefuttattuk a számítást, a 2 mm oldalhosszúságú négyzet keresztmetszetű inzert deformációját mutatja a 5/b.ábra.

Ezután a számított értékeket összehasonlítottuk az inzertek valós viselkedésével [5], ezt mutatja az 6.ábra. A görbéket megvizsgálva látszik, hogy a deformáció három szakaszra osztható. Az első szakasz egy rövid meredeken felfutó szakasz, a második egy hosszabb, de kisebb meredekségű szakasz, a harmadik szakaszban pedig a deformáció visszaalakulása látható. A két görbe kezdeti szakasz jó egyezést mutat, csak a későbbi időpillanatokban tér el jelentősebben. A két görbe időbeli szétcsúszását okozhatja, egyrészt numerikus hiba, például a program nem tudta tartani az előírt kitöltési sebességet, de ez a jelenség a fröccsöntő gép esetében is előfordulhat, mivel a csigát fel kell gyorsítani és nem egyből a beállított értéken kezd el forogni, de egyéb szabályozás technikai okok miatt is lehetséges ez. A maximális deformációról elmondható, hogy

közel esnek egymáshoz a mért és számolt értékek, mivel a digitális képkorrelációval (DIC- Digital Image Correlation) által mért maximális deformáció 1,025 mm míg a modell esetében ez 1,175 mm.



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

3. Összefoglalás

Munkánk során azt a célt tűztük ki, hogy megismerjük az additív gyártástechnológiával készült polimer inzertek viselkedést a fröccsöntési ciklus során, numerikus számítások segítségével. Első lépésként az inzerteket érő erőket modelleztük. Ehhez Autodesk CFD és Autodesk Moldflow Insight programokat használtunk. Ezután vizsgáltuk numerikusan az inzertek teljes deformációs viselkedését is. A számítások első lépéseként Moldex3D segítségével magát a kitöltés szimuláltuk, így megkapva az inzerteket érő mechanikai és termikus terheléseket. A hőmérsékleteloszlás modellezésére egy olyan modellt hoztunk létre, amely az inzertet rétegekre bontja és ezeknek a rétegeknek azonos a hőmérsékletük egy-egy időpillanatban. A nyomás terhelések esetében több pont átlaga alapján határoztuk meg az egyes felületekre ható nyomásokat. Ennek segítségével a maximális deformáció közel azonos a számított és mért esetben, a konkrét vizsgált geometriánál mindössze 15%-kal tér el a két eredmény. Azonban a maximális deformáció ideje eltér, így ez további vizsgálatra szorul. Ennek ellenére elmondható, hogy sikeresen tudtuk modellezni a folyamatot.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA (FK 134336) pályázata támogatta. Köszönjük továbbá az Arburg Hungária Kft-nek az Arburg Allrounder 470A 1000-290 típusú fröccsöntőgépet. A szerzők részvételét az OGÉT 2023 konferencián az Emberi Erőforrás Támogatáskezelő NTP-HHTDK-22 pályázata támogatta.

Irodalmi hivatkozások

- [1] Buzási L.: *Magyarország műanyagipara 2018-ban*. Polimerek, <http://polimerek.hu/2019/08/09/magyarország-muanyagipara-2018-ban/> (Utolsó letöltés: 2023.02.25.)
- [2] <https://www.stratasys.com/en/materials/materials-catalog/polyjet-materials/verovivid/> (2023.02.25.)
- [3] Krizsma Sz., Suplicz A.: *Comprehensive in-mould state monitoring of Material Jetting additively manufactured and machined aluminium injection moulds*. Journal of Manufacturing Processes, Elsevier, 2022, 84, 1298–1309
- [4] Béda Gy.: *Szilárdságtan*. Műegyetemi kiadó, Budapest, 1996
- [5] Széplaki P.; Hajagos Sz.: *Polimer inzert fröccsöntési ciklus közbeni deformációjának mérése és modellezése*, Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék, 2021