

KRIZSMA SZABOLCS¹
 SUPLICZ ANDRÁS^{1,2}

ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁVAL ELŐÁLLÍTOTT FRÖCCSÖNTŐ SZERSZÁMBETÉTEK ÜZEM KÖZBENI DEFORMÁCIÓINAK VIZSGÁLATA

DEFORMATION ANALYSIS OF ADDITIVELY MANUFACTURED MOULD INSERTS DURING INJECTION MOULDING

A korszerű fröccsöntő ipari gyakorlatban a gyors szerszámzásmódszerek alkalmazása egyre elterjedtebb. Mivel az így készült szerszámbe-
 tétek élettartama korlátozott, azok üzem közbeni állapotfelügyelete elengedhetetlen. Munkánkban egy olyan állapotfel-
 ügyeleti módszer alapjait dolgoztuk ki és teszteltük le, amely a betétek nyúlás- és hőmérsékletmérésével
 segítheti az egyenletes termékminőség tartását és a ciklusszám növelését prototípus szerszámbe-
 téteknél. Kísérleteink során a szerszámbe-
 tétek deformációjának és hőmérsékletének változását vetettük össze a
 formaüregben kialakuló nyomással.

In the modern injection moulding industry the applica-
 tion of Rapid Tooling (RT) methods is becoming more
 widespread. Because of the life expectancy of these
 RT mould inserts is limited, their state monitoring
 during injection moulding is essential. In our work we
 laid the foundations of a state monitoring method and
 tested it. This method can help to maintain a constant
 product quality and to increase the reached injection
 moulding cycle number by measuring the strain and
 the temperature of the RT inserts during operation.
 In our experiments we compared the deformation
 change and the temperature change of the mould
 insert with the cavity pressure.

1. BEVEZETÉS

Az anyaghozzáadás elvén működő, úgynevezett additív gyártás-
 technológiák napjaink legkorszerűbb eljárásai közé tartoznak.
 Az ilyen típusú, polimer alapanyagot felhasználó technológiák
 közül a nemzetközi szakirodalomban leggyakrabban három sze-
 repel, amellyel a kisszeriás szerszámzásmódszerek követelményei telje-
 síthetők. Ezek a következők: a sztereolitográfia (SLA), a szelektív
 lézer szinterezés (SLS) és a PolyJet. A sztereolitográfia esetén
 lézertér hatására térhálósodó folyékony fotopolimerből állítják
 elő az alkatrészeket. A lézertér rétegről rétegre térhálósítja a
 fotopolimert a kívánt helyeken, így létrehozva a terméket. A sze-
 lektív lézer szinterezésnél az alapanyag por formájú, az alkat-
 rész pedig a porral töltött tartályban épül fel, ahol annak egyes
 rétegeit lézer olvasztja össze. Az SLS technológia közkezdvelt
 alapanyaga a poliamid, amelynek fémporral (például alumínium-
 mal) töltött vagy szálerősített (elsősorban üvegszál) változataival
 kiemelkedő szilárdsági tulajdonságok érhetők el. A PolyJet tech-
 nológia esetén az alapanyag fotopolimer gyanta, amelyet a 3D
 nyomtató fejében lévő, nagyszámú piezoelektromos fúvóka juttat
 a munkaasztalra, majd a folyékony gyanta cseppeket a nyomta-
 tófejben elhelyezett UV fényforrás térhálósítja ki [1].

Az említett technológiákat használó gyors szerszámzásmódszerek
 tématerület szakirodalmi nagyrésztben megvalósíthatósági
 tanulmányokra szorítkoznak [2-4]. Cabezas és társai [5] SLA,
 SLS és PolyJet technológiákkal állítottak elő fröccsöntő sze-
 rszámbe-
 téteket. Élettartam eredményeket a PolyJet technol-
 ógiával készült, két különböző geometriájú betétre közöltek,
 amelyekkel 12-20 mintát tudtak gyártani a tönkremenetelig.
 A betét élettartama nagyban függött a termék geometriájától.

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,
 Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

² MTA-BME Lendület Könnyűszerkezetes Polimer Kompozitok Kutatócsoport,
 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

Részletesebb élettartam vizsgálatokat végeztek az SLA technológiával készült betétekre Davoudinejad és társai [6], akik összesen hat szerszáminzertbe fröccsöntöttek. Ezek közül négyet, a fröccsöntés sorozatokat megelőzően, hőkezelésnek vetettek alá egy szárítószekrényben. Ennek a célja az volt, hogy vizsgálják a ciklikusan fellépő hőterhelés hatását a betétek várható élettartamára. A 20 felfűtési ciklusból álló előzetes hőkezelést követően mind a hat inzertbe fröccsöntöttek. A két hőkezelés nélküli inzert 110, illetve 143 ciklus után ment tönkre, míg az öregített betétek 110, 85, 35 és 45 ciklusokat bírtak.

