



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

DMLS SZERSZÁMBETÉTEK SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATA
OTDK MUNKA

ZINK BÉLA

TÉMAVEZETŐ:
DR. KOVÁCS JÓZSEF GÁBOR EGYETEMI DOCENS
KONZULENS:
SZABÓ FERENC DOKTORANDUSZ
SUPLICZ ANDRÁS DOKTORANDUSZ
HATOS ISTVÁN EGYETEMI TANÁRSEGÉD

2015

Tartalomjegyzék

A DOLGOZATBAN SZEREPLŐ JELÖLÉSEK	4
A DOLGOZATBAN SZEREPLŐ RÖVIDÍTÉSEK.....	4
1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS	6
2. IRODALOM ÁTTEKINTÉS.....	7
2.1. PROTOTÍPUSGYÁRTÁS	7
2.1.1. <i>A prototípusgyártás története és fejlődése.....</i>	<i>7</i>
2.1.2. <i>Az RPT berendezések által használt fájlformátumok bemutatása.....</i>	<i>8</i>
2.1.3. <i>Az RPT technikák csoportosítása és a legfontosabb technológiák bemutatása</i>	<i>9</i>
2.1.4. <i>RT technikák csoportosítása</i>	<i>12</i>
2.1.5. <i>DMLS technológia.....</i>	<i>14</i>
2.2. FRÖCCSÖNTÉSI SZIMULÁCIÓ	19
2.2.1. <i>A fröccsöntési szimulációs programok fejlődésének története és felépítése</i>	<i>19</i>
2.2.2. <i>A szimulációs programok által felhasznált hálótípusok bemutatása</i>	<i>20</i>
2.2.3. <i>Megoldó algoritmus feltevései</i>	<i>20</i>
2.2.4. <i>Hűtési analízis</i>	<i>22</i>
2.2.5. <i>Zsugorodás és vetemedés.....</i>	<i>24</i>
2.3. FRÖCCSÖNTŐSZERSZÁM-ALAPANYAGOK	25
2.4. HAGYOMÁNYOS HŰTÉSI RENDSZEREK	27
2.4.1. <i>Soros és párhuzamos hűtési rendszerek.....</i>	<i>27</i>
2.4.2. <i>Alternatív hűtési megoldások.....</i>	<i>28</i>
2.4.3. <i>A hagyományos hűtési rendszerek tervezési szempontjai</i>	<i>30</i>
2.5. FORMAKÖVETŐ HŰTÉSEK.....	32
2.5.1. <i>A formakövető hűtések bemutatása és tervezési szempontjai</i>	<i>32</i>
2.5.2. <i>A kontúrkövető és hagyományos hűtések összehasonlítása</i>	<i>32</i>
3. FELHASZNÁLT GÉPEK BERENDEZÉSEK ÉS ANYAGOK.....	37
3.1. <i>A VIZSGÁLATOKHOZ FELHASZNÁLT GÉPEK</i>	<i>37</i>
3.2. <i>A VIZSGÁLATOKHOZ FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK</i>	<i>37</i>
4. KÍSÉRLETI RÉSZ	38
4.1. <i>A SZERSZÁM FELÉPÍTÉSE ÉS A HŰTŐKÖR KIALAKÍTÁSOK</i>	<i>38</i>
4.2. <i>SZIMULÁCIÓS MODELLKIALAKÍTÁSOK</i>	<i>41</i>
4.3. <i>SZIMULÁCIÓS MODELL FELÉPÍTÉSE ÉS A SZIMULÁCIÓS PARAMÉTEREK</i>	<i>42</i>
4.4. <i>SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK</i>	<i>44</i>
4.4.1. <i>Kitöltési analízis</i>	<i>44</i>
4.4.2. <i>Hűtőkör analízise.....</i>	<i>44</i>
4.4.3. <i>Szerszámbetét hőtani vizsgálata</i>	<i>46</i>

4.4.4.	<i>Szerszámbetétek felületi hőmérséklete.....</i>	<i>51</i>
4.4.5.	<i>Vetemedési analízis</i>	<i>55</i>
5.	ÖSSZEFOGLALÁS	58
6.	IRODALOMJEGYZÉK	59

A DOLGOZATBAN SZEREPLŐ JELÖLÉSEK

t	[μm]	rétegvastagság
R _{max}	[μm]	rétegvastagságból adódó maximális hiba
R _{átl}	[μm]	az átlagos hiba
Re	[-]	Reynolds szám
v	[m/s]	átlagsebesség a d átmérőjű csőben,
d	[mm]	cső átmérője
ρ	[kg/m ³]	közeg sűrűsége
η	[Pas]	a közeg dinamikai viszkozitása
ν	[m ² /s]	a közeg kinematikai viszkozitása
L ₀	[mm]	a termék deformálódás mentes állapotában mért szélesség
L _w	[mm]	darab deformálódott állapotában mért szélesség

