

Miskolci Egyetem
Anyag és Vegyészmérnöki Kar
Fémelőállítási és Öntészeti Intézet



TDK DOLGOZAT

ÖNTÖTT ALUMÍNIUM ALKATRÉSZ TECHNOLÓGIAVÁLTÁSÁNAK MEGVALÓSÍTÁSA

Hajas Levente Dániel
BSc Anyagmérnök hallgató

Konzulens: Dr. Molnár Dániel, egyetemi docens
Gyarmati Gábor, egyetemi tanársegéd

Miskolc
2024

Tartalom

Bevezetés.....	3
1. Szakirodalmi összefoglaló	4
1.1 Megvalósíthatósági vizsgálat	6
1.2 Az öntvénnel szemben támasztott követelmények	7
2. Az alkalmazott technológia bemutatása.....	10
3. Az öntvény dermedési folyamatainak vizsgálata.....	11
3.1 A gravitáció hatása a fogyási üregek pozíciójára.....	12
4. Az öntészeti technológiai elemeinek meghatározása	16
4.1 Osztósík, magok és formázási ferdeségek kialakítása.....	16
4.2 Táplálórendszer kialakítása	17
4.2.1 Az 1. számú tápfej méretezése	19
4.2.2 A 2. számú tápfej méretezése	20
4.3 A beömlőrendszer méretezése	23
5. A kidolgozott technológia szimulációs vizsgálata.....	26
5.1 Formatelési viszonyok vizsgálata	28
5.2 Dermedési viszonyok vizsgálata	30
6. Öntödei próbagyártás	34
6.1 Öntvények vizsgálata.....	38
6.1.1 Röntgen vizsgálat	38
6.1.2 GOM mérés.....	39
6.1.3. Brinell keménység	40
6.1.4. Mikroszerkezet vizsgálata.....	41
7. Összefoglalás	47
Felhasznált irodalom	48

Bevezetés

A TDK dolgozat keretében bemutatott kísérleti munka egy technológiaváltás során felmerülő megvalósítási folyamatot (méretezés, gyártás, vizsgálat) mutat be. A kísérleti munka keretén belül egy öntvény szériagyártását valósítottuk meg, a kidolgozott technológia pedig a korábban alkalmazott precíziós öntés helyett alkalmazni kívánt, homokformába történő gravitációs öntés.

A kutatási projekt során, egy szabadalmaztatott technológiát alkalmaztunk, mely szabadalmi gazda öntödéjében végeztük a kísérleti, majd az üzemi méréseket és gyártást. A technológiai váltás hajtóereje a költséghatékonyság növelése volt a vevői követelmények teljesülése mellett. Első feladatként meghatároztuk a gyártani kívánt geometria alkalmasságát az új öntési módszerre, meghatároztuk az öntészeti technológia paramétereit (osztósík, ferdeségek, magok) és számításokat végeztünk a beömlőrendszer és a táplálórendszer méretezése céljából.

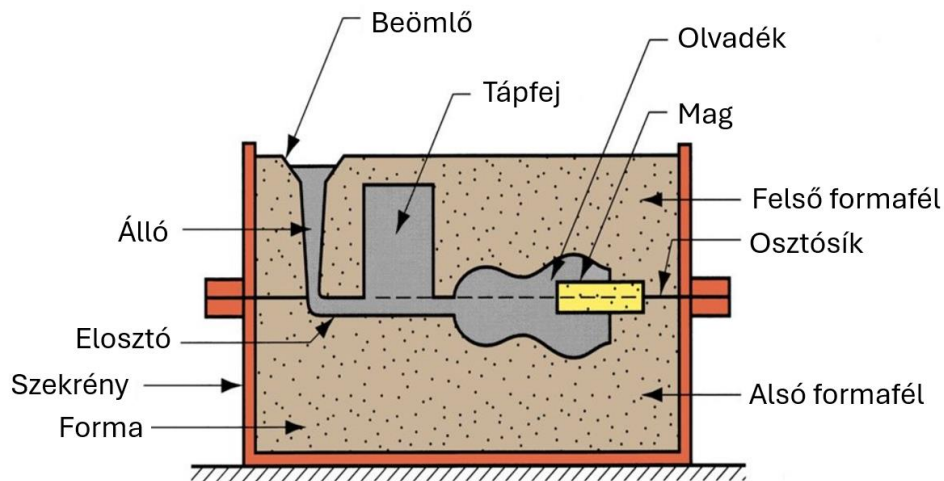
A teljes folyamatot számítógépes szimulációval kísértük végig és az elvégzett méretezések megfelelőségét szimulációs futtatásokkal ellenőriztük.

A szimulációs eredmények és az előzetes tesztek alapján igazolásra került az elméleti számítás helyessége, így maga az öntödei próbagyártás, majd az eredmények alapján az üzemszerű gyártás kezdetét vehette. Az öntvények megfelelőségét röntgen, GOM, mikroszerkezeti vizsgálatok és keménységmérés segítségével vizsgáltuk.

A kísérleti munka utolsó részében a gyártás eredményeit összevetettük a korábbi technológiából kapott eredményekkel, a vevői követelmények teljesülése mellett.

1. Szakirodalmi összefoglaló

Az elvégzett kísérleti munka során egy olyan technológiaváltást vizsgáltam meg, melynek során egy precíziós öntéssel gyártott öntvény gyártását kellett áttervezni gravitációs homokformába történő öntés technológiájára. Első lépésként a két alkalmazott öntési technológiát kívánom bemutatni. A gravitációs homokformába történő öntés jellegábrája az 1. ábrán látható.

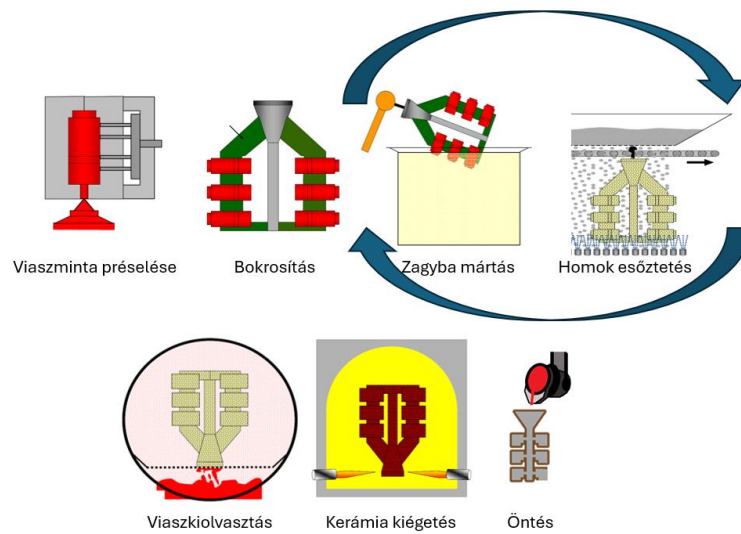


1. ábra. A gravitációs öntészeti technológia sematikus ábrája

A homokformába történő gravitációs öntés során a formázóanyagból készült elvesző formába, jellemzően homokformába történik a fémolvadék kontrollált körülmények között történő öntése és az öntvény a formában kontrollált körülmények között dermed meg. A formán belül a formaüreg kiképzése ún. minta alkalmazásával történik. A lehűlt öntvényt a formából formaürítéssel távolítják el, melynek során a homokforma megsemmisítésre kerül. Ezért nevezik ezt az eljárást elvesző formázásnak.

Az olvadék a beömlőnyíláson keresztül jut a formaüregbe, majd a beömlőrendszer részein keresztül (klasszikusan álló, elosztó, rávágás) jut a formaüregbe és tölti ki azt. A folyékony fém dermedés közbeni lehűlését tápfejekkel kompenzálják annak érdekében, hogy a kész öntvény megfeleljen a vevői követelményeknek. [1]

A Precíziós öntés technológiai menete az 2. ábrán látható.



2. ábra. A precíziós öntészeti technológia folyamatábrája

A precíziós öntés során a minta viaszból készül és a gyártási folyamat során megsemmisítésre kerül. E miatt nevezik a technológiát elvesző mintával történő gyártásnak. A viaszmintát fémből készült présformába préselik, majd az elkészült mintákat egy előre elkészített beömlőrendszerre rögzítik, ún. bokrosítják. A kész viaszminta bokrot megfelelő előkészítés után egy zagyba mártják, mely oldószert és megfelelően finom kerámiaszemcséket tartalmaz. A zagyba mártott viaszcsozor felületére, ún. homokeseőztetéssel egy primer formázóanyag réteget visznek fel, majd ennek száradása után a mártás-homokeseőztetés-száritás folyamatot addig ismétlik, míg kb. 10 mm vastagságú kerámia héj alakul ki a viasz felületén. A megfelelően vastag héjrég elkészülte után a viaszmintát gőz autoklávban kiolvasztják, majd a kerámia héjat kiégetik. Az így elkészített és előhevített kerámiahéjba történik az olvadék öntése. A megszilárdult öntvénycsokorról a kerámiahéjat pneumatikus kalapács segítségével távolítják el. [1]. Az 1. táblázatban foglalom össze a két vizsgált öntészeti eljárás fő jellemzőit.

1.táblázat A vizsgált öntészeti eljárások fő jellemzői

Precíziós öntés	Gravitációs öntés homokformába
Kiváló felületi minőség	Jó felületi minőség
Kiváló méretpontosság	Jó méretpontosság
Nagy geometriai komplexitás	Korlátozott geometriai komplexitás
Több fajta ötvözet alkalmazható	Több fajta ötvözet alkalmazható
Áltában nincsenek magok	Magok használata lehetséges
Magas költségek	Költséghatékony
Kis, vagy közepes széria	Kis, vagy közepes széria

A precíziós öntészet egyik legfontosabb előnye az ezzel a formázási eljárással elérhető magas felületi minőség és kiváló méretpontosság, valamint a gyártható öntvények nagy geometriai komplexitása. Az eljárás során jellemzően nem magokat használnak az öntvény belső üregeinek kiképzésére, hanem a kerámia héj alakítja ki a mind a külső felületeket, mind a belső üregeket. A technológia bekerülési költsége magas, ezért jellemzően nagyobb szériák gyártására alkalmazzák, hogy így az egy öntvényre eső költségek minimalizálhatóak legyenek [1].

A gravitációs homokformába történő öntés a fentiekben bemutatott eljárással szemben „csak” jó felületi minőséget és jó méretpontosságot kínál, emellett nagyobb geometriai szabadságot és a formázási ferdeség elhagyásának lehetőségét is [1, 2]. A homokformába öntés egyik hátránya, hogy csak korlátozott geometriai komplexitású alkatrészek gyárthatóak vele, itt ugyanis magokra van szükség ahhoz, hogy a geometria egyes belső részei kialakíthatóak legyenek. Mégis az általam legfontosabbnak tartott tulajdonság a költséghatékonyság. A kísérleti munka esetén ez volt a hajtóerő, a vevői követelmények teljesítése mellett. Fontos kiemelni azt, hogy a gravitációs homokformába történő öntésre a kis- vagy közepes szériák gyártása a jellemző.

1.1 Megvalósíthatósági vizsgálat

A megvalósíthatósági tanulmány egy vállalkozás vagy projekt elindítása előtt készített tanulmány, ami objektív és racionális módon feltárja a projekt erősségeit és gyengeségeit, a környezet jelentette lehetőségeket és veszélyeket, a végrehajtáshoz szükséges erőforrásokat, és végső soron a siker esélyeit. Leegyszerűsítve a megvalósíthatóság eldöntésének két fő kritériuma a felmerülő költség és az elérendő érték [3, 4].

Egy megvalósíthatósági tanulmány felbontható résztanulmányokra (technikai, ökológiai, pénzügyi, fenntarthatósági stb.), melyek közül itt most az ún. technikai megvalósítási tanulmány egyes elemeihez kapcsolódó folyamatot kívánom ismertetni.

1. Az alkalmazni kívánt formázástechnológia vizsgálata, a vizsgált alkatrész gyárthatóságának szempontjából.
2. A meglévő dokumentációk felmérése (műszaki rajz, CAD modell), leöntött darabok...
3. Alkalmazott ötvözzel szembeni elvárások, öntvénnel szemben támasztott követelmények.
4. Technológiaváltás indoklása (gazdaságosság, elérhető felületi minőség, vevői követelmények teljesíthetősége).

5. A sorozatgyártáshoz szükséges eszközök és anyagok rendelkezésre állásának vizsgálata... Az elvégzett vizsgálatok során azt kívántuk megvizsgálni, hogy egy vevői megkeresés során felmerült öntvénygeometria a vizsgált gravitációs homokformába történő öntéssel gazdaságos módon-, a vevői követelmények teljesítése mellett gyártható-e. Az öntvény „előélete” nem ismert, a korábbi gyártás technológiai paraméterei nem ismertek, azokról csak részinformációk állnak rendelkezésre. A vizsgált öntvényt precíziós öntéssel gyártották, de a vevő követelmények (elsősorban felületi minőség, méretpontosság) nem indokolják a relatíve nagy költségű precíziós öntési módszer alkalmazását. Amennyiben a vevői követelmények a jelentősen kisebb költségekkel járó, gravitációs homokformába történő öntéssel is teljesíthetőek, valamint teljesíthető a vevői rendelésszám, akkor ez indokolhatja a technológiaváltás szükségességét.

1.2 Az öntvénnel szemben támasztott követelmények

A munkafolyamat megkezdésénél az alábbi dokumentumok és próbadarabok álltak rendelkezésre:

- Az öntvény műszaki rajza, amely tartalmazza a vevő által elvárt követelményeket, tűréseket és méreteket.
- Az öntvény 3D CAD modellje.
- Kiszámú mintadarab az előző gyártástechnológiával legyártott öntvényből.

A vevői követelmények az alábbiakban kerültek meghatározásra:

- Az öntvény anyaga: EN AC-ALSi7Mg, T6 hőkezeléssel. Az adott minőségű és mennyiségű alumínium tömböt, adott periodicitással a megrendelő biztosítja.
- Sikeres próbagyártás esetén a vevői megrendelési mennyiség 120-150 db/hónap.
- Az öntvényt megtisztított állapotban, sorjamentesen kell kiszállítani.
- Az elvárt szakítószilárdság:
 - a kimunkált próbatestre vonatkoztatva: 230 N/mm².
 - az öntvényre vonatkoztatva: 200 N/mm².
- Az öntvénynek méretpontosság szempontjából a DIN 1688 sz. szabványnak kell megfelelnie [5]:

- Hosszméretek (hosszúságok, szélességek, magasságok, középpontok közötti távolságok, átmérők, lekerekítések) legnagyobb megengedett méreteltérései az értelmezési tartományon, lásd 2. táblázat.

2. táblázat Hosszméretek legnagyobb megengedett méreteltérései

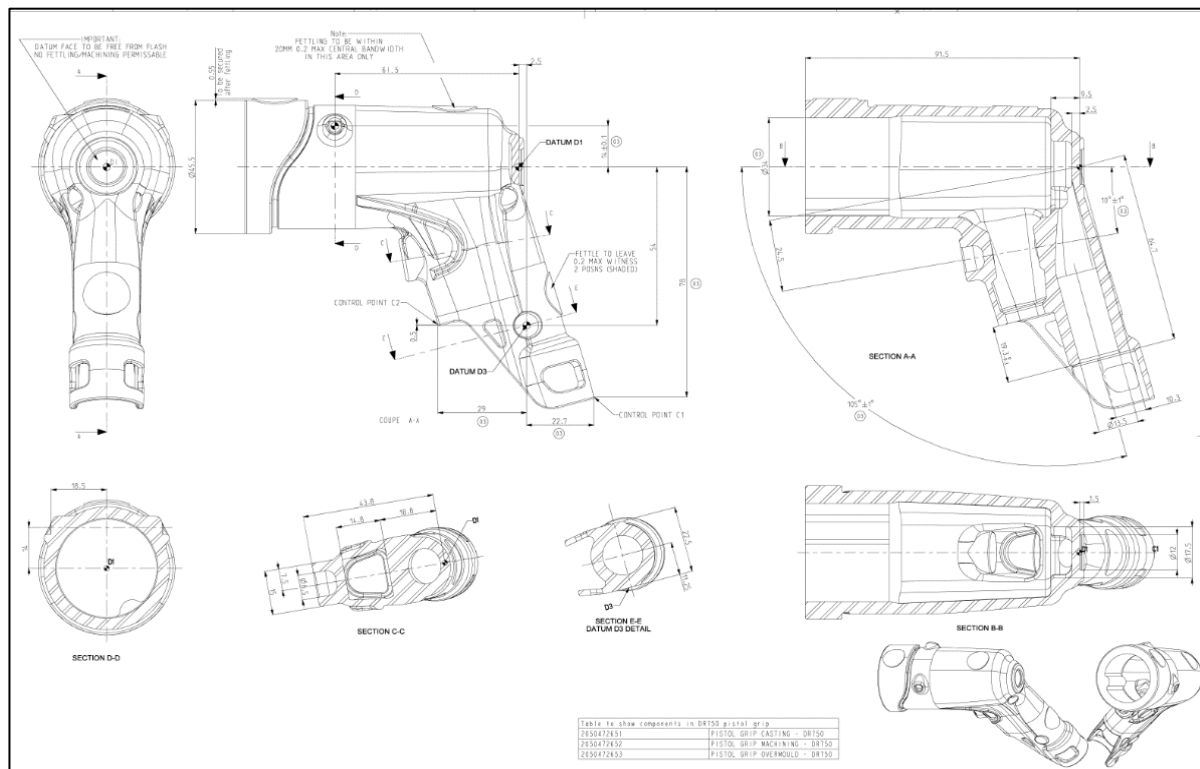
Térbeli átmérő tartomány	Pontossági fok	Névleges mérettartomány					
		18-ig	18-30	30-50	50-80	80-120	120-180
mm	-	mm	mm	mm	mm	mm	mm
50-180	GTA 13/5	$\pm 0,32$	$\pm 0,35$	$\pm 0,4$	$\pm 0,45$	$\pm 0,5$	$\pm 0,55$

- Vastagsági méretek (falvastagságok, hidak, bordák) legnagyobb megengedett méreteltérései az értelmezési tartományon, lásd 3. táblázat:

3. táblázat Vastagsági méretek legnagyobb megengedett méreteltérései

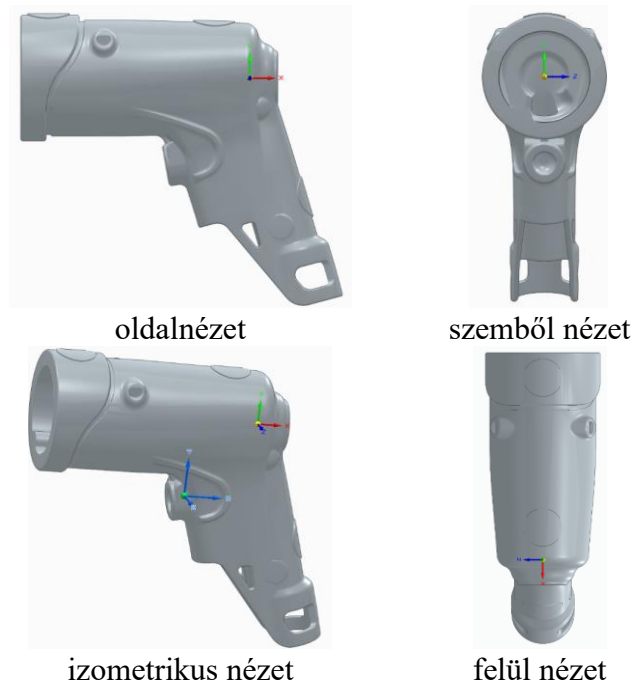
Térbeli átmérő tartomány	Pontossági fok	Névleges mérettartomány		
		3-ig	3-6	6-10
mm	-	mm	mm	mm
50-180	GTA 13/5	$\pm 0,35$	$\pm 0,4$	$\pm 0,45$

Fentieknek tételes vizsgálata alapján (olvasztási kapacitás, formázási kapacitás, munkaerő stb.) megállapításra került, hogy az üzem alkalmas a gyártásra. Az öntvény műszaki rajza az 3. ábrán látható. A műszaki rajz nagyobb felbontásban és méretben a mellékletben található.