Az additív gyártástechnológiával készült szerszámbetétek témakörében készültek az élettartam vizsgálatoknál átfogóbb tanulmányok is. A polimer szerszáminzertek két fontos eltérése a fém betétekhez képest a kisebb szilárdság, valamint az üzem közbeni melegedés és a lassú hűlés (ezáltal lassabb hőelvonás), amelyet a polimereknek az acélhoz viszonyított akár két nagyságrenddel alacsonyabb hővezetési tényezője okoz. A szerszámban kialakuló, megváltozott hőmérsékleti viszonyok befolyásolhatják a fröccstermék anyagszerkezetét is. Tábi és társai [7] különböző típusú és mennyiségű göcképző adalékokat tartalmazó PLA alapanyagot fröccsöntöttek acél és PolyJet technológiával készült, epoxi-akrilát alapanyagú formalapokat tartalmazó szerszámba. A termékként gyártott PLA lapkák DSC vizsgálataiból megállapították, hogy a PolyJet betét rosszabb hővezetése miatt kialakuló magasabb hőmérséklet és a lassabb hűlés hatására a minták kristályos részaránya nagyobb lett. Több összehasonlító tanulmány is készült, amelyekben azonos szerszámgeometriát különböző anyagokból készítettek el. Kampker és társai [8] szakító próbatesteket fröccsöntettek forgácsolt alumínium, PolyJet technológiával készült epoxi-akrilát és SLS technológiával készült, üvegszál erősítésű poliamid szerszámba. Az alumínium alapanyag esetén nem figyeltek meg számottevő maradé deformációt a betétben. Az üvegszállal erősített poliamid betétnél megközelítőleg 0,1 mm maximális benyomódás volt tapasztalható. A PolyJet betétnél jelentős benyomódás (0,349 mm) és a forró ömledék miatti elszíneződés volt látható a betét felületén, továbbá 13 ciklus után a szerszám inzert megrepedt. Szintén fontos tapasztalat volt, hogy a két polimer szerszámbetét esetén a rossz hővezetési tulajdonságok miatt jelentős zsugorodás (~1,3%) és beszívódás (0,2 mm - 0,24 mm) keletkezett a próbatesteken. A szerszámbetét hőmérsékleti viszonyai és a keletkező zsugorodások tekintetében hasonló eredményekre jutottak Mendible és társai [9] is. Ők forgácsolt acél, DMLS technológiával készült bronz és PolyJet technológiával készült epoxi-akrilát betéteket hasonlítottak össze. Megállapították, hogy a polimer szerszámbetét üzem közben jobban felmelegszik, mint az acél vagy a bronz betét, valamint a termék zsugorodása is jelentősebb. Az acél és a bronz szerszám egyaránt kibírt 500 ciklust károsodás nélkül, míg a PolyJet szerszám 116 ciklust követően tönkrement.

A szakirodalmak alapján látható, hogy az additív gyártástechnológiákkal gyorsan és nagy alakadási szabadság mellett lehet kis- és akár nagyszériás fröccsöntő szerszámbetéteket készíteni. Mindez gyártási rugalmasságot biztosít, amelyre az igény folyamatosan növekszik. Előszériák vagy tesztadarabok készítéséhez a polimer alapanyagú additív gyártástechnológiák segítségével gyorsan és költséghatékonyan állíthatók elő prototípus szerszámok. A módszer hátrányaként azonban meg kell említeni a fém szerszámokhoz viszonyított kisebb szilárdságot, az ebből fakadó