A DOLGOZATBAN SZEREPLŐ RÖVIDÍTÉSEK

DMLS	Direct Metal Laser Sintering
RPT	gyors prototípusgyártás (Rapid Prototyping)
CAD	számítógép segített tervezés (Computer Aided Design)
STL	Standard Tessellation Language
PLY	Polygon File Format (STL fájl formátum)
LOM	laminated object manufacturing
SLA	lézer sztereolitográfia (Stereolithography)
FDM	ömlédekrétegezés (Fused Deposition Modeling)
UV	ultraviola
SLS	szelektív lézer-szinterezés
MIT	Massachusetts Institute of Technology
3DP	térbeli nyomtatás (3D Printing)
RT	gyors (prototípus) szerszámkészítés (Rapid Tooling)
CAM	számítógéppel támogatott gyártás (Computer Aided Manufacturing)
MPI	Moldflow Plastics Insight – fröccsöntési szimulációs programcsomag
pVT	nyomás-fajtérfogat-hőmérséklet összefüggés
Si	szilícium
Mn	mangán
Mo	molibdén

Ni	nikkel
W	volfrám
V	vanádium
PP	polipropilén
ABS	akrilnitril-butadién-sztirol terpolimer
PA	poliamid
HDPE	nagy sűrűségű polietilén
PC	polikarbonát
POM	polioximetilén
CNC	számítógép segített numerikus vezérlés (Computer Numerical Control)

1. Bevezetés és célkitűzés

A műanyaggyártó- és feldolgozóipar mára a gazdaság egyik meghatározó ágazatává nőtte ki magát, a 2012-es adatok szerint a világ műanyagipari termelése meghaladta a 280 millió tonnát a 2011-es évben. Az ágazaton belül az egyik legfontosabb feldolgozási technológiának számít a fröccsöntés, amellyel a műanyag termékek több, mint harmadát állítják elő. Magyarországon több mint 21 ezer tonna polimer alapanyagot dolgoztak fel fröccsöntéssel 2011-ben, ami a teljes műanyaggyártó- és feldolgozóipar által előállított termékek kb.27,6%-a [1, 2].

A fröccsöntési ciklus legmeghatározóbb része a termék hűtési ideje, amely a nagy térfogatú, magas feldolgozási hőmérsékleten fröccsöntött és összetett geometriájú termékek esetén a teljes ciklus több mint felét teszi ki. Az ilyen termékeknel a hűtési idő csökkentése jelentősen javítja a termelési hatékonyságot. A hűtési idő csökkentésére az egyik legjobb megoldás a formakövető hűtéssel ellátott szerszámbetétek alkalmazása. A hagyományos hűtőrendszerhez képest ennél a megoldásnál lehetőség nyílik összetett geometriájú hűtőkörök alkalmazására, így ez a rendszer több hőt képes elvonni a fröccsöntött darabtól és a hőelvonás egyenletesebb. Ennek következményeként csökken a ciklus idő és javul a termék minősége. Az összetett formájú hűtőkörök gyártása hagyományos megmunkálási technológiákkal nem lehetséges, a feladatra az anyaghozzáadás elvén működő eljárások alkalmasak. A formakövető hűtőrendszerrel ellátott szerszámbetétek gyártására a legelterjedtebb technológia a szelektív lézer színterezés, amely lehetővé teszi a különböző keresztmetszetű és alakú hűtőkörök kialakítását [5].

Munkám során több különböző alapanyagból készült hagyományos kialakítású, illetve DMLS gyártási technológiával előállított formakövető hűtéssel ellátott szerszámkialakítást vizsgáltam. Vizsgáltam továbbá a szimulációs szoftverek felhasználási lehetőségeit a formakövető hűtéssel ellátott szerszámbetétek tervezése, illetve a termék várható deformációinak becslése során. Dolgozatomban bemutatom a különböző hűtőcsatorna-kialakítás és szerszámanyag-választás hatását a termék minőségére és a fröccsöntési ciklusra.

2. Irodalom áttekintés

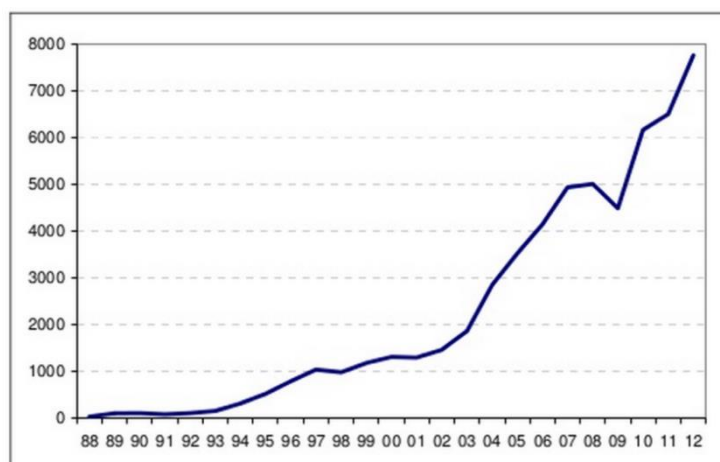
A dolgozatomban a formakövető hűtési rendszerek hatékonyságát vizsgálom. Az irodalmi áttekintésben bemutatom a munkám elméleti háttérét és bevezetem az alapfogalmakat.