3. ábra Az öntvény műszaki rajza

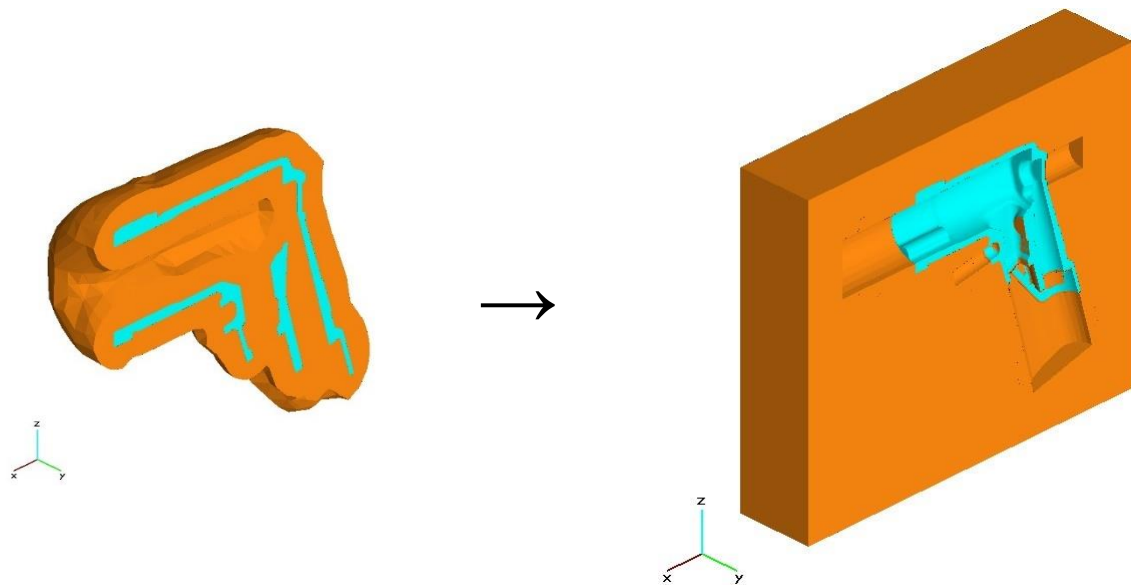
Az öntvény CAD modelljáról készült nézeti képek az 4. ábrán láthatóak.



4. ábra. Az öntvény nézeti képei

- Befoglaló méretek: 100x115x40 mm
- Legkisebb falvastagság: 1,2 mm
- Legnagyobb falvastagság: 10,0 mm
- Jellemző falvastagság: 3,5 mm
- Tömeg: 0,176 kg

Az öntvényt a korábban alkalmazott precíziós öntés helyett homokformába történő gravitációs öntéssel kívánjuk legyártani. A két gyártási módszerrel szerint beformázott öntvény-forma rendszer jellegábrája a vizsgált geometria esetén az 5. ábrán látható, 3D metszeti képek segítségével bemutatva. Bal oldalon az öntvény (kék) körül a kerámia héj (narancs) kerül kialakításra, míg jobb oldalon az öntvény (kék) körül furángyantás homokforma (narancs) kerül kialakításra.



Kerámia héj

Gravitációs homokforma

5. ábra. A formaüreg kiképzése egyes technológiák esetén

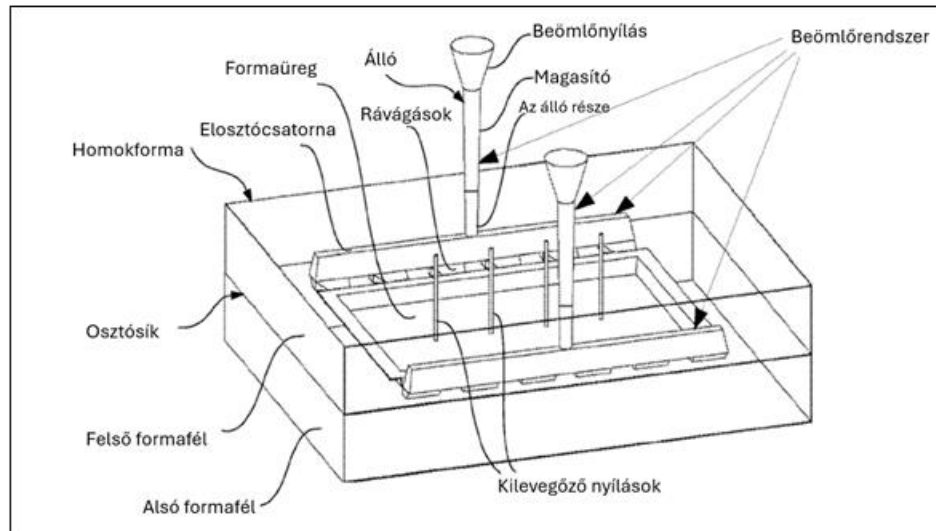
2. Az alkalmazott technológia bemutatása

Az öntvény gyártása során egy szabadalmaztatott öntészeti technológiát kívánunk alkalmazni, mely a homokformába történő öntés egy speciális esetét írja le. A szabadalom tárgya egy eljárás, amely legalább részben vékonyfalú alumínium öntvények gyártására szolgál. Az öntési módszer homokformába történő gravitációs öntési technológia, amely 1,0-3,0 mm falvastagság esetén 100-szor, vagy kedvező esetben 200-400-szor nagyobb teljes méretekkel rendelkező öntvények előállítását teszi lehetővé.

A hidegfolyás elkerülése érdekében a homokformát, legalább az öntvény vékonyfalú részein, kb. 100°C hőmérsékletre előmelegítik, pl. gázláng segítségével. Az esetlegesen alkalmazott magokat, szintén előmelegítik. A homokforma összezárása előtt a szerszámüreg, a beömlők és a rávágások, valamint az öntőcsatornák felületét, szükség esetén ismét felmelegítik.

A megolvasztott alumínium olvadékot 100-200°C-kal túlhevítik mely szintén a hidegfolyás kialakulásának megelőzéséhez járul hozzá. A folyékony fém, a szabadalom részét képező, folyamatosan szűkülő keresztmetszetű beömlőrendszeren keresztül vezetik be az előmelegített formaüregbe, lehetőleg egyenletes térfogatárammal. A szabadalom alkalmazásával a „gravitációs gyorsöntés” lehetséges [6, 7, 8].

A szabadalomban ismertetett öntvény-forma-környezet elemei a 6. ábrán láthatóak.



6. ábra. Öntvény-forma-környezet elemei [6]

3. Az öntvény dermedési folyamatainak vizsgálata

Az alkalmazni kívánt technológia kiválasztása után a megvalósíthatóság vizsgálatát számítógépes szimuláció segítségével végeztük. Ennek során a NovaCast AB cég által fejlesztett NovaFlow&Solid szoftverrendszert alkalmaztuk, mely a Control Volume módszert alkalmazza az anyag- és hőtranszport feladatok megoldására [9, 10].

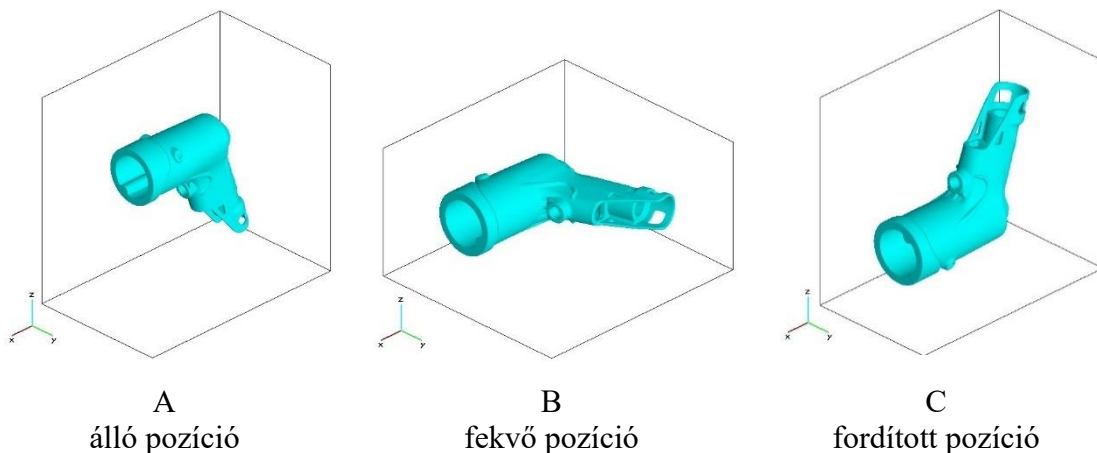
A technológiai vizsgálat első részeként megvizsgáljuk, hogy az öntvény geometrián, adott öntési pozíciókban egy formaszekrénybe helyezve, a dermedés során, a gravitáció függvényében, milyen zsugorodási üregek alakulnak ki. Ezt nevezi a szakirodalom „Natural Erstarrung” vizsgálatnak, melynek során az általunk definiált kiinduló hőmérsékletű olvadék dermedését vizsgáljuk a formában, a formatelési viszonyok elhanyagolása mellett.

A számítás kiindulási és perem feltételei:

Ötvözet:	EN AC-42000
Olvadék kiinduló hőmérséklete:	695°C
Forma befoglaló méretei:	185 x 115 x 175 mm
Forma anyaga:	furángyantas homok
Forma kiinduló hőmérséklete:	100°C
Hőátadás a forma felületén:	hőátadási tényezővel definiálva
Környezet:	levegő
Környezet hőmérséklete:	20°C

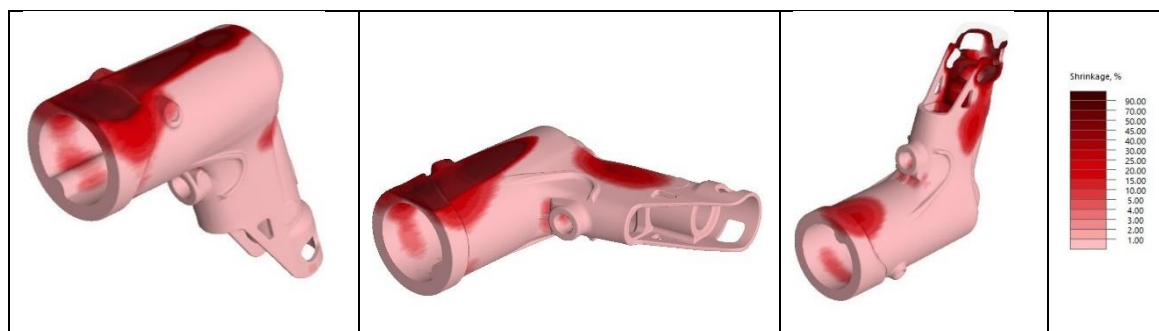
3.1 A gravitáció hatása a fogyási üregek pozíciójára

Ennek során azt vizsgáljuk, hogy az öntési helyzetnek, azaz a gravitációnak, milyen hatása van a kialakuló zsugorodások helyzetére. Ennek segítségével vizsgálható, hogy az adott pozícióban lévő öntvény táplálása milyen módon valósítható meg. A geometria dermedését három öntési pozícióban vizsgáltuk, lásd 7. ábra. A gravitációs vektor iránya mindhárom esetben $Z = -1$.

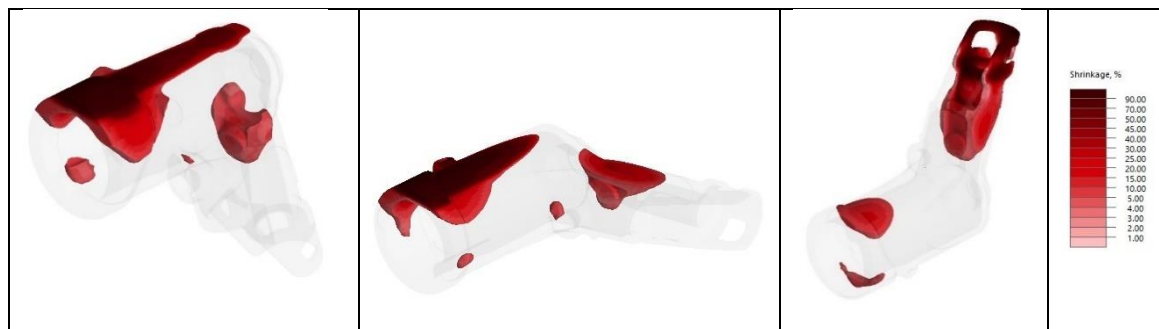


7. ábra. A vizsgált dermedési pozíciók

Az egyes dermedési pozícióban kialakuló zsugorodási üregek a 8. ábrán láthatóak. A skála mindhárom esetben: zsugorodás: 1,0-90,0 V/V%.