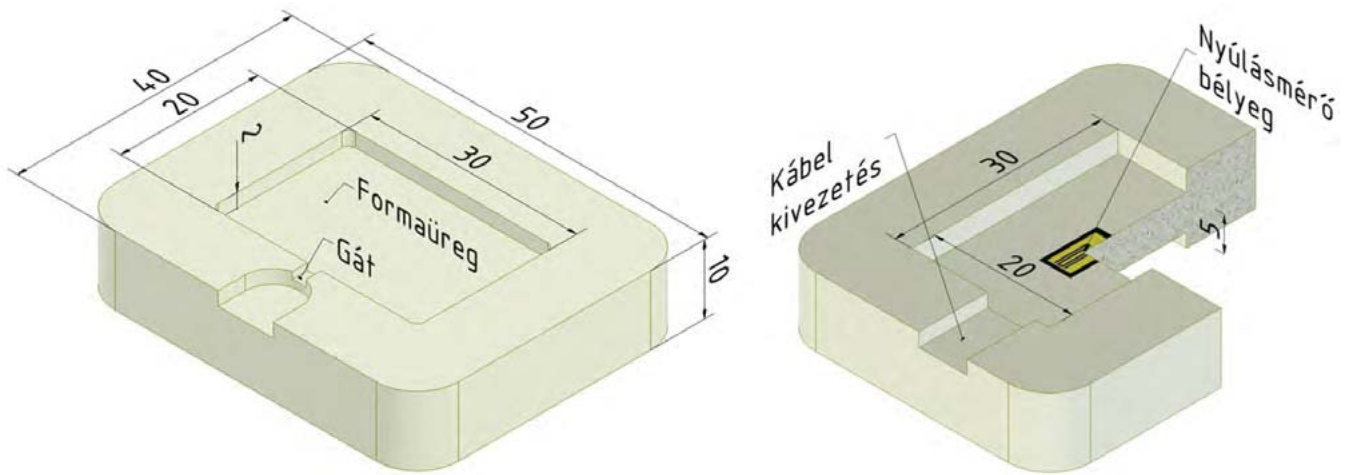
korlátozott élettartamot, valamint a betétanyagok hőmérséklet-érzékenységét, amely a magasabb hőmérsékleten bekövetkező kilágyulásban mutatkozik meg. Ennek következtében a fém szerszámokhoz képest elérhető ciklusidő is jóval hosszabb, amelyet a termék hűtési ideje és a ciklusok közötti holtidő hossza határoz meg. Ezek alapján belátható, hogy a polimer alapanyagú betétek alkalmazhatók fröccsöntési felhasználásra, azonban a gyártott termékek egyenletes minőségének biztosítására és a szerszámbetétek állapotának folyamatos vizsgálatára mérőrendszereket szükséges alkalmazni. Munkánkban célunk volt egy olyan mérési módszer alapjainak kifejlesztése és tesztelése, amellyel az additív technológiákkal gyártott szerszámbetétek állapota üzem közben felügyelhető, ezzel élettartamuk növelhető. Ennek köszönhetően a későbbiekben az ipari gyakorlatba történő szélesebb körű beépülésük is elősegíthető.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS BERENDEZÉSEK, MÉRÉSI KONCEPCIÓK

A fröccsöntési kísérletekhez felhasznált alakadó szerszámbetétet 3D nyomtatási eljárással, PolyJet technológiával készítettük el. A felhasznált alapanyag UV fényre térhálósodó epoxi-akrilát volt (FullCure 720, Stratasys Ltd., USA), amelynek húzószilárdsága 50-65 MPa, szakadási nyúlása 15-25%, rugalmassági modulusza 2-3 GPa, Shore D keménysége 83-86, HDT értéke (0,45 MPa) 45-50 °C, üvegesedési átmeneti hőmérséklete 48-50 °C. A fröccsöntéseket polipropilén homopolimerrel végeztük (Tipplen H 145F, MOL Petrolkémia Zrt., Magyarország.), amelynek főbb tulajdonságai az alábbiak: MFR (230 °C /2,16 kg) 29 g/10 perc, rugalmassági modulusza húzásból 1,99 GPa, húzószilárdsága 39 MPa, nyúlása folyáshatárnál 9%, ajánlott feldolgozási hőmérséklet tartománya pedig 190-235 °C.

A szerszám inzertet Objet Alaris 30 típusú, PolyJet elven működő 3D nyomtatóval állítottuk elő, amelynek munkatere 300x200x150 mm, felbontása a munkaasztal síkjában X és Y irányokban 50 µm, míg annak síkjára merőlegesen (Z irányban, vagyis az építés irányában) 28 µm. A gép két nyomtatófejjel rendelkezik, az egyik fej az alapanyagot, a másik fej pedig a támaszanyagot juttatja a munkatérbe. Az eljárással megfelelő méretpontosság érhető el (~0,1 mm-es tűrés). A nyomtatáshoz szükség van továbbá támaszanyagra is az alámetszések megtámasztására, amelyet a folyamat végén, utólag kell eltávolítani.

Az elkészített szerszámbetét geometriáját mutatja be az 1. ábra. A betét befoglaló mérete 50x40x10 mm, amellyel egy 30x20x2 mm-es lapka gyártható. A betét hátulján, a formaüreg méretével és pozíciójával megegyezően egy zsebet alakítottunk ki, amelybe egy nyúlásmérő bélyeget (HBM 1-LY11-3/350) ragasztottunk a formaüreg deformációjának mérésére. A bélyeggel mért jeleket Spider 8 adatgyűjtő berendezéssel dolgoztuk fel. A bélyeg kábeleinek kivezetésére egy kivágást alakítottunk ki a betét szélén. A vizsgált betét falvastagsága, amelynek deformációit mértük, 5 mm volt. A betétgeometria előbb említett kialakításával a cél az volt, hogy in-situ és valós időben vizsgálható legyen annak fröccsnyomás hatására kialakuló, üzem közbeni deformációja. A vizsgálatok során, a deformációméréssel párhuzamosan a formaüregben kialakuló nyomásokat és a bélyeg mellett, a betét hátoldalán



1. ábra: A PolyJet technológiával készült fröccsöntő szerszámbetét főbb méretei

kialakuló hőmérsékletviszonyokat is regisztráltuk. Az üregnyomásokat Kistler 6182B típusú szenzorral mértük, amelyek jeleit egy Como Injection 2869B típusú adatgyűjtő rögzítette. A betét hőmérsékletét Ahlborn NiCr-Ni T 190-0 típusú hőelemmel regisztráltuk, amelynek a jelét egy Ahlborn Almemo 8990-6 típusú adatgyűjtő egység rögzítette. A betétet egy négyfészkes, hidegcsatornás acél szerszámházba illesztettük be, amelynek mozgó oldalát mutatja a 2. ábra. A kísérletek során csak egy fészket használtunk fel, a többi üreget "ledugóztuk".