2.1. Prototípusgyártás

A következő fejezetben a gyors prototípusgyártási és szerszámozási technológiákat csoportosítom és bemutatom a legfontosabb eljárásokat, továbbá részletesen kitérek a szerszámgyártására használt DMLS technológiára.

2.1.1. A prototípusgyártás története és fejlődése

A prototípus gyártás anyaghozzáadás elvén működő technológia, a prototípust rétegről rétegre haladva építi fel, így olyan geometriák is elkészíthetők, amelyekre más technológiával nem lenne lehetőség. Az első bejegyzett RPT technológia a sztereolitográfia volt, 1987-ben mutatták be a detroiti Autofact kiállításon. Kezdetekben az eljárás pontatlan, az anyagválaszték korlátozott volt, mára viszont már az egyik legpontosabb és legjobb felületi minőséget szolgáltató technikák közé tartozik. Ezután sorban jelentek meg az új prototípusgyártási eljárások, mára már több mint egy tucat technológia létezik. Ezzel párhuzamosan, egyre nőtt a technológia iránti kereslet is, a Wohlers Associates által évenként megjelentetett kiadvány [3] szerint az elmúlt 20 évben a technológia iránti kereslet exponenciálisan nőtt, az eladott berendezések száma 2007-ben elérte 5700-as darabszámot (1. ábra) [3, 4, 5].



1. ábra Az RPT berendezések eladásának alakulása az elmúlt 20 évben [3]

Az elmúlt években a felhasználási terület is átalakulóban van, amíg 2003-ban még az autóipar használta legnagyobb részt az RPT technológiákat, addig a 2005-ös évre már a felhasználói és elektronikai termékek vették át a vezető szerepet. Továbbá jelentősen nőtt az orvostechikai felhasználás is, pl. a fog- és állkapocs-implantátumok területén is hasznosítják a technológiát. A berendezésekkel polimer, fém és kerámia prototípusokat is előállíthatunk. Az RPT eljárások továbbá felhasználhatók szerszámkészítésre, illetve kisszériás termékek előállítására is, így olyan szerszámok és termékek is létrehozhatók, amiket más technológiával nem lehetne előállítani. Erre a felhasználásra példa a kontúrkövető hűtőrendszer, amelyekkel a fröccsöntési ciklus lerövidíthető és a termék vetemedése csökkenthető [5].

2.1.2. Az RPT berendezések által használt fájlformátumok bemutatása

Minden nyomtatási eljárás során a 3D Computer Aided Design, digitalizált vagy szkennert modellből először az RPT technológiának megfelelő fájlt kell generálni. Több fájlformátum is létezik, amellyel ez megoldható, az egyik ilyen az STL fájlformátum. A formátumot 1987-ben a 3D Systems fejlesztette ki, annyira jól sikerült, hogy azóta a legtöbb gyors prototípusgyártási eljárás bementi paramétereit ilyen formátumban kell megadni. A fájlformátum a Standard Tessellation Language vagy a Standard Triangulation Language rövidítése. A konvertálás során az eredeti geometriát háromszögekkel közelíti a rendszer, így az összetett geometriájú darabok leegyszerűsíthetők és a modell szeletelése során a kontúrvonal egyenes szakaszok összegéből áll, ennek segítségével az eljárások vezérlési feladatai leegyszerűsödnek. A fájl tartalmazza a háromszögek csúcspontjainak és normálisainak koordinátáit. A normálvektorok minden esetben kifelé mutatnak, a gyártás során a berendezés innen tudja megállapítani, hogy melyik térfogat tartozik a modellhez. A háromszögek csúcspontjai mindig az építési területen belül találhatók.

Mivel a konvertálás során az eredeti geometriát a program véges számú háromszöggel közelíti, ezért a hálógenerálásnál nagy figyelmet kell fordítani a pontosságra. A generálás során a program két paraméter figyelembevételével készíti el a hálót, a húrhibával és a legnagyobb központi szöggel. A húrhiba az a távolság, ami a háromszög és az eredeti kontúr között mérhető, a központi szög pedig a kontúrt közelítő élhez húzott egyenesekhez tartozó szög [5].

További hibát eredményezhet, hogy ha a szomszédos háromszögek nem 2 közös csúcsponttal rendelkeznek, a modell nem zárt, a háromszögek metszik egymást vagy a normálisok nem kifelé mutatnak. Az ilyen jellegű hibák ellenőrzésére léteznek ellenőrző programok, így kiszűrhetők a gyártás megkezdése előtt. Az STL fájl generálása során

létrejövő hibákat pontossági hibának nevezzük, ezen kívül létezik még felbontási hiba, ami abból adódik, hogy a berendezés csak véges számú címezhető x, y, z koordinátákkal rendelkezik. További hiba a rétegvastagságból adódó hiba, ami a rétegvastagság segítségével könnyedén számítható. A rétegvastagságból adódó hiba a darab felületi minőségét határozza meg, a maximális hiba kiszámolására használt összefüggés [5]:

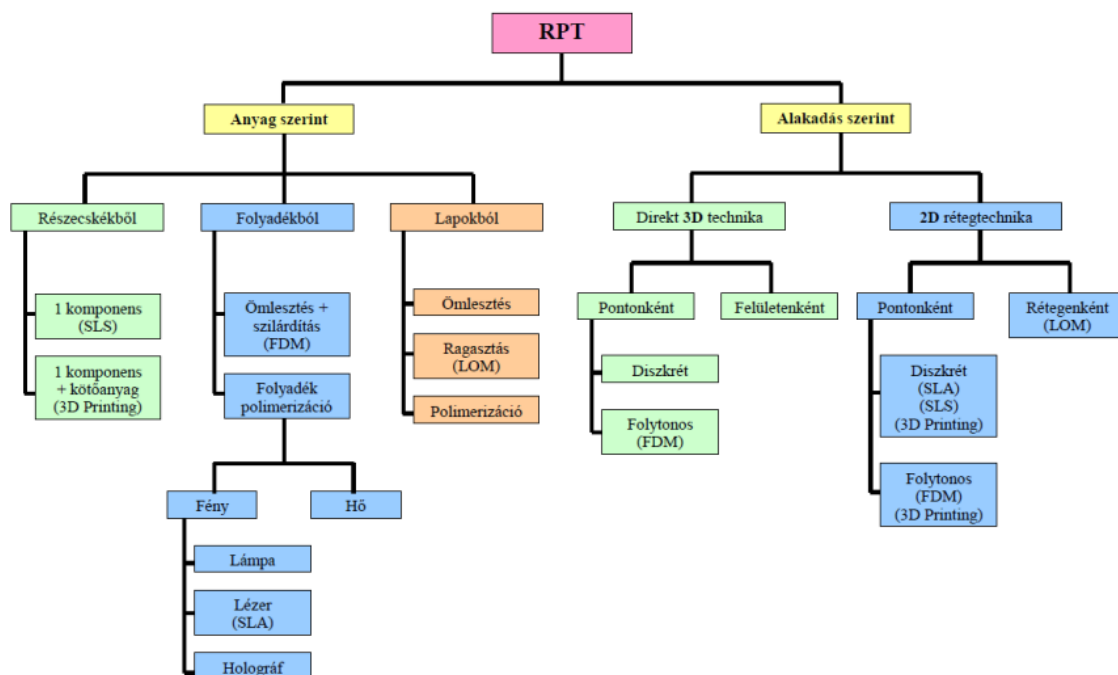
$$R_{max} = \frac{t}{2\sqrt{2}}, \quad (1)$$

ahol t a rétegvastagság, R_{max} a rétegvastagságból adódó maximális hiba. Az előző jelöléseket használva az átlagos hibát pedig a következő összefüggéssel lehet kifejezni [5]:

$$R_{\text{átl}} = \frac{t}{4\sqrt{2}} \quad (2).$$

2.1.3. Az RPT technikák csoportosítása és a legfontosabb technológiák bemutatása

A gyors prototípusgyártási technológiákat két szempont szerint lehet csoportosítani (2. ábra). Az első módszer a felhasznált anyagok szerinti csoportosítás, amely szerint három anyagosztály használható a prototípus gyártás során, lapok, folyadékok és porok. A másik szempont a gyártási sorrend szerint osztályozza a technikákat. A direkt 3D technikánál a termék különböző részeit építi fel, nem rétegről rétegre halad a berendezés. A 2D technikánál pedig a berendezés rétegről rétegre haladva alakítja ki a prototípust, csak akkor lép a következő rétegre, ha az adott réteg már elkészült.



2. ábra Az RPT technikák csoportosítása [5]

A lapokból építkező technika legfontosabb technológiája a Laminated Object Manufacturing (LOM). Ennél az eljárásnál a bevonatolt lap az adagoló és lehúzó henger közé van tekercselve, az adagoló hengerről indulva kerül a munkatérbe az alapanyag. A munkatér főbb részei az asztal, a lézer és a simítóhenger. Az asztal biztosítja a prototípus megfelelő megtámasztását és az építési folyamat során a függőleges irányú süllyesztést. A lézer először körbevágja a termék adott keresztmetszetéhez tartozó kontúrokat, majd a nem szükséges részeket kisebb méretű négyzetekre osztja. Ezután a fűtött simítóhenger végig megy a teljes keresztmetszeten, így a lap alján lévő hőre reagáló ragasztó összeragasztja az előző réteggel. A következő lépésnél az asztal egy rétegnyt lejjebb mozdul, a hengerek forgatásával pedig újabb réteg lap kerül a munkatérbe, ezután a folyamatok a leírt módon ismétlődnek, amíg a munkadarab el nem készül. Miután elkészült a prototípus el kell távolítani a munkatérből, majd a felesleges rétegeket le kell törni a modelltől, ehhez nyújt segítséget az, hogy a berendezés a kontúrok körbevágása után felkockázta a felesleges területeket. A technológia alapanyagai lehetnek különböző LOM papírok, üvegszállal erősített kompozit lapok és műanyag lapok is. Az előnye, hogy viszonylag gyors, olcsó és nagyméretű darabokat is lehet gyártani, továbbá nem szükségesek támasztóelemek és nincs utólagos térhálósítás. Hátránya, hogy a belső üregek nem gyárthatóak csak két részből, a függőleges irányú mechanikai tulajdonságok eltérnek a rá merőleges irányokban lévőktől, a modell nedvesség hatására vetemedhet, ennek elkerülése érdekében impregnálni kell [4, 5].