Zsugorodási üregek eloszlása (A, B, C pozíció)



Zsugorodási üregek eloszlása, transzparens nézet (A, B, C pozíció)

8. ábra A kialakuló zsugorodási üregek eloszlása

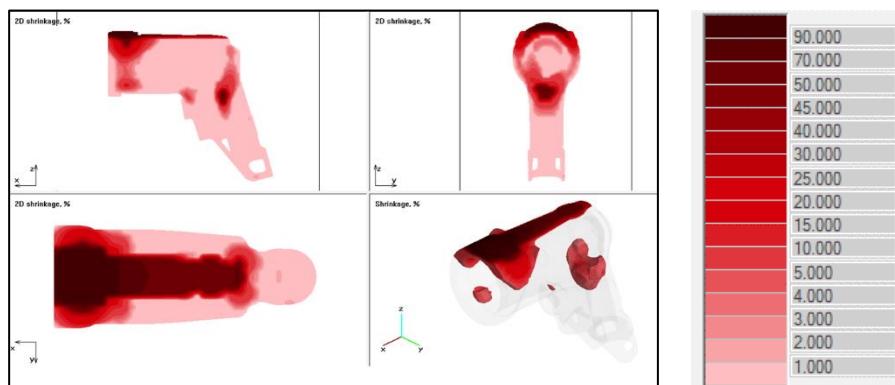
Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy az egyes dermedési pozíciókban kialakuló összes zsugorodások mennyisége közel azonos nagyságrendű:

A pozíció: 6,36%

B pozíció: 6,31%

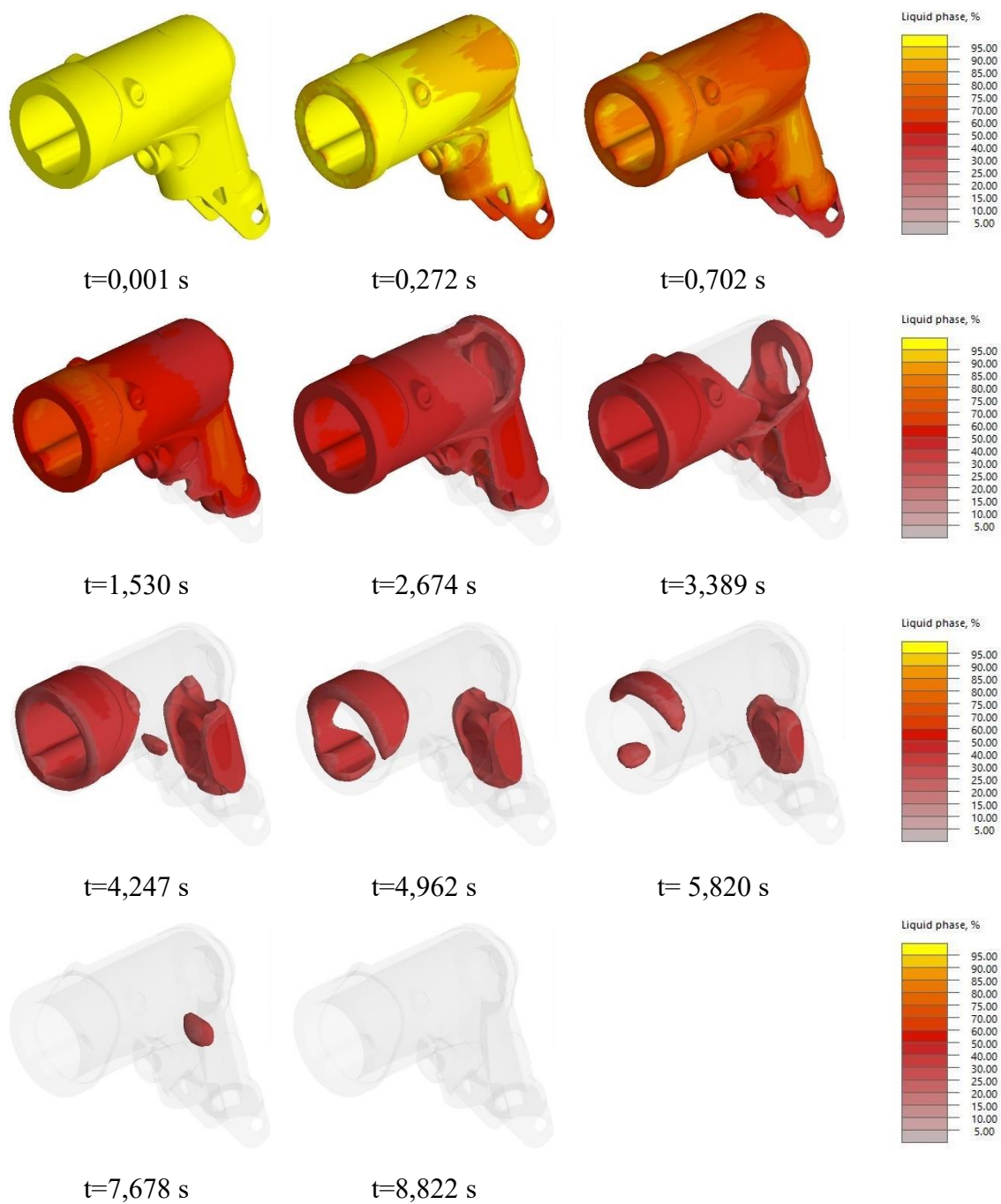
C pozíció: 6,41%

Az egyes kialakuló zsugorodási üregek eloszlása viszont jelentős eltérést mutat. Annak függvényében, hogy a táplálást hogyan lehet megvalósítani (tápfejek pozíciója, mérete, alakja), valamint a vevő által megkövetelt felületi minőség függvényében (megmunkált / öntött állapotú felület) az álló pozícióban (A pozíció) történő öntési helyzetet választottuk ki a további technológizálásra. Az álló pozícióban, táplálás nélkül kialakuló zsugorodások különböző nézetekben az 9. ábrán láthatóak. Zsugorodás skála: 1,0-90,0 V/V%.



9. ábra. Az álló pozícióban kialakuló zsugorodási üregek

Az A verzió dermedésének folyamata az idő függvényében a 10. ábrán látható ún. transzparens megjelenítéssel, azaz a megdermedt öntvényrészek nem kerülnek megjelenítésre. Folyékony fázis skála: 5,0-95,0 V/V%.



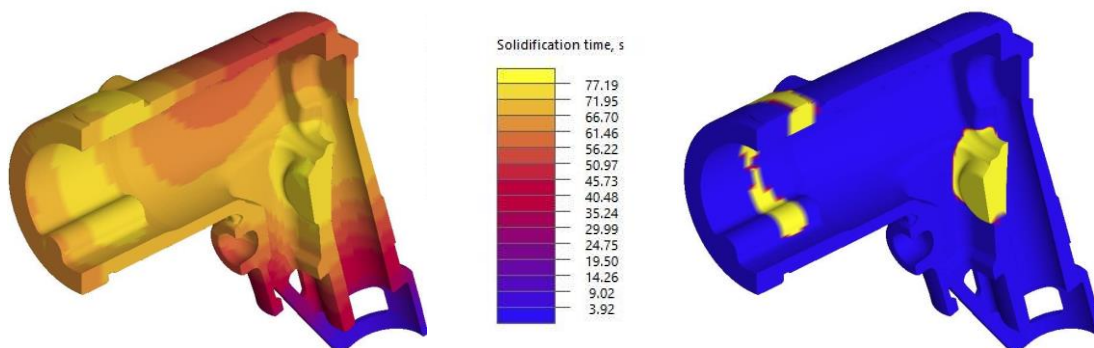
10. ábra. A geometria dermedésének folyamata

Az öntvény dermedése az adott öntési pozícióban az öntvény alsó részén található legkisebb falvastagságú részekkel kezdődik és a hőhalmozódásként viselkedő anyaghalmozódási helyeken fejeződik be. A nevezetes helyek a 11. ábrán láthatóak.



11. ábra bal) először dermedő, jobb) utoljára dermedő részek

Az öntvény számított dermedési ideje, valamint a hőhalmozódási helyek a 12. ábrán láthatóak, 3D metszeti képen bemutatva.



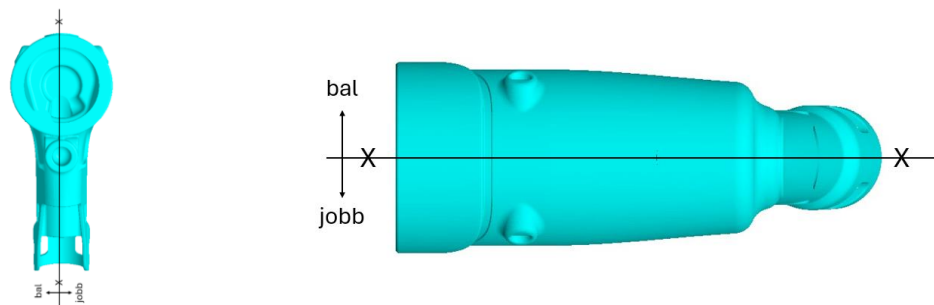
12. ábra bal) Dermedési idő, jobb) anyaghalmozódási helyek

A fenti analízis alapján megállapítható, hogy az álló öntési pozíció megfelel az öntvények gyártására, az irányított dermedés táplálási eszközökkel megvalósítható. Emellett fontos, hogy vevői szempontból nincs porozitás előírás és a megjelenő porozitás nem befolyásolja a termék minőségét. A legnagyobb hőhalmozódási helyen (12. ábra jobb oldal) egy átmenő furat kerül kimunkálásra, ami kiküszöböli az esetleges zsugorodási üreget.

4. Az öntészeti technológiai elemeinek meghatározása

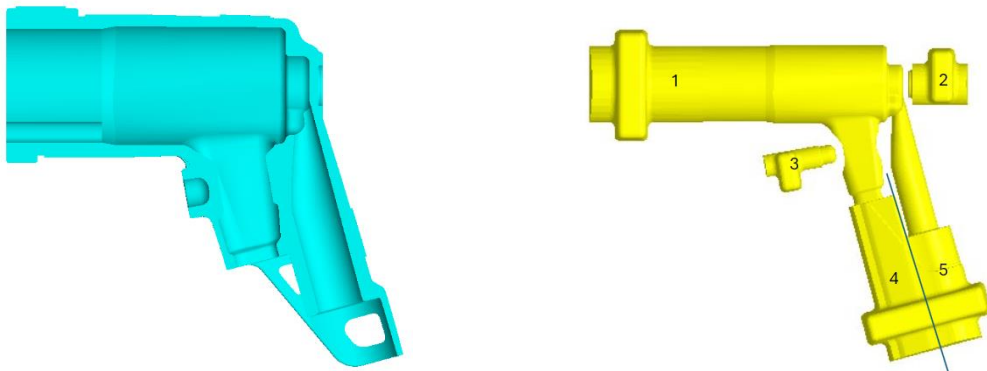
4.1 Osztósík, magok és formázási ferdeségek kialakítása

Az öntészeti technológiai tervezés második eleme az öntési pozíció megválasztása után az osztósík megválasztása. Mivel a geometria közel szimmetrikus, a formázási módnak megfelelően, függőleges osztású formázást alkalmazunk. A formafelek osztása folytonos, függőleges, egyenes osztósíkkal történik, jelölése a 13. ábrán látható.



13. ábra. Osztósík, különböző nézetekben

Az öntvény belső üregei magokkal kerülnek kialakításra, melyek magjelekkel támaszkodnak a formaüreg ún. magfészek részeibe. A magok és magjelek kialakítása, alapvető öntészeti méretezési elvek betartásával, jellemzően technológiai tapasztalat alapján történik. A vizsgált esetben 5 db maggal kerülnek kialakításra a belső üregek, melyek az 14. ábrán láthatóak.



Az öntvény belső üregei, 3D metszet

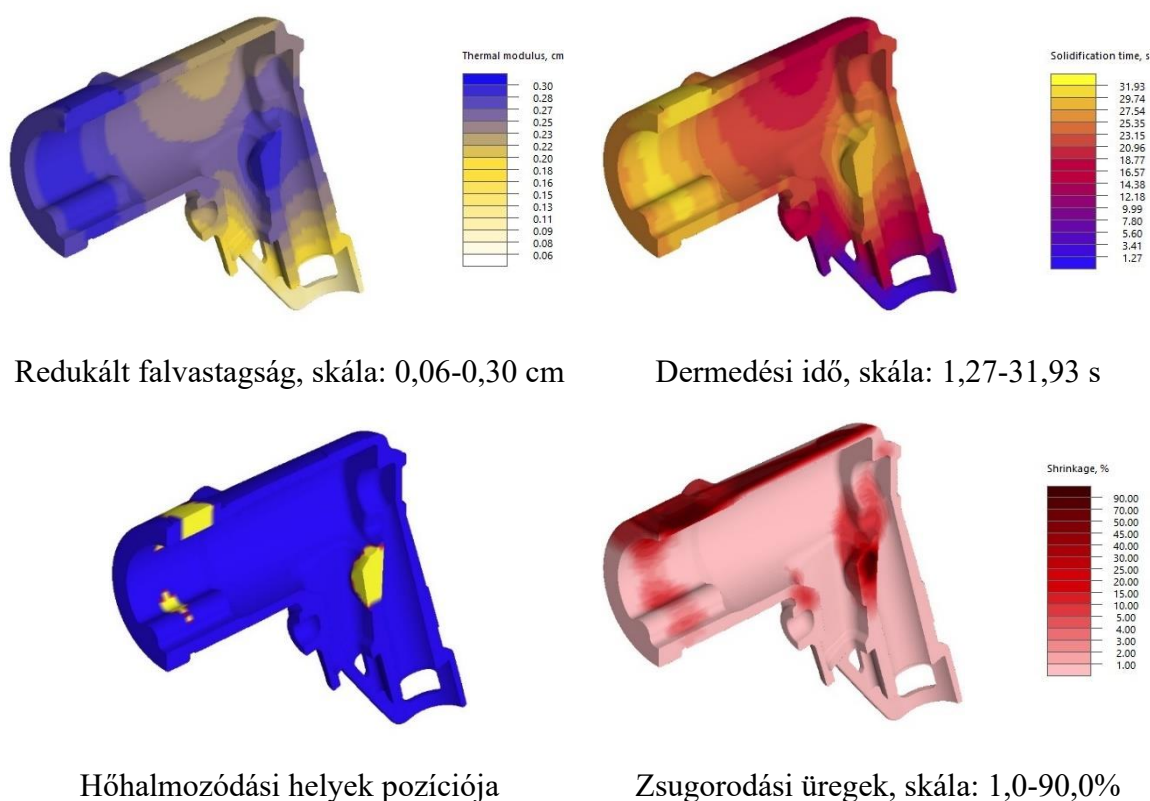
Az öntvény belső üregeit kiképző magok

14. ábra. Magok kialakítása

A geometria jellege miatt formázási ferdeségek alkalmazása nem indokolt, a minta a formából pótlólagos ferdeségek nélkül is eltávolítható.

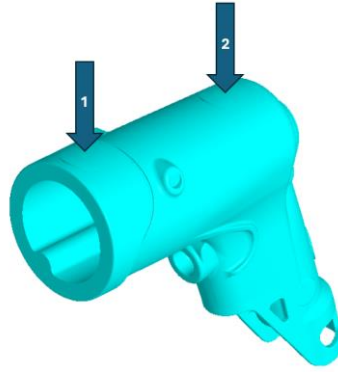
4.2 Táplálórendszer kialakítása

Az öntvény táplálórendszerét szakirodalmi források és üzemi tapasztalat alapján kívánjuk megvalósítani [11]. Első lépésként vizsgáljuk a kialakuló dermedési viszonyokat, az osztósík metszősíkjában, 3D metszeti nézetben. A 15. ábrán a redukált falvastagság (skála: 0,06-0,3 cm), a dermedési idő (skála: 1,27-31,93 s), a hőhalmozódási helyek pozíciója és a számított zsugorodások (skála: 1,0-90,0 V/V%) láthatóak.



15. ábra. A dermedés során kialakult jelenségek vizsgálata

A dermedés során kialakult jelenségek- és az öntvény geometriájának vizsgálata alapján két darab, ún. ráültetett tápfejet méretezünk, melyek csatlakozási helye az 16. ábrán kerül bemutatásra. A tápfejek csatlakozása kontúrkövető módon kerül kialakításra.



16. ábra. A tervezett tápfejek pozíciója

A tápfejek közelítő méretezését a Chvorinov és a Nicolas szabályok alapján végezzük el. A Chvorinov szabály segítségével számítható egy adott öntvény, vagy öntvényrész dermedési ideje [11, 12]:

$$t_{\text{derm}} = CM^2 = \frac{\sqrt{\pi} \rho_{\text{olv}} (L_s + c_{\text{fém}} \Delta T)}{2T_B^0 \sqrt{\lambda_{\text{forma}} c_{\text{forma}} \rho_{\text{forma}}}} \left(\frac{V}{A}\right)^2 \quad (1)$$

ahol,

t_{derm}	dermedési idő	$c_{\text{fém}}$	ötvözet fajlagos hőkapacitása
C	konstans	ΔT	túlhevítés
M	kitáplálандó öntvényrész redukált falvastagsága	T_B	falhőmérséklet
V	öntvényrész térfogata	λ_{forma}	forma hővezetési tényezője
A	öntvényrész felülete	c_{forma}	forma fajlagos hőkapacitása
ρ_{olv}	olvadék sűrűsége	ρ_{forma}	forma sűrűsége
L_s	látens hő		

A tápfejekkel szemben támasztott követelmény, hogy az öntvény dermedése, azaz a zsugorodás során lássák el folyékony fémrel a kitáplálандó öntvényrészt. Ennek érdekében a tápfejeknek később kell megdermedni, mint a csatlakozó kitáplálандó öntvényrésznek. Ez a kritérium a tápfej redukált falvastagságának megfelelő méretezésével teljesíthető, a Nicolas szabály szerint:

$$M_{\text{tápfej}} \cong K \cdot M_{\text{öntvény}} \quad (2)$$

ahol,

$M_{\text{tápfej}}$: a tápfej redukált falvastagsága

K: állandó: 1,2-1,6

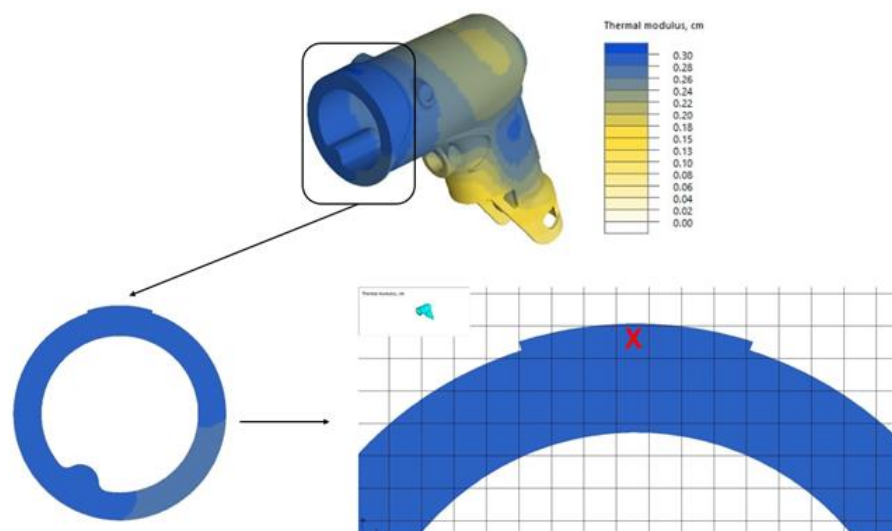
$M_{\text{öntvény}}$: kitáplálандó öntvényrész redukált falvastagsága

A K állandó értéke függ az öntött olvadék és a forma anyagától.

Fontos megjegyezni, hogy a fenti összefüggések a klasszikus gravitációs homokformába történő öntés esetére kerültek felírásra (öntöttvas olvadék, bentonitos homokforma). Az összefüggések az általunk alkalmazott öntési módszer (alumínium olvadék, előmelegített gyantás homokforma) esetén is érvényesek, de az alkalmazott konstansok értékei (C, K) a fenti értékektől eltérőek lehetnek [2, 16, 17].