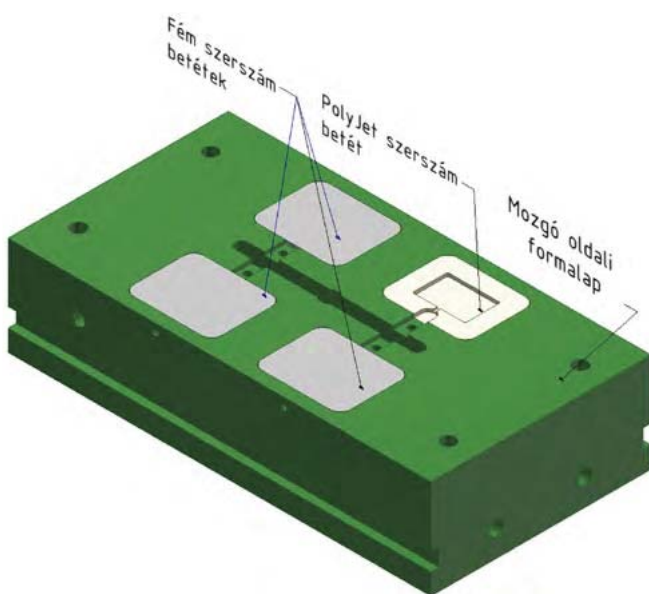
A fröccsöntési kísérleteket egy Arburg Allrounder Andvance 270S 400-170 típusú fröccsöntő gépen végeztük. A gép maximális záróereje 400 kN, oszloptávolsága 270 mm, maximális fröccsnyomása 2000 bar, maximális adagsúlya 77 g és a csigaátmérője

30 mm. A fröccsöntések során állandó paraméter volt az ömledékhőmérséklet (210 °C), a zárórő (10 t), a fröccssebesség (10 cm³/s), a befröccsöntött térfogat (9,5 cm³), a fröccsnyomás korlát (300 bar), az adagsúly (25 cm³), a dekompressziós térfogat (4 cm³), az utónyomási idő (10 s) és a maradék hűtési idő (35 s). A kísérletekben az utónyomás változtatásának hatását vizsgáltuk különböző nyomásszintek beállításával. A beállított nyomásszintek 0 és 150 bar között változtak. Először a 0 bar utónyomást vizsgáltuk, ezt követően 50 bar-tól 150 bar-ig sorozatonként 25 bar-os lépéssel haladtunk.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

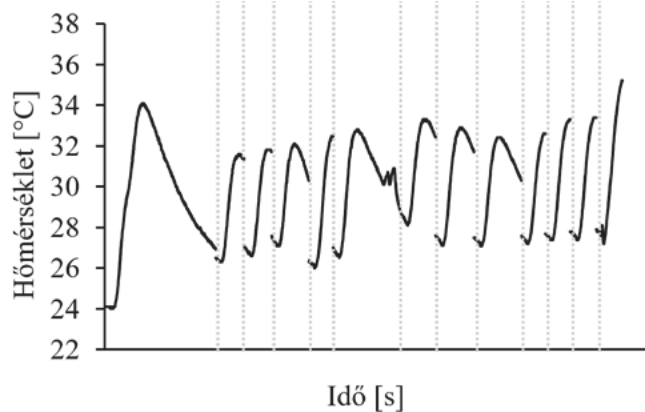
A fröccsöntések során vizsgáltuk a szerszámbetét felmelegedését. A mért betéthőmérséklet időbeli lefutását mutatja a 3. ábra. Az egyes fröccsöntési ciklusokhoz tartozó görbék karakterisztikája ciklusonként hasonló. Látható, hogy a betét hátoldalának kezdeti 26-28 °C betéthőmérséklete a befröccsöntött, 210 °C-os ömledék hatására 33 °C-ra emelkedik, majd a szerszám nyitását és a termék eltávolítását követően hűlni kezd. Ki kell emelni, hogy az egyes fröccsöntési ciklusok között holtidőt kell hagyni, hogy a betét hőmérséklete lecsökkenjen, mivel az üvegesedési átmeneti hőmérséklet felett (48-50 °C) a betét rugalmassági modulusza és folyáshatára is drasztikusan csökken. A ciklusok közötti holtidő megválasztása tehát alapvetően befolyásolja a betét élettartamát és mérettartását, ezért minden kísérlet után megvártuk, hogy a betét hőmérséklete 28 °C alá csökkenjen a következő ciklus indítása előtt.