A folyadékot felhasználó technikák csoportjában három fontosabb technológia is található, az egyik a sztereolitográfiai, rövidítve SLA. Ennél a technológiánál is az alakadás lézerrel történik, az alapanyag epoxi vagy valamilyen akrilát bázisú gyanta. A berendezés a prototípust az alaplemezre építi, amely a gyanta tárolására szolgáló tartályban helyezkedik el és tulajdonképpen egy perforált lemez. Először a felső pozícióban lévő alaplemez egy rétegvastagságnyi függőlegesen lefele elmozdul, majd a simítólemez végig megy a munkatéren, erre a lépésre azért van szükség, mert csak így biztosítható a réteg egyenletessége. A HeCd vagy YVO₄ lézer a réteg szükséges részeket térhálósítja, ezután a folyamatok periodikusan megismétlődnek. Az eljárás előnye, hogy az egyik legpontosabb RPT technológia, jó felületi minőséget biztosít és az előállított darabok lakkozhatóak és festhetőek. Hátránya viszont, hogy támasztóelemeket és utólagos térhálósítást igényel a gyártás, a vetemedés és zsugorodás nehezen kiszámítható, az alapanyagok drágák és mérgezőek [4, 5].

Szintén a folyadékot felhasználó technológiák közé sorolható az Fused Deposition Modelling (FDM). Az eljárás során a huzal kiszerezésű hőre lágyuló polimert alakítható

állapotba hozza a berendezés, ezután a fúvókán keresztül extrudálja. Így több komponensű és többszínű prototípus is gyártható, csendes működés jellemzi és a technológiához lézer sem szükséges, így irodai alkalmazásra tökéletesen alkalmas. Az eljárás hátránya, hogy támasztóelemeket igényel, pontatlan, a rossz felületi minősége miatt hosszadalmas utómunka szükséges, továbbá a vízszintes irányú pontossága nagyban függ a felhasznált fúvóka átmérőjétől [4, 5].

Az Objet technológia az egyik legpontosabb RPT technika, a gyártási folyamat során fotopolimer térhálósításával jön létre a prototípus. A nyomtatófejek a fotopolimert az előző lépésben felhordott rétegre viszik fel, ezután az UV lámpa térhálósítja a réteggé összeállt cseppeket. A nagyobb pontosság érdekében egy simítópenge végigpásztázza a keresztmetszetet és eltávolítja a réteg legfelső részét. A technológiával így 16 μm -es rétegvastagság érhető el. A következő lépésben az asztal elmozdul egy rétegvastagságnyi lefele és folytatódik a nyomtatás, egészen a darab elkészültéig. Az eljárás előnye, hogy gyorsan, pontosan, utólagos térhálósítás nélkül lehet prototípust gyártani, viszont támasztóelemek használata szükséges a darab pozicionálásához [4, 5].

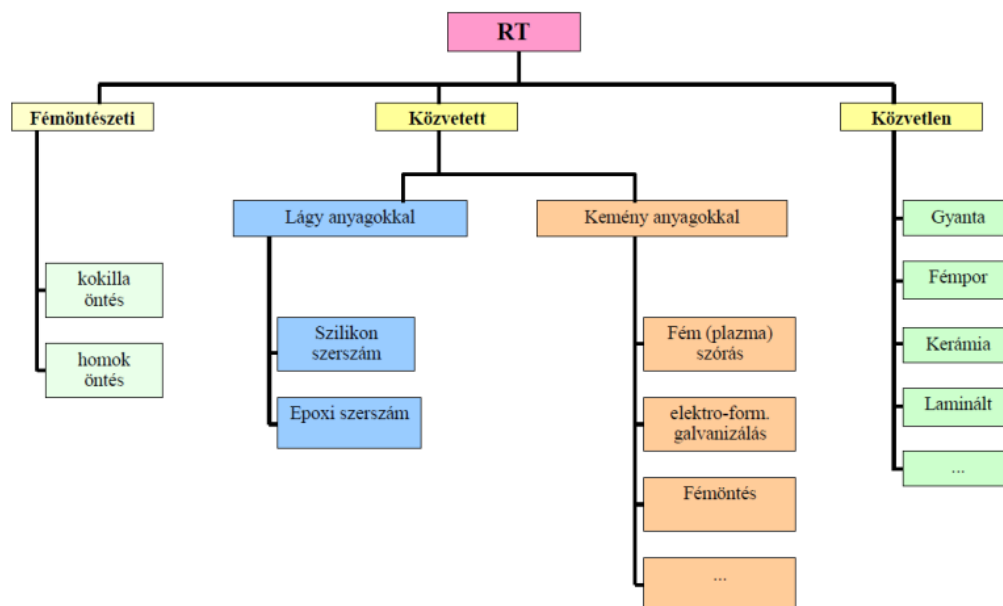
Az utolsó kategória a részecskékből vagy porból építkező technikák csoportja, ide tartozik a szelektív lézer szinterezés (SLS) is. A technológia hasonlít a sztereolitográfiára, csak néhány részletben tér el tőle. Az SLS eljárásnál az alapanyag por állapotú, fémpor feldolgozásánál támaszték, és az oxidáció elkerülése érdekében nitrogén atmoszféra használata szükséges. A kiindulási anyag lehet fém, kerámia és polimer is, a polimer anyagok között a legelterjedtebb az ABS és a PA. A fémporok direkt és indirekt eljárással is feldolgozhatóak. Az indirekt eljárásnál a por műanyag kötőanyaggal kevert, a lézer a kötőanyagot egymáshoz köti. Az direkt eljárási kategóriába sorolható a DMLS technológia, amellyel közvetlen módszerrel készíthetőek fémporból prototípusok. A technológia előnye, hogy polimer termékek támasztóelemek nélkül gyárthatóak, egylépcsős, így nem szükséges utólagos térhálósítás, viszont a porózus szerkezet miatt a finiselési és utólagos munkálatok hosszadalmasak, továbbá a pontossága és felületi minősége korlátozott [4, 5].