4.2.1 Az 1. számú tápfej méretezése

Az 1. tápfej méretezését az öntvény dermedési vizsgálata alapján végeztük el. A vizsgált öntvény redukált falvastagsága az 17. ábrán látható. Skála: 0,0-0,3 cm. Az ábra felső részén az öntvény redukált falvastagsága látható 3D axonometrikus nézetben, alul bal oldalon a vizsgált geometriai hely 2D metszet, míg jobb oldalon annak kinagyított részlete látható.



17. ábra. A vizsgált 1. öntvényrész redukált falvastagsága

A vizsgált 1. öntvényrész lokális redukált falvastagsága a kitáplálendő öntvényrész 3D metszetén, a pirossal jelzett helyen: $M_1=0,294$ cm. A redukált falvastagság ($M = V/A$) tulajdonképpen azt mutatja meg, hogy egy adott öntvény, vagy öntvényrész a tárfogatában foglalt hőmennyiséget mekkora felületen keresztül tudja leadni a környezetének. A redukált falvastagság mértékegysége az SI rendszertől eltérően centiméter. A kitáplálendő öntvényrész redukált falvastagsága alapján elvégeztük a tápfej méretezését és annak eredményét ellenőriztük a NovaFlow&Solid szoftver tápfej méretező moduljának

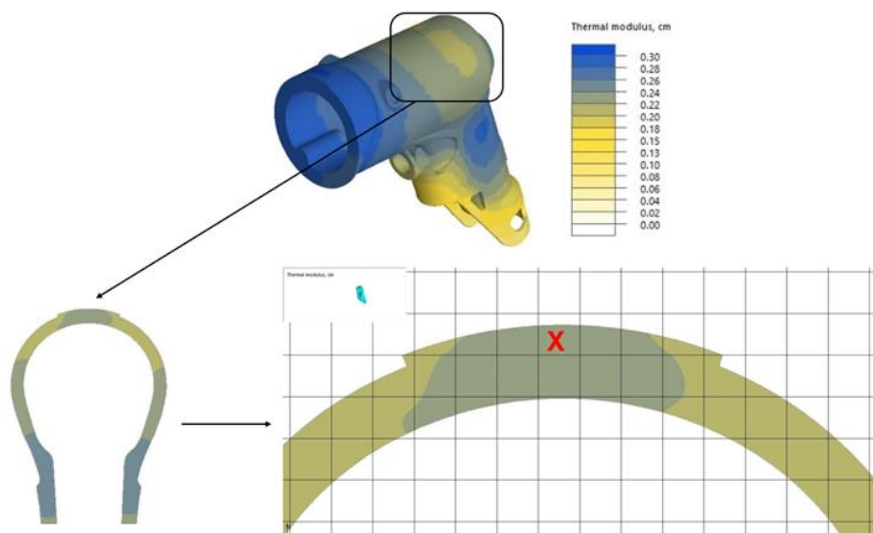
segítségével. A számítás bemenő paraméterei és a számítás eredménye az 4. táblázatban láthatóak.

4. táblázat. Az 1. tápfej közelítő méretezése

Bemenő paraméterek		Tápfejszámítás eredménye	
ötvözet	EN AC-42000	tápfej modul	min. 0,485
sűrűség	2374,77 kg/m ³	valós tápfej/öntvény modul arány	1,646
kitáplálándó öntvényrész modulja	0,294 cm	táplálási olvadék igény	4,762 cm ³
öntvény tömege	0,157 kg	tápfej tömege	min. 0,048 kg
öntési hőmérséklet	695°C	tápfejnyak modul	0,324 cm
tápfej/öntvény modul arány	min. 1,2	tápfej átmérője	min. 25,848 mm
tápfej magasság / átmérő aránya	min. 1,5	tápfej magassága	min. 38,772 mm
tápfej alakja	hengeres		
tápfej pozíciója	ráültetett		
forma keménysége	80 (-)		

4.2.2 A 2. számú tápfej méretezése

A 2. tápfej méretezését az öntvény dermedési vizsgálata alapján kezdtük meg. A vizsgált öntvény termikus redukált falvastagsága az 18. ábrán látható. Skála: 0,0-0,3 cm.



18. ábra. A vizsgált 2. öntvényrész redukált falvastagsága

A 2. vizsgált öntvényrész lokális redukált falvastagsága a kitáplálendő öntvényrész 3D metszetén, a pirossal jelzett helyen: $M_1=0,22$ cm.

A kitáplálendő öntvényrész redukált falvastagsága alapján elvégeztük a tápfej méretezését és annak eredményét ellenőriztük a NovaFlow&Solid szoftver tápfej méretező moduljának segítségével. A számítás bemenő paraméterei és a számítás eredménye az 5. táblázatban láthatóak.

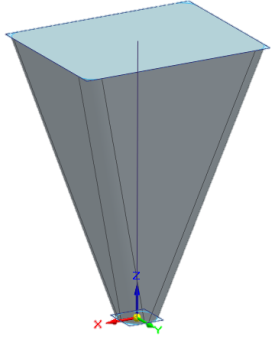
5. táblázat A számítás bemenő paraméterei és a számítás eredménye

Bemenő paraméterek		Tápfejszámítás eredménye	
öntvözet	EN AC-42000	tápfej modul	min. 0,452
sűrűség	2374,77 kg/m ³	valós tápfej/öntvény modul arány	2,052
kitáplálendő öntvényrész modulja	0,22 cm	táplálási olvadék igény	4,762 cm ³
öntvény tömege	0,157 kg	tápfej tömege	min. 0,039 kg
öntési hőmérséklet	695°C	tápfejnyak modul	0,242 cm
tápfej/öntvény modul arány	min. 1,2	tápfej átmérője	min. 24,092 mm
tápfej magasság / átmérő aránya	min. 1,5	tápfej magassága	min. 36,137 mm
tápfej alakja	hengeres		
tápfej pozíciója	ráültetett		
forma keménysége	80 (-)		

Az elvégzett közelítő számítások alapján kerültek megtervezésre a tényleges tápfej geometriák, figyelembe véve a valós technológiai paramétereket:

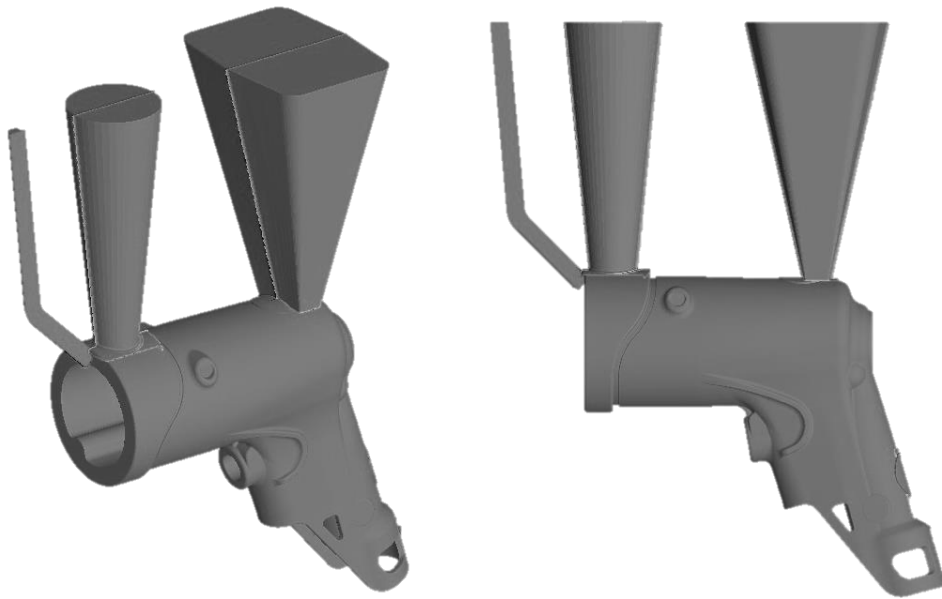
- az öntvény geometriai alakja,
- a forma keménysége,
- a forma hőmérséklete,
- a forma magassága,
- az 1. tápfej valós alakja: kúpos
- a 2. tápfej valós alakja: szögletes
- a tápfejnyakak csatlakozásának alakja: kontúrkövető

A tervezett tápfej alakok és fő méretek az 19. ábrán láthatóak.

	1. tápfej	2. tápfej
		
magasság:	80 mm	80 mm
tápfejnyak:	ø 16 mm	10 x 10 mm
legkisebb tápfej keresztmetszet:	ø 16 mm	10 x 10 mm
legnagyobb tápfej keresztmetszet:	ø 30 mm	60 x 47 mm

19. ábra. Tápfej alakok és fő méretek

A tápfejek mellett, az 1. tápfej környezetében tervezésre került továbbá egy kilevegőző csatorna. Az öntvény és a ráültetett tápfejek nézeti képei az 20. ábrán láthatóak.



20. ábra. Az öntvény és a tápfejek nézeti képei

4.3 A beömlőrendszer méretezése

A beömlőrendszer méretezése kevésbé tehető meg elméleti összefüggések alapján, mivel minden öntvényalak más és más, így a beömlőrendszerek tervezése esetén az egyes öntödék nagymértékben támaszkodnak a technológiai tapasztalatukra és jellemzően empirikus összefüggések alapján méreteznek [12].

A vizsgált esetben egy szabadalmaztatott méretezési eljárást alkalmazunk, mely a hagyományos, homokformába öntött öntvények beömlőrendszerével szemben az alábbi elveken alapul:

- Az öntési magasság növelése az álló növelésével az öntvény geometriai méreteihez igazodóan.
- Az elosztócsatornák szakaszosítása.
- A rávágások kialakításánál drasztikus méretkülönbség megvalósítása, az áramlási keresztmetszet leszűkítésével.
- Az egyes formarészek előmelegítése
- Az olvadék túlhevítési hőmérsékletének növelése.
- A fentiek kombinált alkalmazása.

A méretezés klasszikus alapelve a rávágás keresztmetszetének szabályozásán alapul, mellyel kontrollálható az öntési idő. Azaz, adott mennyiségű olvadékot, adott idő alatt kívánunk átjuttatni a rávágáson keresztül.

$$\Sigma A_{\text{rávágás}} = \frac{M}{\eta \rho t_0 \sqrt{2gH}} \quad (3)$$

Ahol:

- $\Sigma A_{\text{rávágás}}$: rávágások összes keresztmetszete
M: öntvény + tápfej(ek) tömege folyékony állapotban
 η : áramlási veszteség tényező
 ρ : olvadék sűrűsége
g: nehézségi gyorsulás
 t_0 : öntési idő, $t_0 = \sqrt{2M}$
 H_0 : ferrosztatikus magasság

A beömlőrendszer egyéb elemeinek keresztmetszetei a számított rávágás keresztmetszet függvényében kerülnek meghatározásra. A vizsgált technológia esetén azonban olyan nagymértékben térünk el a szakirodalomban ismertetett esetektől, hogy a klasszikus beömlőrendszer méretezési elvek itt nem, vagy csak részben érvényesülnek.

Az adott öntvénycsokor esetén, közelítőleg, az alábbi olvadéktömegeket kívánjuk átjuttatni a rávágáson:

$$\Sigma M_{\text{olvadék}} = M_{\text{öntvény}} + M_{1.\text{tápfej}} + M_{2.\text{tápfej}} \quad (4)$$

$$\Sigma M_{\text{olvadék}} = 0,176 \text{ kg} + 0,260 \text{ kg} + 0,107 \text{ kg} = 0,543 \text{ kg}$$

A beömlőrendszer felépítése, klasszikus esetben az álló, elosztó, rávágás rendet követi. A vizsgált esetben ettől eltérünk. A beömlőrendszer közelítő számítását a NovaFlow&Solid szoftver Gating Calculation moduljával tesszük meg, majd illesztjük a meghatározott közelítő értékeket a valós technológiai megoldáshoz. A számítás bemenő és számított értékei a 6.A táblázatban láthatóak

6.A táblázat. A beömlőrendszer közelítő számítása

Bemenő paraméterek		Számítási eredmények	
öntvözet	EN AC-42000	öntés sebessége	0,1 kg/s
sűrűség	2374,8 kg/m ³		30,4 cm ³ /s
öntvény tömege	0,156 kg	álló tömege	0,01 kg
fészeks szám	1	felső átmérő	9,1 mm
tápfejek tömege	0,37 kg	alsó átmérő	4,3 mm
Jellemző falvastagság	3,5 mm	súrlódási veszteség tényező	0,52%
öntvény teljes magassága	106 mm	metallostatikus nyomómagasság	37,2 mm
öntvény magassága a felső formafélben	106 mm	Σ rávágás keresztmetszet	69 mm ²
Álló magassága	70 mm	rávágás vastagsága	3,4 mm

Bemenő paraméterek		Számítási eredmények	
beömlőrendszer típusa	szűkülő	rávágás szélessége	10,2 mm
legkisebb keresztmetszet	rávágás	beömlőrendszer tömege	0,4 kg
elosztók száma	1	öntvény kihozatala	28,2%
elosztók hossza	40 mm		
beömlőből pozíciója	forma tetején		
választott öntési idő	7,3 s		

A közelítő számítás alapján, a szabadalom és a technológiai tapasztalat birtokában került méretezésre a valós beömlőrendszer, mely elemeinek méretei a 6.B táblázatban láthatóak.

6.B táblázat. A beömlőrendszer elemeinek méretei

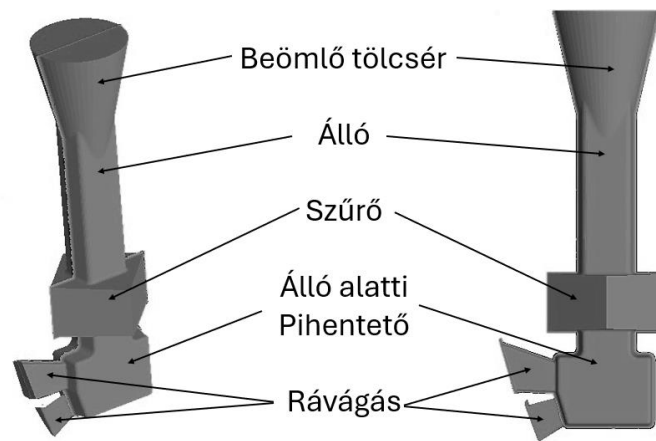
Beömlő „tölcsér”		Álló alatti pihentető	
legnagyobb átmérő	46 mm	keresztmetszet	40 x 18 mm
legkisebb átmérő	25,5 mm		720 mm ²
magasság	44 mm	magasság	28
Álló		1. Rávágás	
keresztmetszet	26 x 18 mm	hossz	max. 24 mm
	468 mm ²	keresztmetszet	4 x 18 mm
teljes magasság	100 mm		72 mm ²
Szűrőfészek		2. Rávágás	
keresztmetszet	35 x 35 mm	hossz	max. 12 mm
magasság	24 mm	keresztmetszet	1,5 x 14,5 mm
			21,7 mm ²
		Σ rávágás	
		keresztmetszet	93,7 mm ²

A beömlőrendszer elemeinek keresztmetszetei és a rávágás összes keresztmetszetéhez viszonyított arányai a 7. táblázatban láthatóak.

7. táblázat. A beömlőrendszer elemeinek viszonyai

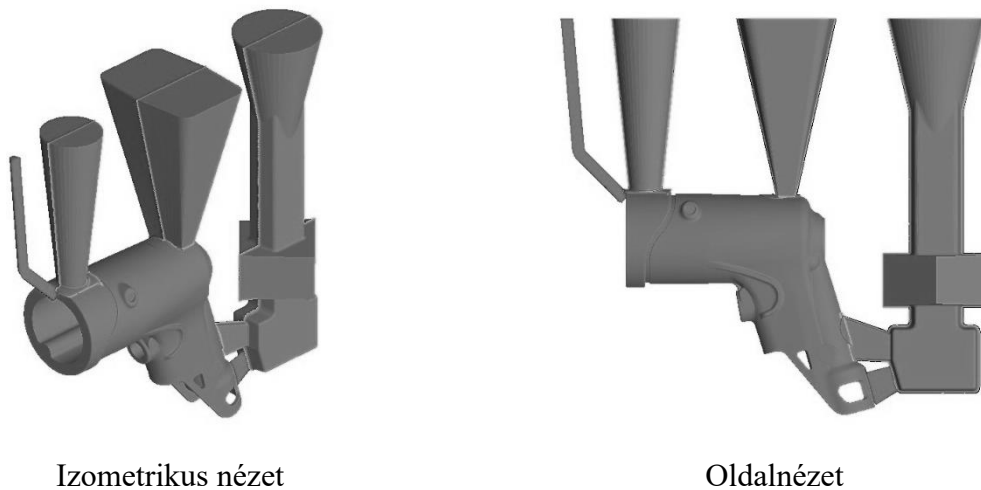
	rávágás		álló alatti pihentető		álló
keresztmetszet, mm ²	93,7	:	720	:	468
arány	1	:	7,6	:	5

A beömlőrendszer elemei a 21. ábrán láthatóak.



21. ábra. A beömlőrendszer részei izometrikus és oldalnézetben

A teljes öntvénycsokor az 22. ábrán látható.



22. ábra. Öntvénycsokor

5. A kidolgozott technológia szimulációs vizsgálata

A geometria vizsgálatára számos szimulációs vizsgálatot futtattunk, melyeket a korábbiakban már bemutattunk. Az eddigi futtatásokat az alábbiak szerint foglalhatjuk össze, lásd 8. táblázat.