A fröccsöntés sorozatok során nyúlásmérő bélyeggel vizsgáltuk a betét deformációját. A kapott eredmények alapján az alakváltozás jellegzetes időbeli lefutását mutatja be a 4. ábra kis és nagy utónyomások esetén. Látható, hogy a kitöltési szakaszban, megközelítőleg 1 másodperc alatt hirtelen nyúlásnövekedés következik be, amelyet az ömledéknek a formaadó felületekre gyakorolt erőhatása okoz. A gyors befröccsöntési szakaszban a polimer



2. ábra: A fröccsöntéshez használt szerszám

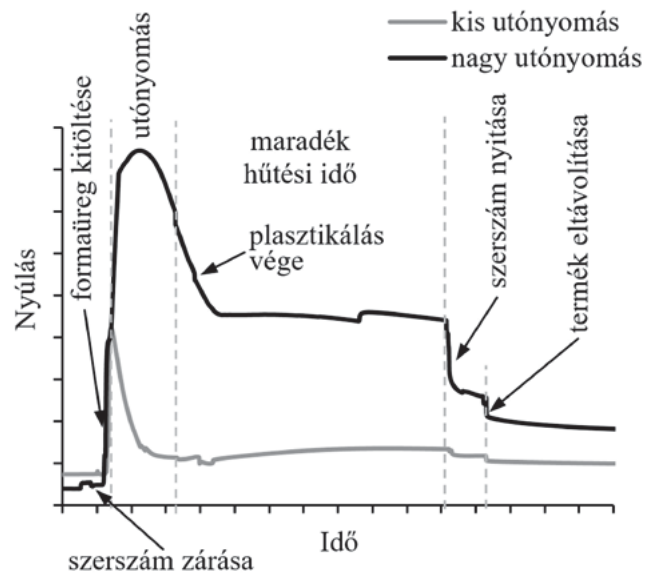
szerszámvetét pillanatnyi rugalmas deformáció komponense dominál. A befroccsöntést követően, a 10 másodpercig tartó utónyomás szakaszban a termék zsugorodása miatt a formaüregben lecsökken a nyomás. A befroccsöntési szakaszhoz képest hosszabb ideig tartó, alacsonyabb terhelés miatt ebben a szakaszban a polimer szerszámvetét késleltetett rugalmas, valamint maradó deformációi már számottevők. Mindezek mellett a felmelegedő betét hőtágulást is szenved, amely a nyúlás növekedését okozza. A leépülő formaüreg nyomásból származó csökkenő mechanikai terhelés és a felmelegedett betét hőtágulásának eredőjeként a betét nyúlása az utónyomás szakaszában először fokozatosan lassul, majd csökkenni kezd. A nyúlásgörbe lefutása nagyban függ az alkalmazott utónyomás mértékétől. Az utónyomás elvételekor a betét gátjának terhelése megszűnik, amely kismértékű nyúláscsökkenést okoz. A plasztikálás végén a 30 bar torlónyomás megszűnése szintén kismértékű nyúláscsökkenést eredményez. A plasztikálás végét követően, a maradék hűtési idő alatt a nyúlásértékek egy közel állandó szintre csökkennek le, amely a



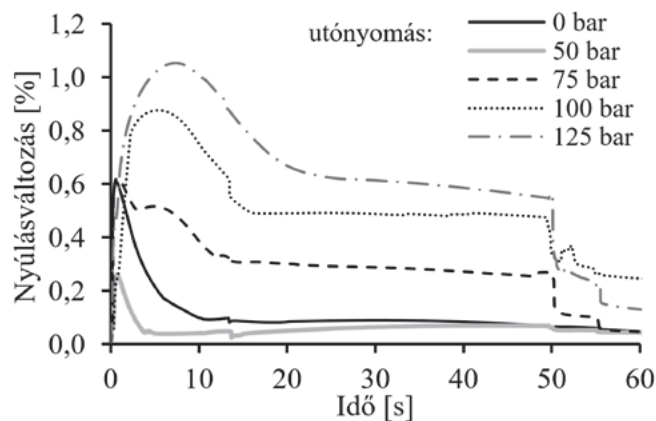
3. ábra: A hőmérséklet időbeli változása a fröccsöntések során

szerszámnyitás pillanatáig megmarad. Ezen szakasz során a formaüregben lévő termék hűlése és zsugorodása következik be. A termék mérete befolyásolja a betét nyúlását, amelyet az bizonyít, hogy először a szerszámnyításkor, majd pedig az alkatrész kidobásakor egy rendre nagyobb, illetve kisebb lépcsőben történő nyúláscsökkenés következik be. Az alkatrész kidobását követően látható, hogy a nyúlásértékek nullánál nagyobb szinten maradnak, amely csak időben lassú csökkenést mutat. Ezt a jelenséget a polimer szerszámvetét viszkoelasztikus viselkedése okozza.