A 3D Printing (3DP) a gyártás folyamán szintén porból állítja elő a prototípust. Az eljárást az MIT fejlesztette ki, felhasználható akár öntőszerszámok közvetlen homokból való előállítására is. A gyártási folyamat során az előzőleg elkészült rétegre felviszik az újabb porréteget, majd a tintasugaras nyomatóhoz hasonlóan működő berendezés kötőanyagot helyez el azokon a részeken, ahol a modell elhelyezkedik. Ezután az asztal lesüllyed egy rétegvastagságnyi és a terítő henger újabb réteget hord fel és a már említett lépések újrakezddnek. A darab a végleges formáját a por eltávolítása és a hőkezelés után nyeri el. Az

eljárással gyorsan, támasztó elemek nélkül lehet gyártani, viszont a pontossága korlátozott, utólagos keményítést igényel a gyártott darab és a kialakított belső felületek nem hozzáférhetőek, így az öntészeti felhasználás során az öntött darabok felületi minősége korlátozott [4, 5].

2.1.4. RT technikák csoportosítása

Az előzőekben ismertetett RPT technikák segítségével közvetlen, közvetett és fémöntészeti eljárással is készíthetőek fröccsöntő szerszámok, az RT technikák csoportosítását mutatja 3. ábra. Látható, hogy a közvetett szerszámgyártáshoz lágy és kemény anyagok közül választhatunk, az anyagválasztást befolyásolja, hogy hány darab legyártása és milyen alapanyag feldolgozása a cél, mert pl. egy üvegszállal erősített alapanyag koptató hatása nagyobb, mint egy töltetlené. A szerszám élettartama mellett meghatározó, hogy a polimerből készült szerszámok hővezetési tényezője kb. 0,2-3 W/mK, míg az acél szerszámé 20-30 W/mK körüli értéket képvisel, emiatt a ciklusidő lényegesen hosszabb egy polimer szerszámnál.



3. ábra Az RT technikák csoportosítása [5]

A közvetett szerszámgyártásnál az RPT technológia segítségével előállítjuk a termék prototípusát és annak segítségével hozzuk létre a szerszámot. Ennél fogva a prototípus pontossága és felületi minősége meghatározó, ezért fontos a megfelelő RPT technológia megválasztása, így elkerülhető a hosszadalmas utólagos felületi megmunkálás is. A legpontosabb technológiák közé tartozik az SLA, Objet, 3D Plotting és a LOM. A felhasznált RPT technológiát meghatározza a szerszámkészítési eljárás. A szilikonból készült szerszámok

gyártása gyors, költségkímélő és pontos, mert a szilikon finom részleteket és összetett geometriákat is jól leképez. A mesterminta általában SLA-val készül, de a LOM technológia is felhasználható. Szilikon szerszámmal gravitációs, vákuum alatti öntéssel és vékonyfalú reaktív fröccsöntéssel készíthetők el a termékek. Használható néhány tíztől kb. száz-as darabszámig. Az epoxiból készült szerszámmal már akár fröccsöntéssel is előállíthatóak termékek, a fröccsöntési ciklus viszont hosszabb és csak kisebb belső nyomások engedélyezettek. A gyártás nagyobb pontosságot igényel, viszont a szerszámban hűtőkörök és kidobók helyezhetőek el. Az epoxihoz általában fémpor kevernek, így növelik a hővezetési tényezőt és a kopásállóságot. A szerszám élettartama 50-1000 ciklus. Fémszerszámok is előállíthatóak közvetett módszerrel, ehhez a mestermintára fémszórással 2-4 mm fémréteget hordanak fel, utána alacsony olvadáspontú fémmel körbeöntik a bevont mestermintát.