I. A geometria öntési pozíciójának meghatározása

II. A precíziós öntés dermedési viszonyainak meghatározása

III. A homokformába történő öntés dermedési viszonyainak meghatározása

8. táblázat. Lefuttatott szimulációs kísérletek mátrixa

Nr.	Pozíció	Geometria	Vizsgálat	Forma	T _{forma}	Zsugorodás
HL_I	Vertikális	Öntvény	Dermedés	Homok	100°C	Számított
HL_I.B	Vertikális	Öntvény	Dermedés	Homok	100°C	Nem számított
HL_II	Horizontális	Öntvény	Dermedés	Homok	100°C	Számított
HL_III	Fordított	Öntvény	Dermedés	Homok	100°C	Számított
Nr.	Geometria	Vizsgálat	Forma	T _{forma}	Mag	Zsugorodás
HL_1	Öntvény	Dermedés	Kerámia	250°C	-	Számított
HL_2	Öntvény	Dermedés	Kerámia	250°C	-	Nem számított
HL_3	Öntvény	Dermedés	Homok	250°C	Nem	Számított
HL_4	Öntvény	Dermedés	Homok	250°C	Nem	Nem számított
HL_5	Öntvény	Dermedés	Homok	250°C	Igen	Nem számított

Vizsgálataink jelenlegi részében, lásd 9. táblázat, a kidolgozott technológiának megfelelően (öntvény, beömlőrendszer, táplálórendszer) vizsgáljuk a formatelési és dermedési viszonyokat.

9. táblázat. Öntvénycsokor szimulációs kísérleteinek mátrixa

Nr.	Geometria	Vizsgálat	Forma	T _{forma}	Mag	Zsugorodás
HL_6	Csokor szűrő nélkül	Formatelés Dermedés	Homok	250°C	Igen	Számított
HL_7	Csokor szűrő nélkül	Formatelés Dermedés	Homok	100°C	Igen	Számított
HL_8	Csokor szűrővel	Formatelés Dermedés	Homok	100°C	Igen	Számított

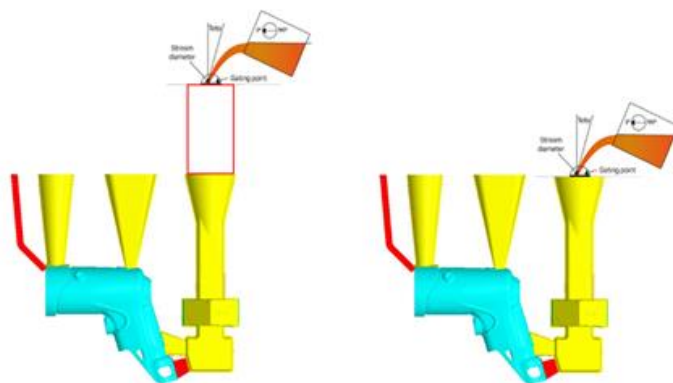
A kiindulási és peremfeltételeket a kidolgozott technológia (HL_8) vizsgálatának esetén ismertetem részletesen, a 10. táblázatban.

10. táblázat. Kiindulási- és peremfeltételek

1	elemi cella	2,5 mm	11	T _{környezet}	20°C
2	cellák száma	455.499 db	12	öntés	buktatva
3	gravitáció	Z=-1	13	térfogatáram	0,36 kg/s
4	olvadék	EN AC-42000	14	sugár	ø10,7 mm
5	T _{olvadék}	595°C	15	belépési szög	15°
6	magok	héjhomok	16	öntési idő	szűrő nélkül: 4,7 s
7	T _{mag}	100°C	17	öntési idő	szűrővel: 7,4 s
8	szűrő	kerámia, 20PPI			
9	T _{szűrő}	100°C			
10	környezet	levegő			

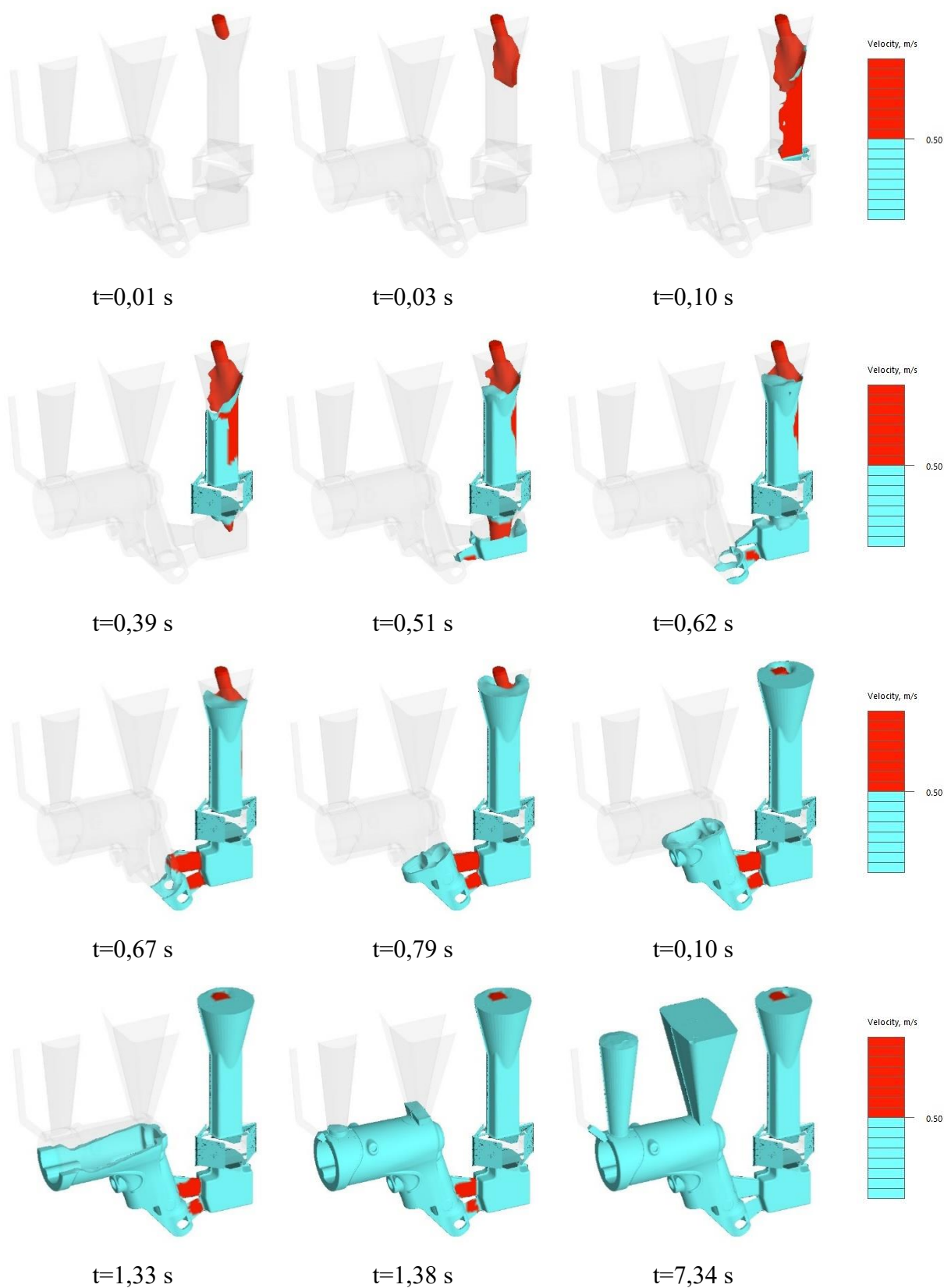
5.1 Formatelési viszonyok vizsgálata

Az olvadék a valós öntési körülmények között a definiált viszonyoknak megfelelően lép be a formába, az ún. öntési magasításon („tölcsér”) keresztül. A szimulációban ezt a magasítást a metallosztatikus nyomómagasságon keresztül vesszük figyelembe. Ebben az esetben az olvadék a beömlőtölcsérbe egy már számított kiinduló sebességgel lép be, lásd 23. ábra.



23. ábra. Olvadék belépése a formába, bal) valós viszonyok között, jobb) metallosztatikus magassággal figyelembevételével

A formatelés folyamatát az olvadék áramlási sebességével mutatom be, kéttónusú skála segítségével. A skála, egy megválasztott sebesség (0,5 m/s) alatti értékeket kék színnel, míg az e feletti értékeket piros színnel jeleníti meg. A 0,5 m/s peremértéket annak megfelelően definiáltam, hogy a szakirodalom szerint, fémolvadékok áramlása esetén, az e feletti áramlási sebességek esetén turbulencia alakul ki az olvadékban, ami számos hiba forrása (pl. levegőbezáródás, bifilm). A kéttónusú skála segítségével jól vizsgálható a formatelés menete, lásd 24. ábrásor [11]. A ($t=0,01$) időpillanatban, a jellemzően 1,5 m/s sebességgel érkező olvadéksugár a beömlőtölcséren keresztül belép a beömlőrendszerbe és nekicsapódik az álló falának ($t=0,03$ s). ($t=0,09$ s) időpillanatban a szabadon eső és gyorsuló olvadéksugár eléri a szűrő felületét és nekicsapódik annak. ($t=0,39$ s) időpillanatban az olvadéksugár átjut a szűrőn és belép az álló alatti pihentető részbe, melynek ($t=0,44$ s) időpillanatban éri el az alját, jellemzően 0,68 m/s sebességgel. ($t=0,51$ s) időpillanatban az olvadék eléri a rávágást és az alsó rávágáson keresztül belép a formaüregbe. ($t=0,62$ s) időpillanatban a felső rávágáson is belép az olvadék a formaüregbe és ott összekeveredik az alulról dagadó módon érkező olvadékkal. A beömlőrendszer feltelésének pillanatában ($t=0,67$ s) a rávágáson keresztül a formaüregbe lépő fém kismértékben felgyorsul, a rávágásban elérve a 0,56 m/s sebességet. A formatelés további részében az olvadék egyenletes módon, 0,5 m/s-nál alacsonyabb áramlási sebességgel, dagadó módon tölti meg a formaüreget a formatelés végéig ($t=7,34$ s).



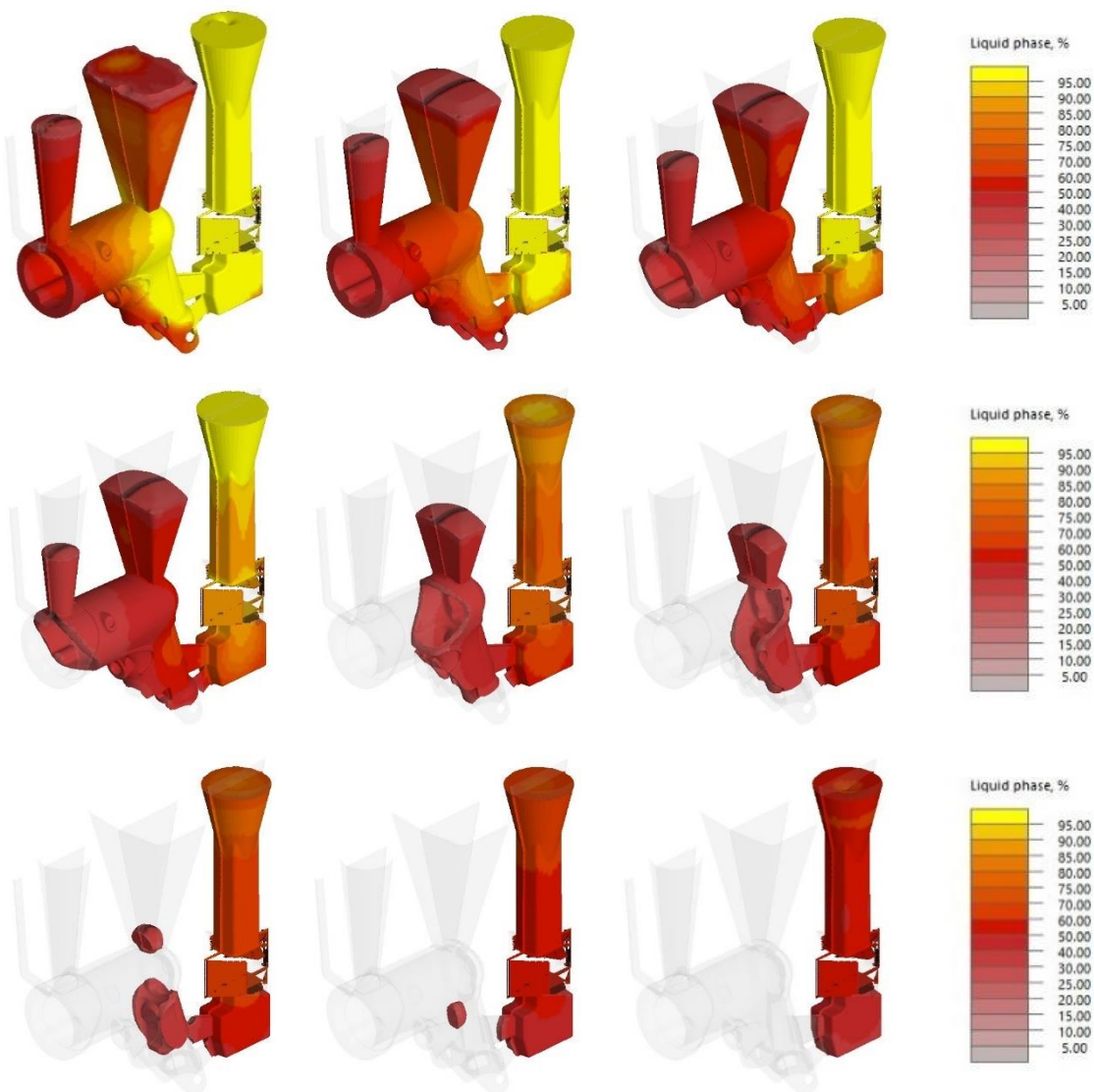
24. ábra. A formatelés folyamata, skála $<[0,5 \text{ m/s}] <$

A formatelés közben levegőbezáródás nem alakul ki. Vizsgáltam a beömlőrendszeren keresztül a formaüregbe jutó virtuális részecskék mozgását is, melyek vizsgálata alapján szintén kijelenthető, hogy az öntvény formaüregének megtelése fokozatosan, a gravitáció irányával ellentétesen történik, miközben az olvadék áramlási sebessége 0,5 m/s alatti, ezáltal nem lép fel felületi turbulencia. Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a beömlőrendszer segítségével, a vizsgált öntési paraméterek esetén, hibamentesen tölthető meg a formaüreg.

5.2 Dermedési viszonyok vizsgálata

A forma megtelésének időpillanatában ($t=7,34$ s) a formaüregben lévő olvadék 82,89%-ban van olvadék állapotban. Ebből a kiinduló állapotból vizsgáljuk a dermedést, mely a 25. ábrán látható, transzparens módon ábrázolva, azaz a már megdermedt részek nem kerülnek megjelölésre. Folyékony fázis skála: 5-95%.

A bemutatott dermedési folyamat kezdete és vége: $t=7,34$ s - $t=73,19$ s.



25. ábra. Az öntvény dermedésének folyamata

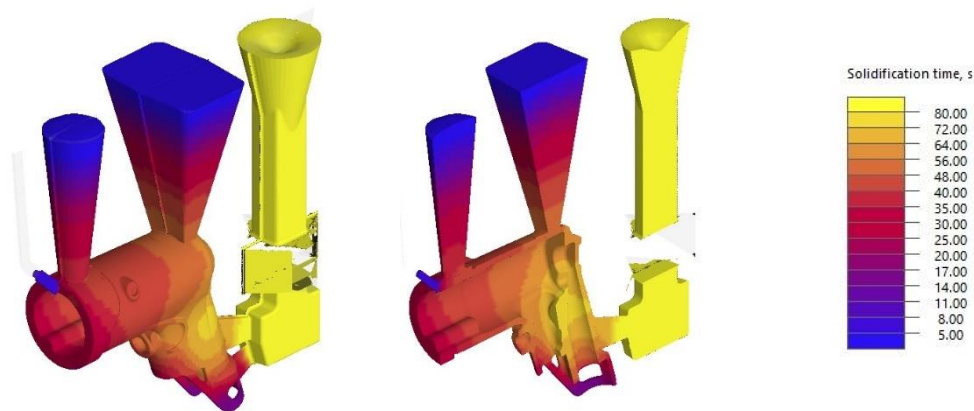
A dermedési folyamat alapján vizsgálhatóak, nem megjelenítve a beömlő és a táplálórendszert, az öntvény először és utoljára dermedő részei, lásd 26. ábra:

- Az öntvény először dermedő részei a geometria alsó részén lévő kis falvastagságú részek.
- Az utoljára dermedő öntvényrész a geometria belső részén található anyaghalmozódás.



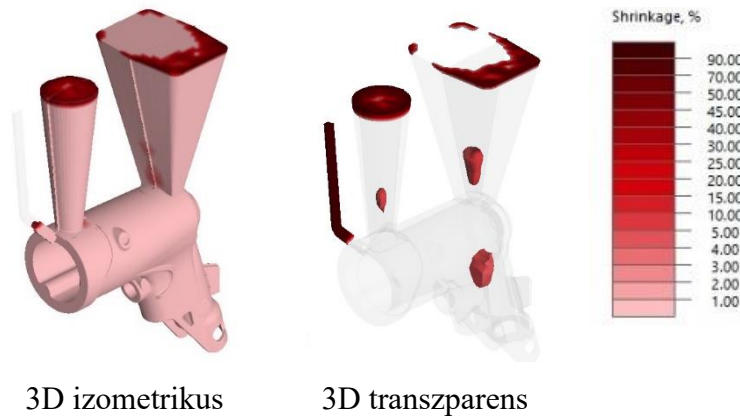
26. ábra. bal) Először és jobb) utoljára dermedő öntvényrészek

Az utoljára dermedő öntvényrész pozíciójának ismeretében, a szimulációban és a valós öntvényen is vizsgálni kell a kialakuló zsugorodásokat. A teljes öntvénycsokor dermedési ideje axonometrikus nézetben és 3D metszeten a 27. ábrán látható. Dermedési idő skála: 5,0-80,0 s.