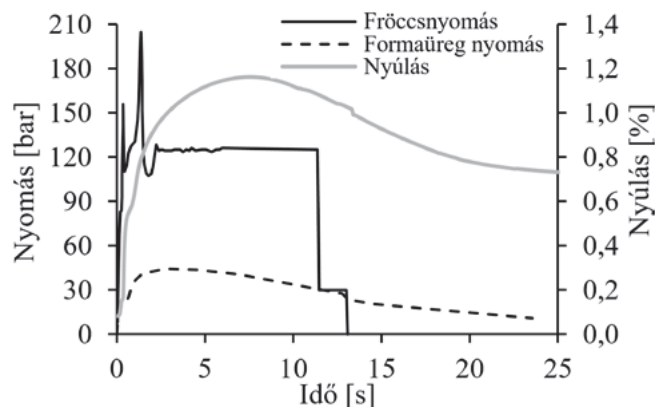
A szerszámvetétek nyúlásának időbeli lefutását alapvetően meghatározza a fröccsöntési ciklus során beállított utónyomás. Ennek vizsgálatára először 0 bar utónyomást állítottunk be, majd az utónyomást 25 bar-os lépcsőben változtattuk az 50 bar és a 150 bar közötti tartományban. A különböző utónyomás szinteken mért jellegzetes nyúlásváltozás görbéket mutatja be az 5. ábra. A függőleges tengelyen szereplő nyúlásváltozás a nyúlásmérő bélyeg által mért, a fröccsöntési ciklus kezdetén lévő nyúláshoz viszonyított eltérést jelenti.



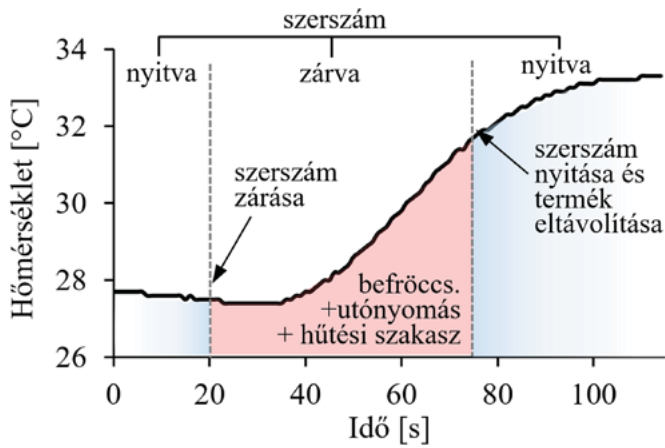
4. ábra: A szerszámvetét fröccsöntés közbeni nyúlásának lefutása



5. ábra: A nyúlásváltozások időbeli lefutása különböző utónyomás szinteken



6. ábra: A fröccsnyomás, a formaüregbéli nyomás és a betét nyúlásának időbeli lefutása 125 bar utónyomáson



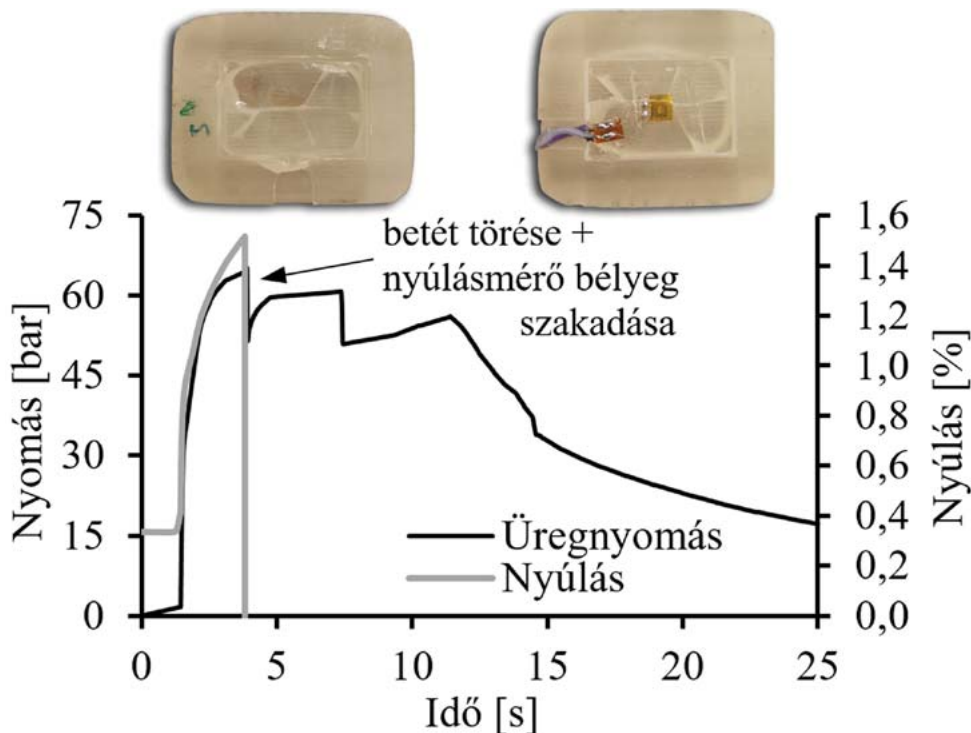
7. ábra: A szerszámot üzem közbeni hőmérsékletváltozása