A fémöntészeti eljárások csoportjába tartozik a kokilla- és a homoköntés. A kokillaöntéshez előállíthatóak a szerszámok közvetlenül az RPT berendezéssel és a prototípust felhasználva közvetett módon is. Közvetlen módszer, amikor 3D Printinggel állítják elő a kerámiahéjakat, az eljárás hátránya, hogy a belső felületeihez nem lehet hozzáférni. Másik módszer szerint a legyártott prototípust felhasználva készíthető öntészeti szerszám, a prototípus készülhet SLA vagy LOM technológiával is. A kerámia bevonatolás után a kiégetés következik, a LOM technikával készített darab némi hamut hagy vissza. Ezután következik a fémöntés és a héj szétörésével az eltávolítás. Látható, hogy a prototípusok csak egyszer használhatók, így ez a technológia kevésbé gazdaságos.

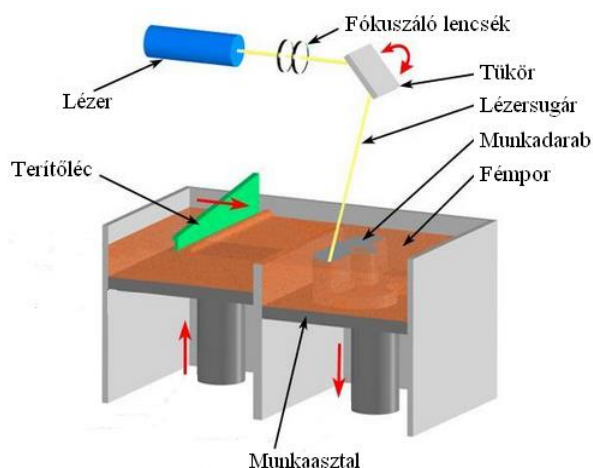
A közvetlen szerszámgyártás legnagyobb előnye, hogy így a szerszámok hűtőkörét tetszőleges alakúra és keresztmetszetűre választhatjuk, így a hűtési idő és a vetemedés minimalizálható. A legelterjedtebb közvetlen RT technika a szelektív lézerszinterezés, amivel a hagyományos megmunkáláshoz hasonló mechanikai és felületi tulajdonságok érhetőek el. A fémpor feldolgozására a direkt és indirekt gyártási módszerek is alkalmasak. Az indirekt eljárásnál a por műanyag kötőanyaggal kevert, a lézer a kötőanyagot egymáshoz köti, a modellt a folyamat végeztével eltávolítják a munkadérből és letisztítják a felesleges port. A nem színterezett port az üregekből rendkívül nehézkes eltávolítani, mivel a prototípus még sérülékeny. A végleges tulajdonságok elnyerése érdekében a darabot hőkezelik, amely során először kb. 300°C-on elgőzölög a műanyag, majd 700°C körül elkezdődik a szinterezési eljárás, ezzel párhuzamosan a hőmérsékletet növelni kell 1100°C körüli értékig, ezen a hőmérsékleten átítatják rézzel vagy bronzal a szerszámot, miközben a szinterezési eljárás tovább folytatódik. Az 1100°C körüli hőmérsékletet kb. 4 órán át kell tartani, majd lassú hűtéssel hűteni a darabot, így jön létre a kb. 60% szerszámacél és 40% bronz vagy réztartalmú

kompozit szerszám. A direkt eljárás során a port egy nagyteljesítményű lézer megömleszti, egymáshoz kapcsolja a részecskéket. Az építés itt is rétegről rétegre történik, a polimer prototípusgyártáshoz viszonyított különbség, hogy a fém darabok megtámasztást, nitrogén atmoszférát, hosszas utólagos hőkezelést és finiszelést igényelnek [5, 6].

Homok öntőformák is gyárthatóak közvetlen technikával, erre a célra fejlesztette ki az ExOne a 3D Printerhez hasonló eljárását. Az eljáráshoz használt homok kötőanyag katalizátorral kevert, a homokot a simítóléc eloszlatja az asztalon, majd a nyomtatófej a kötőanyag második komponensét hordja fel a meghatározott helyekre, a második komponens elindítja a polimerizációt, ami összeköti a részecskéket. Ezután a következő réteg felhordása következik és a folyamat addig ismétlődik, amíg a szerszám el nem készült. A felesleges por eltávolítása után a szerszám öntésre kész állapotú [5].