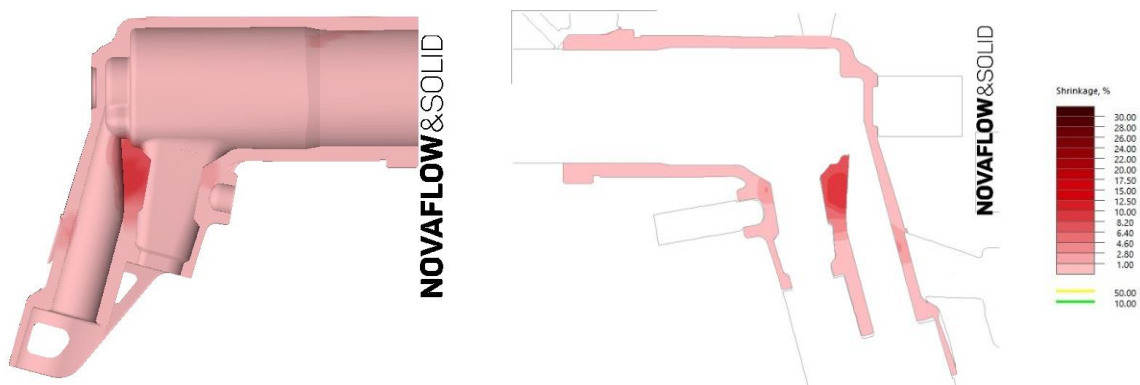
27. ábra. Számított dermedési idő, bal) axonometrikus nézet, jobb) 3D metszet

A 27. ábrán látható, hogy a tápfejek az öntvény kis falvastagságú, közepes dermedési idejű részeihez csatlakoznak, míg a teljes öntvénycsokor utoljára dermedő része a beömlőrendszer. Az öntvénycsokorban a dermedés során kialakuló zsugorodási üregek különböző nézetek és metszetek segítségével bemutatva a 28. ábrán láthatóak. Zsugorodás skála: 1,0-90, V/V%.



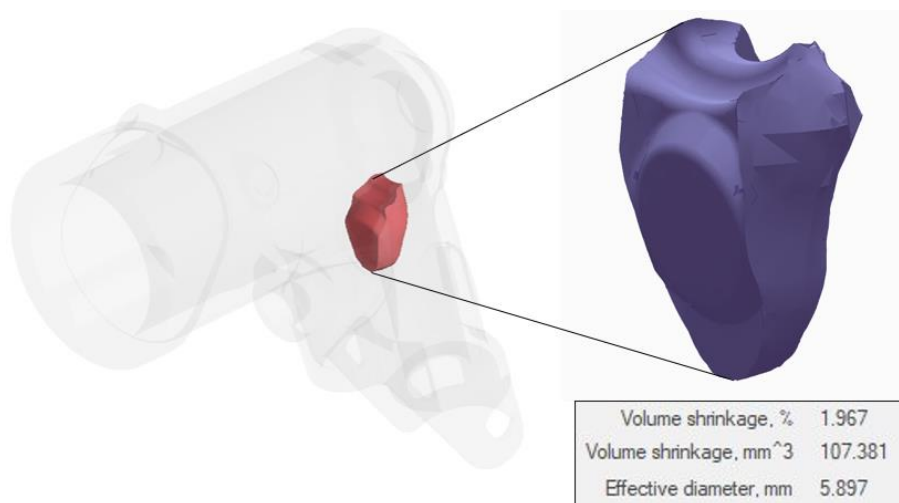
28. ábra Az öntvénycsokorban kialakuló zsugorodások különböző nézetekben

A fenti 28. ábrán látható, hogy tápfejek és a részben táplálásra is szolgáló beömlőrendszer ellátja a feladatát és az öntvényben, egy középső anyaghalmozódási hely kivételével zsugorodási üregek nem alakulnak ki. A beömlő-és tápfej nélkül megjelenített öntvény geometriájában lévő zsugorodások a 29. ábrán láthatóak 3D és 2D metszeteken. Zsugorodás skála: 1,0-30,0 V/V%.



29. ábra. Az öntvényben kialakuló zsugorodások, 3D és 2D metszet

A fenti 29. ábrán látható, hogy az öntvény a tápfejek által kitáplálásra kerül, kivéve a geometria középpontjában található anyaghalmozódási rész. Ebben a geometriai részben 5,0-8,0 százaléknyi anyaghiány alakul ki, melynek 3D geometriája az öntvény kontúrjával, illetve CAD környezetbe exportálva a 30. ábrán látható.

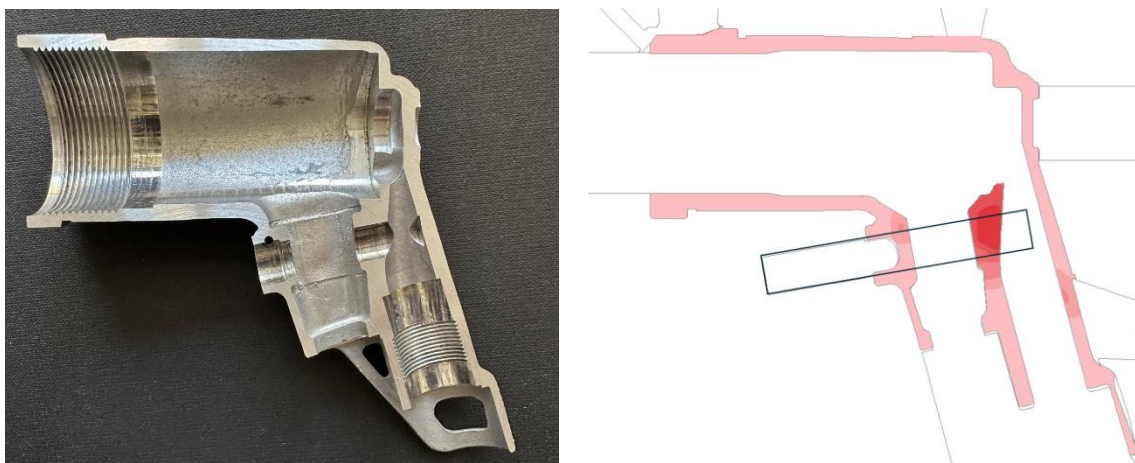


30. ábra. Az anyaghalmozódási rész geometriájának vizsgálata

Az anyaghalmozódási helyben kialakuló térrész CAD munkakörnyezetbe exportálható, ahol vizsgálható és számszerűsíthető annak geometriája. A vizsgált geometria adatai:

- A zsugorodott térrész befoglaló mérete: 107,381 mm³
- A térréssel ekvivalens gömb átmérője: 5,897 mm
- A vizsgált térfogaton belüli összes zsugorodás mennyisége: 1,967%

A vizsgált geometriai rész, az öntvény megmunkálása során eltávolításra kerül, így az itt lévő porozitás az öntvény felhasználóságát nem befolyásolja. A valós megmunkált öntvény metszete és a szimulációs eredmény 2D metszete az eltávolítandó résszel a 31. ábrán látható.



31. ábra. A megmunkált öntvény 3D metszete és a szimulációval számított 2D metszet

A fenti vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a kidolgozott technológia alkalmas az öntvény gyártására és ez alapján kezdődhet az öntödei gyártás paramétereinek meghatározása és a próbagyártás.

6. Öntödei próbagyártás

Az öntödei próbagyártási folyamat első lépése az öntvény formaüregét tartalmazó homokforma- és a belső üregeket kiképző magok elkészítése. A homokforma furángyantas homokkeverékből készül. Az alkalmazott homok KH5 típusú, mosott, osztályozott, szárított kvarchomok, melynek szemcseméret tartománya 0,00-0,20 mm.

A tömör magok héjhomokból készülnek, melynek forgalmazója a Foseco. Ez a homoktípus hexametilén tetramin és fenol keverékével bevonatolt kvarchomok.

Az egyes formafelek formázása mintalappal és formaszekrénnyel egybeépített, műgyantából készült minta kézi formázással történik, lásd 32. ábra. A megfelelő térfogatsűrűség beállítása kézi tömörítéssel történik.



32. ábra. Mintalap és a kézi formázás folyamata

A héjhomok magok gyártása fémből készült magszekrényben történik, melyek szárítókemencében kerülnek szilárdításra. A különböző homokmagokhoz különböző magszekrények tartoznak. A maggyártás a magszekrények homokkal való feltöltése után a szárítókemencében folytatódik, ahol 238°C-on hőkezelve, 5 perc alatt történik a magok megszilárdítása. A magszekrények kivétele és szétnyitása után a kész homokmagok, sorjázás után az előkészített a homokformába helyezhetőek.

A következő munkafolyamat a formaüreg fekecselése, a felületi minőség biztosítása érdekében. A fekecs anyaga finomított grafitpor és alkohol bázisú hígítószer 1:10 arányú keveréke. A fekecs felvitele ecsettel történik, megfelelően vékony rétegben. A formaüreg falára történő felvitel után a fekecs alkoholtartalmát gázláng segítségével kell eltávolítani. Az így kapott felületi réteg alacsonyabb felületi érdességet biztosít, lásd 33. ábra.

A formafelek zárása előtt megtörténik a kerámiaszűrők behelyezése az álló alsó részén kiképzett szűrőfészekbe. A szűrő gravitációs öntészeti célokra kialakított Al_2O_3 bázisú kerámiaszűrő. Az egyes formafelek résmentesen zárják a szűrőfészket, így az olvadék csak a szűrőn keresztül képes tovább haladni. A formafelek a pontos összezárás érdekében nútokkal vannak ellátva. A záróerőt (az öntési pozíció révén) az összerakott formafelek két oldalán pillanatszorító biztosítja a 34. ábrán látható módon.



33. ábra. Alsó és felső formafél fekecseléssel és a homokmagok, valamint a kerámiaszűrő behelyeztével



34. ábra. Összezárt formafelek, kiegészítő tölcserrel

A zárt homokforma beömlőnyílásának magasításaként a fenti képen látható 100 mm magasságú kiegészítő beömlő (tölcser) szolgál. Ennek alkalmazása elősegíti az olvadék kellő sebességre való gyorsulását, a metallosztatikus nyomás biztosítását és a teljes formatelés megvalósulását. Az olvadék alapanyaga a megrendelő által biztosított, EN AB-42000 jelű alumínium tömb (AlSi7Mg0,4).

Az olvasztás során alkalmazott olvasztókemence egy 100 kg olvadék befogadására képes, SiC téggellyel rendelkező elektromos ellenállásfűtésű berendezés, lásd 35. ábra.



35. ábra. Elektromos
ellenállásfűtésű olvasztókemence

Egy öntési ciklus alkalmával 58 kg alumínium tömb megolvasztására kerül sor, ami így összhangban van a formázás során elkészített 60 db forma olvadékszükségletével. Ha az olvadék hőmérséklete eléri a 710°C -ot, megkezdődik az olvadéktisztítás folyamata. Az olvadék kellő tisztaságának elérése érdekében 1,0 kg COVERAL 105 típusú tisztító sót adagolnak az olvadékhoz, majd egy célszerszám segítségével elkeverik azt. A tisztítósó alkalmazása az olvadékban jelenlévő zárványok felszínre úszását és a hidrogéntartalom csökkentését segíti elő. Az olvadéktisztítás hatására az öntés szempontjából káros alkotók (zárványok, oxidok), a folyékony fém felszínén, salakréteg formájában gyűlnek össze, amit egy célszerszámmal távolítanak el az olvadék felületéről [14].

A vevő által előírt mechanikai szilárdság elérése érdekében előre meghatározott mennyiségű stroncium (AlSr10 előötvözet formájában) és magnézium kerül adagolásra az olvadékba. A stroncium, mint az Al-Si eutektikum Si fázisának módosító eleme, meggátolja a nagyméretű, lemezes és poliéderes Si-kristályok képződését és finomszemcsés, szálas morfológiájú Si kristályosodását idézi elő. A magnézium beadagolása az öntvény mechanikai szilárdságát növeli. A Mg és Sr mennyisége az ötvözetben olvasztás és hűtőtartás közben idővel csökken a szelektív oxidáció miatt [15]. Üzemi tapasztalatok alapján a meghatározott mennyiség 60 kg olvadékra származtatva AlSr10 előötvözet esetében 90 g, míg magnézium esetében 63 g.

Az öntést öntőkanál segítségével, kézi módszerrel végzik. A folyékony fém formaüregbe juttatása után 1,5-2 perccel a formafeleket szétnyitásra kerülnek. A nyers, homokformából kiszedett öntvénycsokrot a 36. ábra mutatja be:



36. ábra. A nyers öntvény

Ezután a formát alkotó homok mechanikus regenerálásra kerül.

A nyers öntvény az öntvénytisztító részlegre kerül, ahol fúrógép segítségével eltávolítják belőle a homokmagok maradékát, amely később hulladékként elszállításra kerül. A beömlő- és tápláló rendszer részeit, valamint a sorjakat vágóeszköz segítségével eltávolítják az öntvényről. A levágások helyét szalagcsiszológép segítségével tüntetik el.

A megtisztított öntvények egyesével geometria ellenőrző sablonba kerülnek. A sablon méretei a CAD fájl méreteire (azaz 0,0 méretbeli eltérésre) vannak beállítva, így, ha az öntvény illeszkedik bele, megfelel a követelménynek. Ez a vizsgálat nem olyan pontosságú, mint a későbbiekben bemutatott GOM mérés, de iránymutatást ad a selejtezésben. A vevő által meghatározott mennyiségű leöntött darabok, tisztítás és méret ellenőrzés után, egy végső szemrevételezésre kerülnek. Itt egy ledlámpa és sűrített levegő segítségével egy szakember megvizsgálja az öntvény külső és belső látható felületeit, azon hibákat keresve. Ezt követően kerülnek az öntvények elszállításra a hőkezelő üzembe.

Az öntvényről levágott beömlő- és táplálórendszerek és a selejtezett darabok elkülönítőbe kerülnek, ahonnan egy meghatározott mennyiség után kerülnek visszaolvasztásra. A visszaolvasztott alapanyagban pótolni kell a kiégett magnézium mennyiségét, majd ezt követően tömbösítésre kerül az olvasztott mennyiség. Az ellenőrzésen átesett öntvények T6-os típusú hőkezelésre kerülnek. Ennek során az első szakaszban 520°C hőmérsékleten, 4 órán keresztül kezelik őket, majd az első szakaszt vízben való lehűtés követi. A második fázisban 160°C-on 4 órán keresztül az öntvények öregbítése történik.

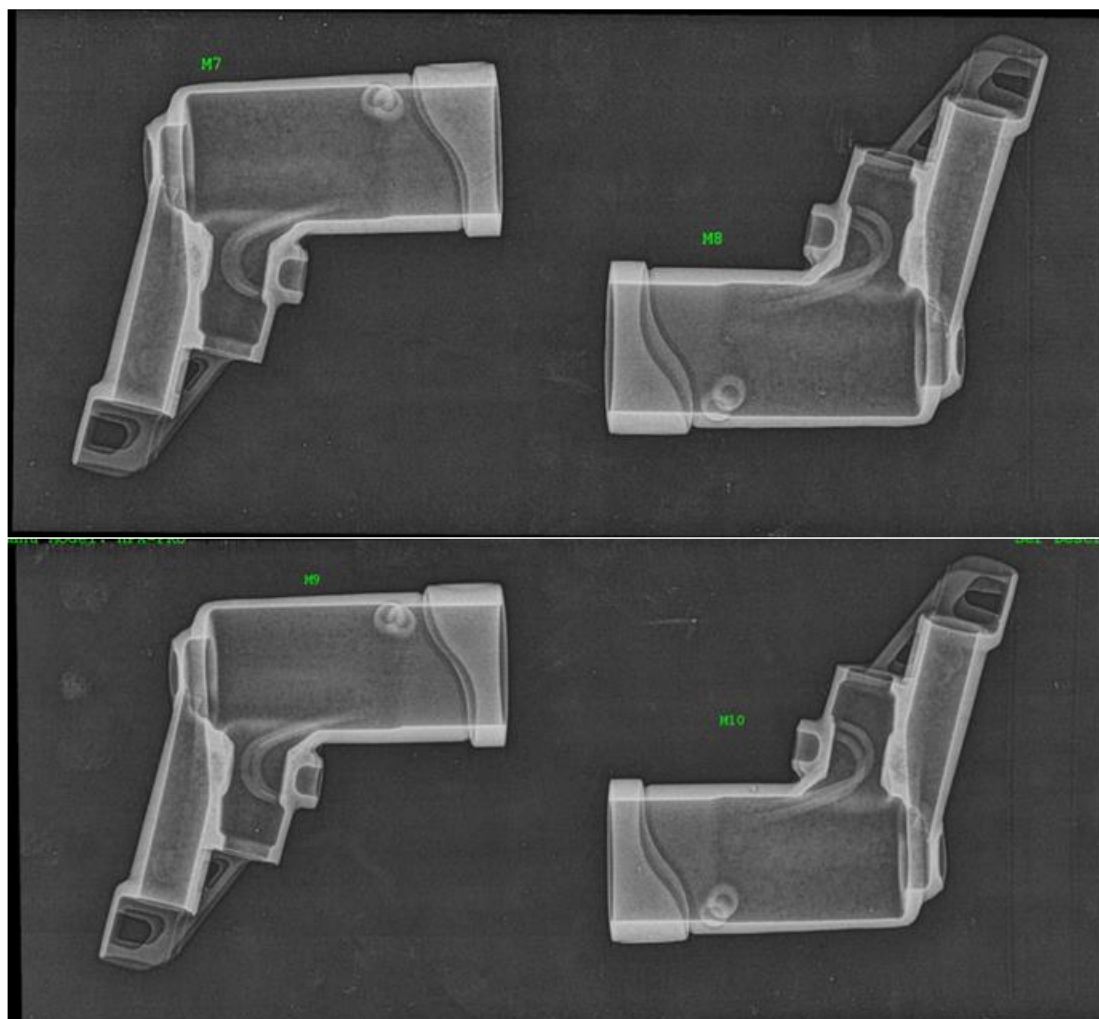
A hőkezelt öntvényeknek meg kell felelni a vevő által előírt felületi keménységnek. Ez a pneumatikus alkatrészek esetén minimum 75 HB (Brinell keménység), de az optimális keménység értéke 85-105 HB közötti. 100 db hőkezelt öntvényből 5 darab kerül szűrőpróba

szerűen keménységmérésre. Az öntvényeket célnak megfelelő méretű dobozba csomagolják, majd a megrendelőhöz kerülnek kiszállításra.