Az 5. ábra eredményeiből látható a tendencia, hogy az utónyomás növelésével a nyúlásváltozások is növekednek. Ez alól kivételt jelent a 0 bar nyomásszint, amelyen nagyobb nyúlásnövekedés megy végbe, mint az 50 bar-os szinten. Az eltérésnek két valószínűsíthető oka van. Az első az, hogy az 50 bar-os utónyomás szinten már a 0 bar-on végrehajtott fröccsöntések által előzetesen deformált, ezáltal megnövekedett térfogatú formaüregbe kerül be az ömledék. A második ok pedig, hogy a forró ömledék hőtágulása szintén deformálja a formaüreget. A két hatás együttesét az

50 bar-os utónyomás nem tudja megfelelően kompenzálni, ezért a kialakuló kezdeti nyúlásváltozás alacsonyabb lesz, mint a 0 bar-os szinten. A nyúlásváltozás görbék alakját tekintve megfigyelhető, hogy a nagyobb utónyomásokon (75 bar – 125 bar szinteken) a görbe maximuma időben jobban elnyújtva jelenik meg. A maximumot követően egy időben elnyújtott csökkenés, majd egy közel állandó nyúlásváltozás figyelhető meg. Ez egészen a szerszámnyitásig tart, ahol hirtelen nyúláscsökkenés következik be. Ezzel ellentétben, az alacsonyabb utónyomás szinteken (0 bar és 50 bar) a nyúlásváltozás befroccsöntést követően kialakuló csúcserőtelében gyorsan jelenik meg, majd alacsony szintre csökken vissza. Ennek a gyors változásnak az oka az elégtelen utónyomás miatt kialakuló nagy termékzsugor.

Az egyik 125 bar utónyomású szinten mért fröccsnyomást, a formaüregben lévő nyomást és a nyúlásváltozást hasonlítja össze a 6. ábra. A fröccsnyomás görbén két csúcs jelenik meg, amelyek közül az első az ömledék gáton való átjutását jelzi (értéke 157 bar), míg az időben második, értékében nagyobb (204 bar) nyomáscsúcs a kitöltési szakasz végét és az átkapcsolási pontot mutatja. A formaüreg nyomásában a fröccsöntés elején növekedés tapasztalható, majd a görbe maximuma (44 bar) az átkapcsolást követően, már az utónyomású szakaszban van. A nyúlásváltozás görbén jól látható, hogy a maximum érték a formaüregben mért nyomás maximumához képest időben eltolódva jelenik meg (~5 másodperccel később). Ezt a polimer szerszámotétét késlettelte rugalmas deformációkomponense okozza.

A szerszámotétét hátoldalának (5 mm-re a formaüreg felületétől) üzem közbeni hőmérsékletváltozását mutatja be ebben a ciklusban a 7. ábra. Látható, hogy a befroccsöntési szakaszban a



8. ábra: Az üregnyomás és a nyúlás időbeli lefutása a betét tönkremenetel ciklusában

hőmérsékletnövekedés nem számottevő, hiszen a betét rossz hővezetése miatt az anyagban a hő nagyon lassan terjed. A hátoldalon a hőmérséklet emelkedése csak a hűtési szakaszban jelentkezik, majd a szerszám nyitását és a termék eltávolítását követően, a hőforrás megszűnésével a növekedés lassulni kezd.

A mérési módszerünk alkalmas a betétek tönkremenetelének valós idejű, üzem közbeni kimutatására is az üregnyomás és a nyúlásgörbéken megjelenő szakadások, illetve rendellenes alakú szakaszok kirajzolásával. Ezt szemlélteti a 8. ábra. Látható, hogy a tönkremenetelhez tartozó ciklusban az üregnyomás görbén fűrészfogakhoz hasonló szakaszok jelennek meg, míg a nyúlásmérő bélyeg jele a törés következtében megszűnt.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánkban additív gyártási eljárással (PolyJet technológiával) készült, 3D nyomtatott fröccsöntő szerszámot üzem közbeni viselkedését vizsgáltuk. A betét előállításához epoxi-akrilát alapanyagot, a fröccsöntéshez homo-polipropilén fröccsanyagot használtunk. A betétet egy hidegcsatornás fém szerszámházba helyeztük. A mért mennyiségek a fröccsnyomás, a formaüregben kialakuló nyomáslefutás, a döntően az üregnyomás által okozott üzem közbeni nyúlás és a betét hőmérséklete voltak.

A szerszámot hátoldalának hőmérséklete a fröccsöntési ciklusok során 26-33 °C tartományban változott, továbbá mind a betét felmelegedése, mind annak hűlése az epoxi-akrilát rossz hővezetési tulajdonságai miatt időben lassan zajlott le. A betét élettartamának növelésére az egyes ciklusok között hosszú holtidőket kellett hagyni, hogy megfelelő mértékben az üvegesedési átmeneti tartomány alatt maradjon a betét hőmérséklete. Emellett a mért nyúlásgörbéken azonosítottuk a fröccsöntési ciklus főbb szakaszait, úgymint például a befroccsöntést, utónyomást, hűtést, szerszám nyitását és termék eltávolítását. Vizsgáltuk különböző utónyomás szintek hatását, és tendenciaként megfigyelhető volt az utónyomás növelésével emelkedő nyúlásváltozás. Megállapítottuk, hogy a termék eltávolítását követően, a ciklusok végén, a polimer betétanyag késleltetett rugalmas deformációja és hűlése miatt a betét deformációja időben csökkenő tendenciát mutat. Emellett magasabb utónyomásokon számottevő maradó deformáció is kialakult, amely befolyásolhatja a termék méretpontosságát. Kiemelendő továbbá az utónyomás emelésével módosuló nyúlásváltozás görbe alak is. Kis utónyomásokon a maximális nyúlásváltozás időben röviden, „tűskezerűen”, míg nagyobb utónyomásokon a nyúlásváltozás maximuma időben elnyúlva jelenik meg. Emellett magasabb utónyomásokon a szerszám nyitása és a fröccsdarab kidobása pillanatában a nyúlásgörbén ugrásszerű csökkenés következik be. Összehasonlítottuk a fröccsnyomást, a formaüreg nyomását és a nyúlásváltozást. A formaüreg nyomás maximuma és a nyúlásváltozás maximuma között időbeli késleltetést lehet megfigyelni, amely a késleltetett rugalmas deformáció komponensnek tulajdonítható. Méréseink alapján megállapítottuk, hogy a fröccsnyomás, az üregnyomás, a betét nyúlása és a betéthőmérséklet együttes mérésén alapuló állapotfelügyeleti rendszer alkalmas arra, hogy a fröccsöntő szerszámot üzem közbeni viselkedését jellemezze.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-5 kód-számú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. A cikk a Bolyai János Kutatási ösztöndíj támogatásával készült. Kutatásunk a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) 2019-1.1.1-PIACI-KFI-2019-00205, 2018-1.3.1-VKE-2018-00001, FK 134336 és 2017-2.3.7-TÉT-IN-2017-00049 pályázatának a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. A szerzők köszönetüket fejezik ki az ARBURG HUNGÁRIA KFT-nek, a TOOL-TEMP HUNGÁRIA KFT-nek, a LENZKES GMBH-nak és a PIOVAN HUNGARY KFT-nek a kutatásokhoz biztosított berendezésekért.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Wang, Y.; Zhou, Y.; Lin, L.; Corge, J.; Fan, M.: Overview of 3D additive manufacturing (AM) and corresponding AM composites, *Composites Part A*, 139, 106114 (2020).
- [2] Whlean, C.; Sheahan, C.: Using Additive Manufacturing to Produce Injection Moulds Suitable for Short Series Production, *Procedia Manufacturing*, 38, 60-68 (2019).
- [3] Oroszlány, Á.; Nagy, P.; Kovács, J. G.: Injection Molding of Degradable Interference Screws into Polymeric Mold, *Materials Science Forum*, 659, 73-77 (2010).
- [4] Equbal, A.; Sood, A. K.; Shamim, M.: Rapid tooling: a major shift in tooling practice, *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, 14, 1-9 (2015).
- [5] León-Cabezas, M. A.; Martínez-García, A.; Varela Gandia, F. J.: Innovative advances in additive manufactured moulds for short plastic injection series, *Procedia Manufacturing*, 13, 732-737 (2017).
- [6] Davoudinejad, A.; Khosravani, M. R.; Pedersen, D. B.; Tosello, G.: Influence of thermal ageing on the fracture and lifetime of additively manufactured mold inserts, *Engineering Failure Analysis*, 115, 104694 (2020).
- [7] Tábi, T.; Kovács, N. K.; Sajó, I. E.; Czigány, T.; Hajba, S.; Kovács, J. G.: Comparison of thermal, mechanical and thermomechanical properties of poly(lactic acid) injection-molded into epoxy-based Rapid Prototyped (PolyJet) and conventional steel mold, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 123, 349-361 (2016).
- [8] Kampker, A.; Triebs, J.; Kawollek, S.; Ayyaz, P.; Beyer, T.: Direct polymer additive tooling – effect of additive manufactured polymer tools on part material properties for injection moulding, *Rapid Prototyping Journal*, 25, 1575-1584 (2019).
- [9] Mendible, G. A.; Rulander, J. A.; Johnston, S. P.: Comparative study of rapid and conventional tooling for plastics injection molding, *Rapid Prototyping Journal*, 23, 344-352 (2017).