6.1 Öntvények vizsgálata

6.1.1 Röntgen vizsgálat

Ipari CT- és röntgenrendszerekkel vizsgálhatók a tipikus öntési hibák: hőrepedések, porozitás, pórusok, gázbezáródások és zárványok. A próbagyártás során a következő felvételeket készítettük az öntvényről, amelyeket a 37. ábra mutat be:

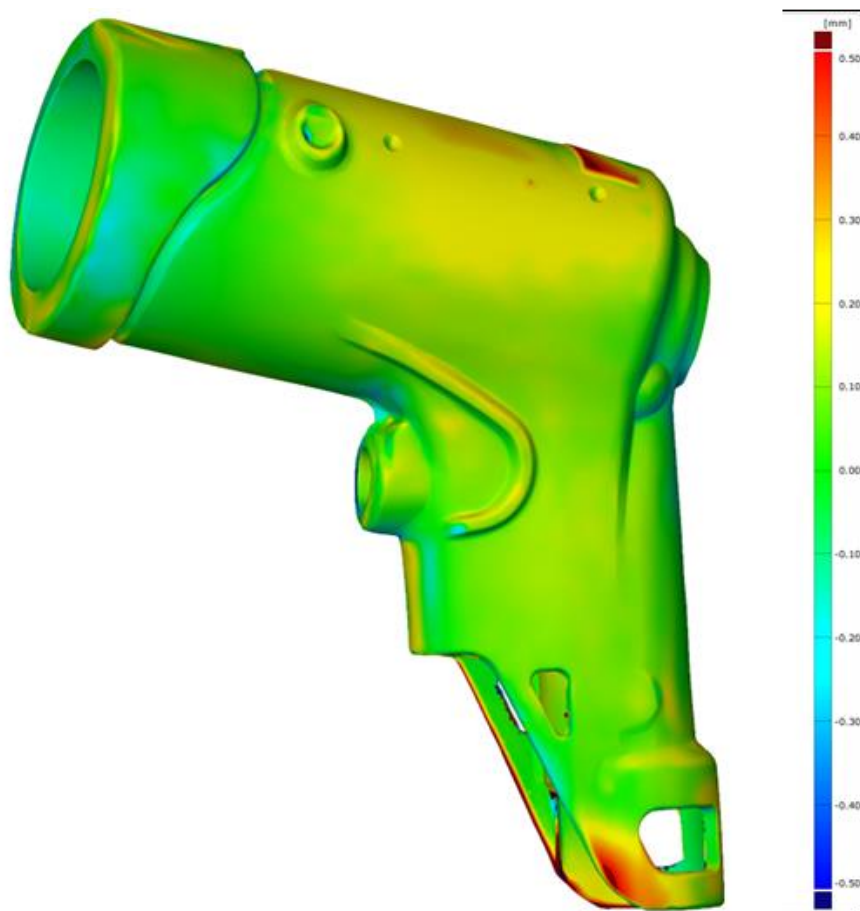


37. ábra. Röntgenfelvételek a leöntött öntvényekről

A röntgenfelvételekről megállapítható, hogy az öntvényen belül, a későbbi megmunkálás után meghagyott falakban porozitás nem található, az öntvény ebből a szempontból megfelel a vevői követelményeknek.

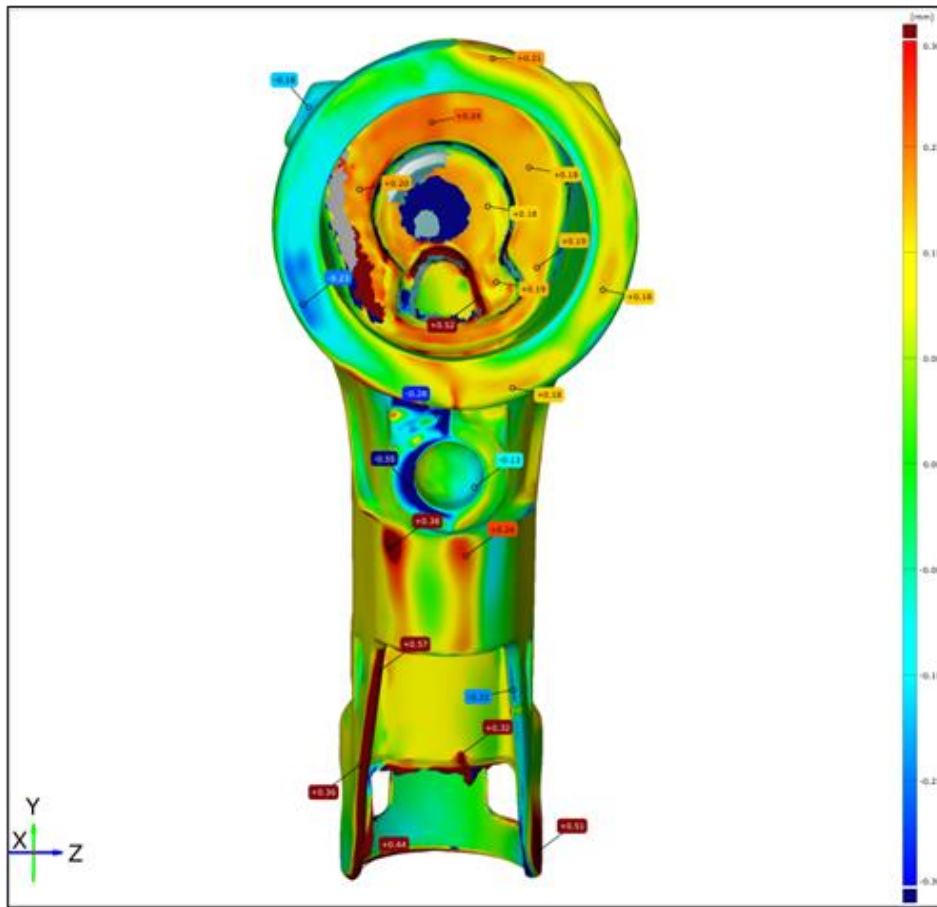
6.1.2 GOM mérés

A GOM (Global Optical Measurement) mérés egy 3D szkennelési forma, mely során egy kész termék és a hozzá kapcsolódó CAD file között lehet összehasonlító méréseket végezni és az eredményt egy színtérképen jelenítik meg. A szkennelés egymástól különálló pontok helyett a teljes felületről nyer ki pontos és részletes 3D pontfelhőt. A GOM vizsgálat eredményeit a 38.A és 38. B ábra mutatja be. A 38.A ábra skálázása: -0,5 mm (kék) és 0,5 mm (piros), felosztása: 0,1 mm.



38.A ábra. GOM felvétel az öntvényről, oldalnézet

A 38.B ábra skálázása: -0,3 mm (kék) és 0,3 mm (piros), felosztása: 0,1 mm.



38.B ábra. GOM felvétel az öntvényről, szemből nézet

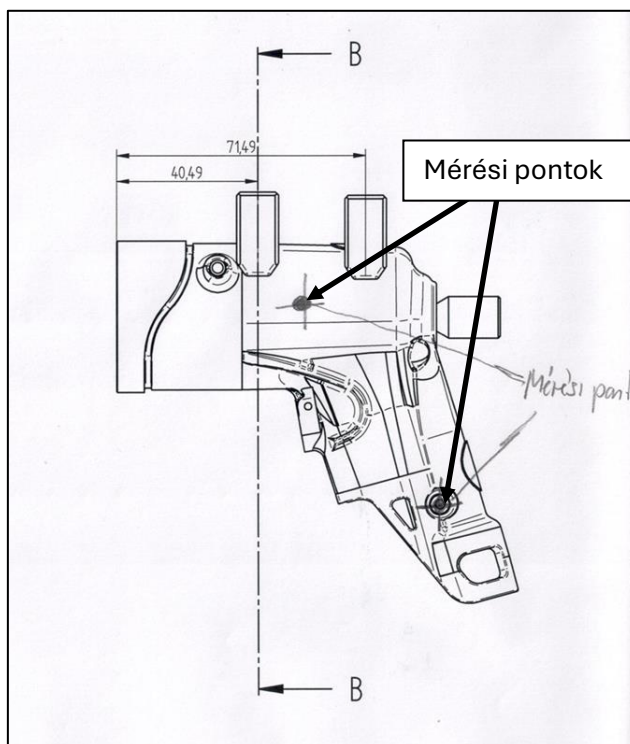
A GOM mérések eredményei alapján megállapítható, hogy az öntvény méretpontossága megfelel a műszaki rajz által meghatározott szabvány (DIN1688) tűréshatárainak.

6.1.3. Brinell keménység

A brinell keménységmérésnél egy adott átmérőjű (D) acélból készült golyót (F) terhelőerővel a vizsgált test felületébe nyomunk, majd a terhelés megszüntetése után mérjük a gömbsüveg alakú lenyomat átmérőjét (d). A Brinell keménységmérés jele: HB, értéke az (F) terhelőerő [N] és a (d) átmérőjű benyomódás gömbsüveg felületének [mm²] a hányadosa. A számításhoz használt összefüggés:

$$HB = 0,102 * \frac{2F}{\pi * D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (5)$$

ahol (D) a golyóátmérő, (d) a lenyomat átmérője mm-ben. A Brinell keménység mértékegysége $[N/mm^2]$ [18]. Az öntött alkatrész esetében 2 ponton történik a Brinell keménység mérése, ezt mutatja be a 39. ábra:

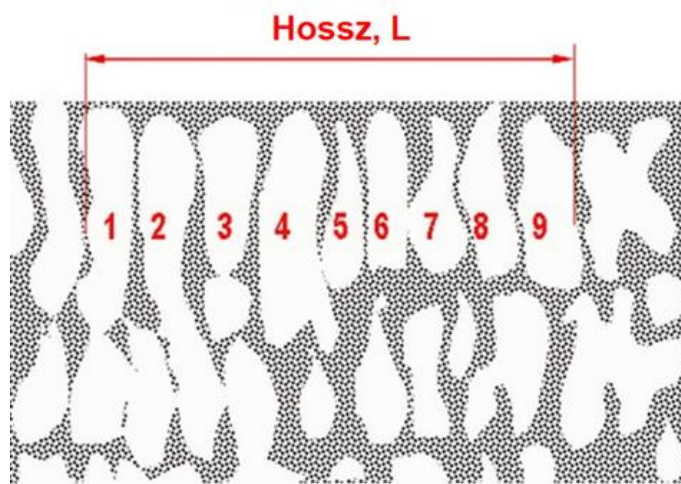


39. ábra. az öntvényen feltüntetett keménységmérési pontok

A Brinell keménységet hőkezelés után, 100 hőkezelt alkatrészből véletlenszerűen kiválasztott 5 darabon mértük, a 39. ábrán bemutatott keménységmérési pontokon. Mind az 5 öntvényen 4 db lenyomatot vizsgáltunk, melyek eredményeiből átlagot számítottunk. A számítás eredménye 90 HB, szórása ± 3 HB. A mérés eredménye a vevői követelmény tartományában van, így az öntvény a keménység szempontjából is megfelel az előírt követelményeknek.

6.1.4. Mikroszerkezet vizsgálata

Az eltérő technológiák (precíziósan öntött vs. gravitációs homokformába öntött) öntvénytípusokra gyakorolt hatásának vizsgálata érdekében mikroszerkezeti vizsgálatokat végeztünk. Az α -alumínium dendritok szekunder ágainak távolsága (Secondary Dendrite Arm Spacing, SDAS) arányos a helyi dermedési sebességgel, ezáltal az SDAS méréssel következtethetünk a vizsgált öntvényrész dermedési viszonyaira [19]. Emiatt az öntvény 3 különböző falvastagságú részéről készült fénymikroszkópos felvételeken SDAS mérést hajtottam végre. A mérés elvét a 40. ábra mutatja be:



40. ábra. SDAS mérés módszere

Az SDAS értéke az alábbi képlettel számítható:

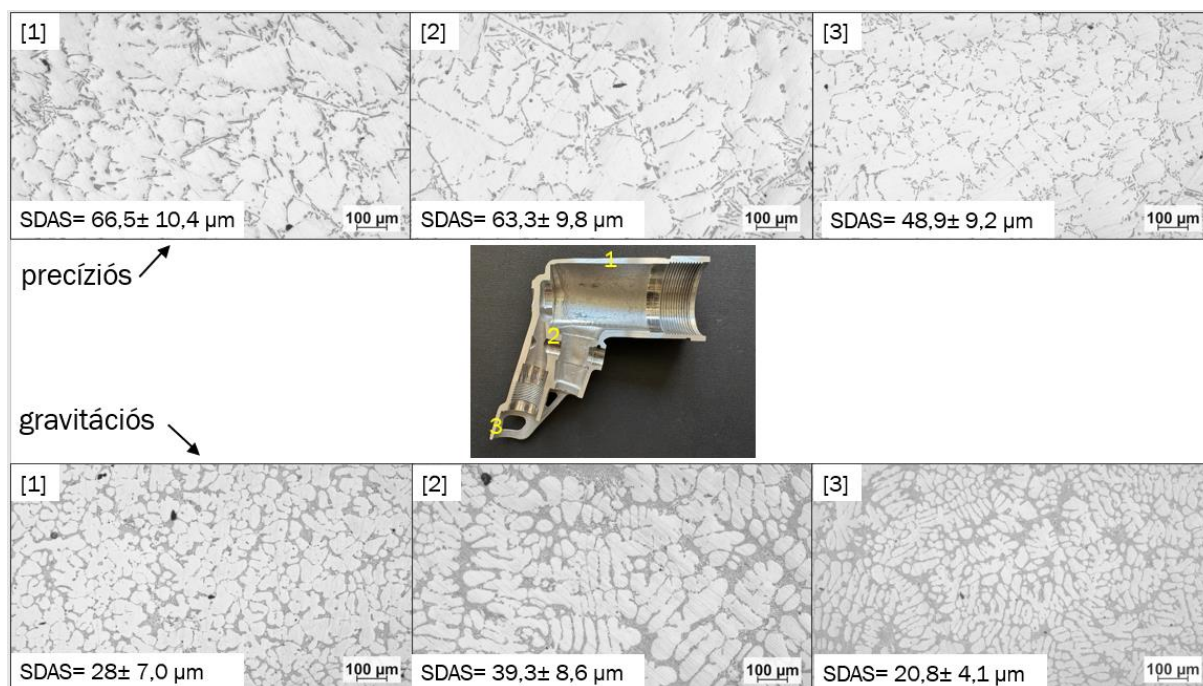
$$SDAS = \frac{L}{n} \quad (6)$$

Ahol L [mm] a távolság a két legszélső szekunder ág között és n [-] a szekunder dendritágak száma.

A dendritágtávolság vizsgálatánál egy, a próbagyártás során gravitációs homokformába való öntéssel készült, és egy, a korábbi precíziós öntészeti technológiával készült öntvényt hasonlítottam össze. A két öntvény a 41. ábra szerint, az osztósík mentén lett elvágva. Mind a két mintát megcsiszoltam különböző, sorban finomodó SiC csiszolólapokon, vizes csiszolással:

- Sorrendben 180, 320, 500, 800, 1200, 2400-as csiszolólap.
- A csiszolást követte a polírozás folyamata, 3 μm és 1 μm -es gyémánt polírpaszták alkalmazásával.

A mintaelőkészítés után fénymikroszkóp segítségével 3 különböző falvastagságú pontban készültek felvételek. Az adott pontokon képelemző program (ZEISS ZEN) segítségével a gravitációs homokformába való öntési technológiával gyártott öntvényen és a precíziós technológiával gyártott öntvényen pontonként 3 felvételt készítettem. A felvételek mindegyikén minimum 10 szekunder dendritág hosszát mértem le, majd az adatokat összegeztem. A két mintát az öntvény különböző falvastagságú pontjain hasonlítottam össze egymással, amelyek a 41. ábrán láthatóak:



41. ábra. Különböző öntvényrészek mikroszerkezete felül a precíziós öntvény, alul a homokformába öntött öntvény, feltüntetve a szekunder dendritág távolság értékeit

A 41. ábrán látható, hogy a precíziós öntvény (a-b-c) SDAS értékei jelentősen nagyobbak a homokformába való öntéssel készült öntvényé (d-e-f). Ebből arra lehet következtetni, hogy a precíziós technológiával készült öntvény esetében a dermedés folyamata jelentősen lassabb volt. A 41. ábrából kivehető az is, hogy a minta középső részén („e” jelű felvétel) a gravitációs homokformába való öntéssel készült öntvény esetében a mikroszerkezet a lassabb dermedésnek köszönhetően durvább, a minta többi részéhez képest. A precíziós technológiával készült darab mikroszerkezete homogénebb eloszlású, de jelentősen durvább szerkezetű, mint a gravitációs homokformába való öntéssel készült mintáé.

Az SDAS értéke a helyi dermedési időkből (t_f [s]) a következő képlet szerint számítható:

$$SDAS = K(M \cdot t_f)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

ahol K állandó, amely értéke 5.0 Kirkwood [21] szerint, M pedig egy ún. dendrit durvulási együttható, ami a következő összefüggéssel számítható:

$$M = - \frac{\Gamma_D}{m(1-k)(c_E - c_0)} \ln \left(\frac{c_E}{c_0} \right) \quad (8)$$

ahol Γ a Gibbs-Thomson együttható [$K \cdot m$], D az ötvözőelemek diffúziós együtthatói az olvadékban [m^2/s], c_E az eutektikus összetételt jelöli (12,6% az Al-Si rendszerben), c_0 ötvözőelem (Si) koncentráció (7 %), m a likvidusz görbe meredeksége (6,6 °C/% az Al-Si

rendszer esetében, k a megoszlási együttható, amely 0,13 az Al-Si rendszerben. Γ a következőképpen számolható:

$$\Gamma = \frac{\sigma_{SL}}{\Delta S_f} \quad (9)$$

ahol σ_{SL} a szilárd/olvadék határfelületi energia [J/m^2], ΔS_f a kristályosodási entrópia változás [$\text{J/K}\cdot\text{m}^3$]. A σ_{SL} értékét $0,15 \text{ J/m}^2$ -nek [22] és ΔS_f -et $1,112\cdot 10^6 \text{ J/Km}^3$ -nek [23] véve $\Gamma=1,349\cdot 10^{-7} \text{ K}\cdot\text{m}$. Az ötvözet likvidusz hőmérsékletén ($616 \text{ }^\circ\text{C}$ [24]) $D_{Si}=2,3155\cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ [25]. Mindezek alapján a mért SDAS alapján a (6)-os összefüggéssel számított helyi dermedési időket a 11. táblázat ismerteti.

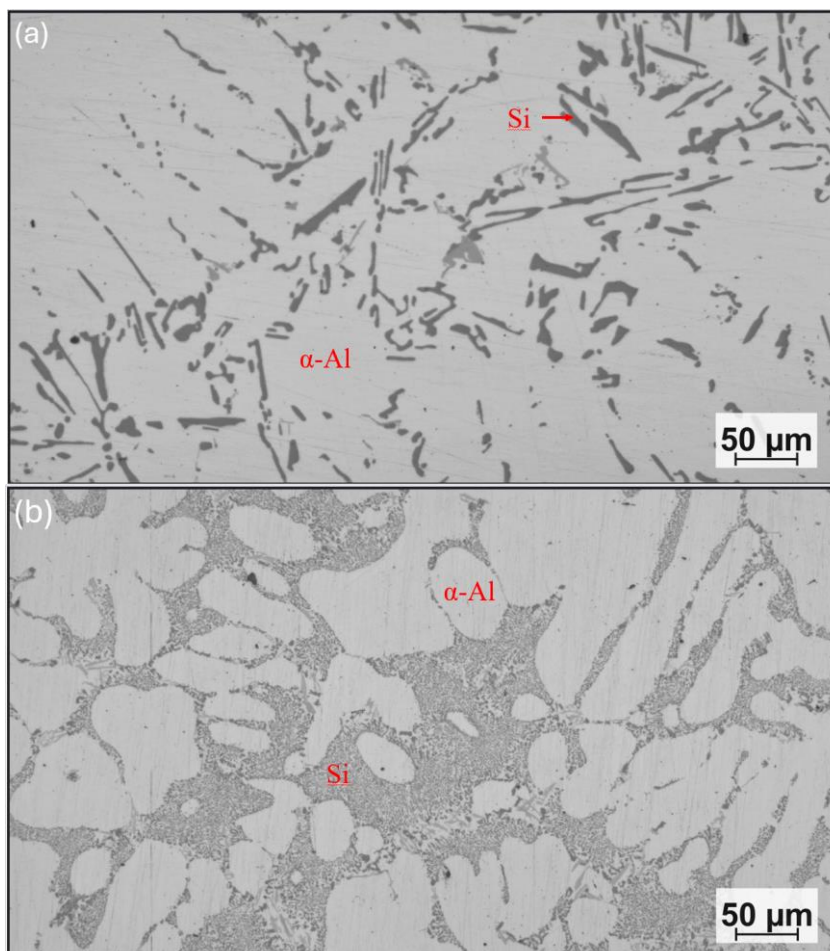
11.táblázat. Helyi dermedési idők a 3-3 vizsgálati pontokból.

Pozíció	Precíziósan öntött		Homokformába öntött	
	SDAS [μm]	t_f [s]	SDAS [μm]	t_f [s]
1	$66,5 \pm 10,4$	Min: 247,4 Max: 637,2 Átlag: 411,7	$28,7 \pm 7,0$	Min: 14,3 Max: 63,8 Átlag: 33,1
2	$63,3 \pm 9,8$	Min: 214,5 Max: 547,7 Átlag: 355,4	$39,3 \pm 8,6$	Min: 40,6 Max: 154,0 Átlag: 85,1
3	$48,9 \pm 9,2$	Min: 87,7 Max: 274,9 Átlag: 163,3	$20,8 \pm 4,1$	Min: 6,5 Max: 21,6 Átlag: 12,6

Megállapítható, hogy tág határok között változhatnak a helyi dermedési idő értékek az SDAS szórása alapján, az egyértelműen látszik azonban, hogy nagyságrendi különbség van a két eltérő technológiával gyártott öntvény helyi dermedési idő értékei között. A precíziósan öntött darab jóval lassabban kristályosodott, ami legnagyobb valószínűséggel annak tudható be, hogy a formaként használt kerámia héj magas hőmérsékletre volt előmelegítve. Alumínium ötvözetek precíziós öntésénél gyakran alkalmaznak 500°C feletti formahőmérsékletet [20, 26].

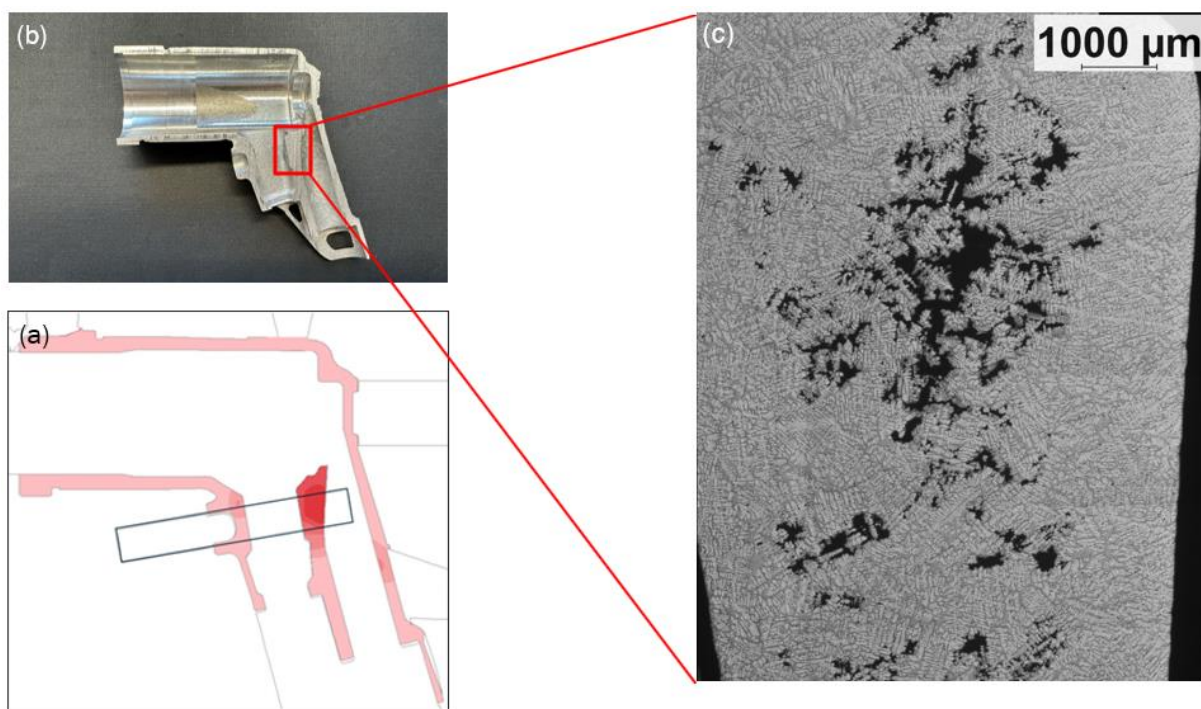
Szintén jelentős különbség van az eutektikus szilícium morfológiájában és méretében a két technológia esetén (42. ábra). A homokformába öntött darab esetén a nagyobb lehűlési sebesség és az eutektikus Si-módosítóként alkalmazott Sr adagolásának köszönhetően finomszemcsés, szálás (módosított) eutektikus Si szemcsék kristályosodtak. Ezzel szemben a precíziósan öntött

öntvényben nagyméretű, lemezes Si-szemcsék képződtek, ami nagy valószínűséggel a mechanikai tulajdonságokra is negatívan hat, különös tekintettel a szakadási nyúlásra [15].



42. ábra. (a) Precíziósan öntött és (b) homokformába öntött darabok szövetszerkezete

A szimuláció az öntvény középső részén elhelyezkedő, és a megmunkálás során eltávolított térfogatrészen porozitást jelzett. Ennek vizsgálata érdekében mikroszkópos felvétel készült egy megmunkálás előtti darabról, amelyet a 43. ábra. mutat be. Jól látható, hogy a vizsgált helyen egy nagyméretű, dendritközi morfológiával rendelkező, szívódási porozitás van jelen, ezzel igazolva a szimuláció előrejelzését. Hasonló, nagyméretű porozitást más öntvényrészen nem találtam sem precíziós, sem pedig homokformába való öntéssel készült darabok esetén. A jövőben további tervem az öntvényekben lévő mikroporozitás eloszlásának számítógépes képelemzéssel történő elemzése, amely információt adhat arról, hogy mely technológia esetén nagyobb a hajlam a mikroporozitás kialakulására.



43. ábra. (a) Dermedési szimuláció által jelzett, dermedési zsugorodást tartalmazó öntvényrész, (b) öntvény keresztmetszet, jelölve a furattal ellátott öntvényrészt, valamint (c) az öntvényen belül a megjelölt helyen lévő porozitásról készült fénymikroszkópos felvétel

7. Összefoglalás

A dolgozatban bemutatott kísérleti munkám során egy alumínium ötvözetből öntött pneumatikus alkatrész technológiaváltásának lehetőségével foglalkoztam. A kísérleti munka első részében a rendelkezésre álló 3D CAD modell és a műszaki rajz alapján analizáltam az öntvény geometriáját, falvastagság viszonyait és elvégeztem az öntészeti technológia szempontjából alapvető szükségességű redukált falvastagságok és anyag/hőhalmazódási helyek vizsgálatát. Az öntvény dermedési viszonyainak számítógépes szimulációja alapján szakirodalmi és szabadalmi számítási elvek alapján méreteztem az öntvény beömlő- és táplálórendszerét. Technológiai tapasztalat alapján elvégeztük az öntvény belső üregeit kiképző homokmagok kialakítását. A beömlő- és táplálórendszer megfelelőségét számítógépes szimulációs eszközökkel ellenőriztük. Az elvégzett vizsgálatok alapján az öntvénycsokor próbagyártásra került.

A próbagyártás során elkészített öntvényeken vizsgálatokat végeztünk a vevői és szabványos követelmények teljesülésének vizsgálata céljából. A tisztított öntvények hőkezelésre kerültek, melyeken röntgen, GOM, Brinell keménység és mikroszerkezeti vizsgálatokat végeztünk.

Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a kidolgozott technológiával gyártott öntvények megfelelnek az előírt követelményeknek, a technológiaváltás sikeresnek mondható.

Felhasznált irodalom

- [1] S. Viswanathan, D. Apelian, R. J. Donahue et al.: ASM Metals Handbook, Vol. 15: Casting. ASM International, 2008. USA, pp. 485-487, 525-527, 646-661, 1009-1018. DOI: 10.31399/asm.hb.v15.9781627081870
- [2] J. Campbell: Complete Casting Handbook 2nd Ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2015. pp. 3–90., 821-891. DOI: 10.1016/B978-0-444-63509-9.00002-9
- [3] R. T. Justis et al: The feasibility study as a tool for venture analysis. Business Journal of Small Business Management, Vol. 17. No. 1. 1979. pp. 35-42.
- [4] D. A. Georgakellos, A. M. Macris: Application of the semantic learning approach in the feasibility studies preparation training process. Information Systems Management, Vol. 26. No. 3. 2009. pp. 231-240. DOI: 10.1080/10580530903017708
- [5] DIN 1688 sz. szabvány, Tolerances for aluminium castings, (www.renderfact.com)
- [6] G. Hajas: Casting process and sand mould provided with an inlet system for producing at least partly thin walled aluminium casts with sand moulding technology by means of gravity casting. WO2016181177 sz. szabadalom, 2016.
- [7] Hajas G.: Vékony falú nyomásos öntvények homokformázással készült prototípusainak formatöltési viszonyait és a szilárdsági tulajdonságait befolyásoló tényezők vizsgálata. BKL Kohászat, Vol. 150. No. 6., 2017. pp. 13-15.
- [8] G. Hajas: Prototypen aus Sandformen für dünnwandige und detailreiche Druckgussteile, Giesserei Praxis, 2017/4, p.144-146. (https://www.alu-onto.hu/sites/default/files/gp-2017_04_144_2.pdf)
- [9] Jesper Hattel: Fundamentals of Numerical Modelling of Casting Processes. Polyteknisk Forlag, 2005. Denmark. pp. 1-90. ISBN: 8750209698
- [10] NovaFlow&Solid User Guide (2002) Novacast AB, Sweden
- [11] G. Sigworth: Shrinkage, Feeding & Riser Design. In: G. Sigworth (ed.): Best Practices in Aluminum Metalcasting, American Foundry Society, Schaumburg, USA, 2014. pp. 213-225.
- [12] N. Chvorinov: Theorie der Erstarrung von Gußstücken, Giesserei Vol. 27. pp. 177-186. 1940.

- [13] F. Vincze et al.: Examination of the Eutectic Modifying Effect of Sr on an Al Si-Mg-Cu Alloy Using Various Technological Parameters. Archives of Foundry Engineering Vol. 20. No. 3. 2020. pp. 79-84. DOI: 10.24425/afe.2020.133334
- [14] T. A. Utigard et. al: The Properties and Uses of Fluxes in Molten Aluminum Processing. JOM, Vol. 50. No. 11., 1998. pp. 38–43. DOI: 10.1007/s11837-998-0285-7
- [15] G. K. Sigworth: The Modification of Al-Si Casting Alloys: Important Practical and Theoretical Aspects. International Journal of Metalcasting Vol. 2., 2008. pp. 19–40. DOI: 10.1007/BF03355425
- [16] Roger N. Lumley: How to Design and Buy Aluminium Castings. In: R. N. Lumley (ed.): Fundamentals of Aluminium Metallurgy, Woodhead Publishing, 2018. pp. 93-122. DOI: 10.1016/B978-0-08-102063-0.00003-5
- [17] F. C. Robles-Hernandez, J. M. H. Ramírez, R. Mackay: Al-Si Alloys - Automotive, Aeronautical, and Aerospace Applications. Springer International Publishing AG, 2017. pp. 47-79. ISBN 978-3-319-58380-8
- [18] Czél Gy., Kollár M.: Anyagvizsgálati praktikum, Sunplant, Miskolc, 2008. pp. 46-54.
- [19] G. K. Sigworth: Fundamentals of Solidification in Aluminum Castings. International Journal of Metalcasting Vol. 8, 2014. pp. 7–20. DOI: 10.1007/BF03355567
- [20] R.W. Hamilton et al.: Multiscale modeling for the prediction of casting defects in investment cast aluminum alloys. Materials Science and Engineering: A Vol. 343, 2003. No. 1-2. pp. 290-300. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00376-3
- [21] D.H. Kirkwood.: A simple model for dendrite arm coarsening during solidification. Materials Science Engineering: Vol. 73. pp. L1-L4, 1985. DOI: 10.1016/0025-5416(85)90319-2
- [22] G. Kaptay et al.: Interfacial forces and energies relevant to production of metal matrix composites. Material Science Forum Vol. 329-330. 2000. pp. 151-156. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.329-330.151
- [23] A.L. Greer et al.: Modelling of inoculation of metallic melts: application to grain refinement of aluminium by Al–Ti–B. Acta Materialia Vol. 48, 2000. pp.: 2823–2835. DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00094-X

- [24] Wang, R.: Influence of the heat treatment path on the precipitation sequence in an AlSi7Cu0.5Mg-alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 990. 2024. 174450. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.174450
- [25] Y. Du et al.: Diffusion coefficients of some solutes in FCC and liquid Al: critical evaluation and correlation. *Materials Science and Engineering A* Vol. 363. 2003. pp.: 140-151. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00624-5
- [26] M.Cox et al.: Effect of top and bottom filling on reliability of investment castings in Al, Fe, and Ni based alloys, *Materials Science and Technology*, Vol. 16. No. 11-12. 2000. DOI: 10.1179/026708300101507442

51