2.1.5. DMLS technológia

A Direct Metal Laser Sintering egy közvetlen szerszámkészítési eljárás, amely során a fémport lézer hozza ömledék állapotba. Az eljárás hasonló a szelektív lézer szinterezéshez, a DMLS eljárás viszont fémporra optimalizált, így nagyobb teljesítményű lézerrel szerelt a berendezés. A gyártás során a darab pozicionálásához támasztóelemek szükségesek. Ezek megfelelő számát és elhelyezkedését gyártás előtt meg kell határozni, így a gyártás megkezdése előtti tevékenységek: fájlgenerálás, modell ellenőrzése és korrigálása, modell elhelyezése a munkatérben, támasztékképzés, szeletelés. A DMLS berendezés felépítése, amelyet az 4. ábra szemléltet, megegyezik a szelektív lézerszinterező felépítésével. A port egy simítóléc oszlatja szét az asztalon, a lézer először a kontúrokat szinterezi, majd az egész keresztmetszetet. Ezután az asztal lesüllyed egy rétegvastagságnyi és a simítóléc újabb réteg port terít szét, a folyamat addig ismétlődik, amíg a darab el nem készül. A gyártás során akkora belső feszültségek léphetnek fel, hogy a munkadarab elválhat az asztaltól vagy a támasztéktól, ennek csökkentésére a lézer pásztázási iránya rétegenként 30°-ot fordul. A fémek szinterezése során fellépő oxidáció elkerülése érdekében nitrogén atmoszférát alkalmaznak a folyamat alatt. A gyártás végeztével a munkadarabot le kell választani az asztalról, majd a támasztékokat és a felesleges port el kell távolítani. Az olyan típusú szerszámok esetében, ahol a szerszám a felhasználás során nagy hőterhelésnek lesz kitéve, a gyártás után hőkezelés és feszültségmentesítés szükséges [5].



4. ábra A DMLS berendezés felépítése [5]

A DMLS technológiával készített darabok felületi minősége nem éri el a hagyományos megmunkálási technológiákkal készített termékek felületi minőségét, ezért a szerszámgyártás befejező lépése a felületjavító-megmunkálás, amellyel a DMLS technológiával elért kb. 10-20 μm -es felületi érdesség akár 0,05 μm alá javítható. A legyártott darabok a hagyományos technológiákkal megmunkálhatóak, így forgácsolhatóak, polírozhatóak stb.. Ezek az utólagos eljárások viszont időigényesek és nem mindegyik alkalmazható összetett formák esetén.

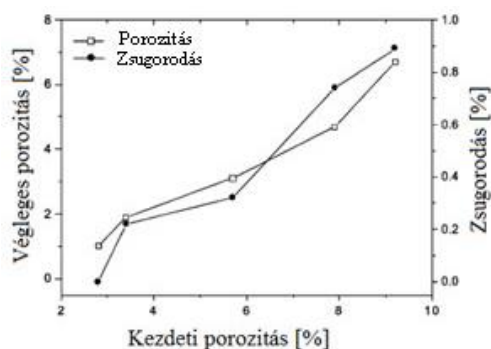
A szerszám két legfontosabb, a technológiai paraméterektől függő tulajdonsága a sűrűség és felületi minőség. A sűrűség meghatározza a mechanikai tulajdonságokat, így a minél egyenletesebb és nagyobb érték elérése a cél. A DMLS technológiával készített szerszámok átlagos porozitásával foglalkoztak Coremans és társai [8], a kísérleteik bizonyították, hogy a porozitás átlagos értéke 30%. A minőség javítása érdekében Coremans és társai polírozták és bevonatolták a DMLS technológiával gyártott szerszámot. A sűrűség a gyártási paraméterek változtatásával is javítható, továbbá a felhasznált por is befolyásolja. Petzdolt és társai vizsgálták a különböző technológiai paraméterek és a részecskék átmérőjének hatását a sűrűség és felületi minőségre. Az eredményekből megállapították, hogy a porrészecskék átmérője csökkentésével nő a darab sűrűsége, mert a nagyobb felület megnöveli a szinterezési tevékenységet és emellett megnő a szinterezési sebesség is, viszont a lényegesen kisebb átmérőjű részek hajlamosak szinterezés közben aggregátumot képezni, így csökken a szinterezés mértéke és a kinematikája. Azt tapasztalták, hogy a lézernyaláb hullámhosszát elérve, amely 10,6 μm , a lézernyaláb szórása megnő, így kevesebb energiát abszorbeálnak a részecskék és jelentősen csökken a darab sűrűsége. A technológiai paraméterek közül először a rétegvastagságot vizsgálták, az eredmények szerint a

rétegvastagság csökkentésével csökken a sűrűség, továbbá nő méretpontosság és a felületi minőség. Az alkalmazott lézer teljesítmény is nagyban befolyásolja a sűrűséget, a nagyobb teljesítmény nagyobb hőt és jobb szinterezést jelent, emiatt nő a sűrűség. A felületi minőség tovább javítható, ha a felülethez közelebbi rétegek szinterezése során a sorközt optimálisra választjuk, így befolyásolva az átfedést. Minden anyaghoz más optimális szinterezési sorköz tartozik, emiatt nem lehet egy általános értéket meghatározni [8, 9].

A felületi minőség tovább javítható utólagos megmunkálással, az EOS GmbH félautomata sörétezést, csiszolást, polírozást, textúrázást és magas hőmérsékletű epoxigyantás bevonatolást ajánl. A sörékezés során fém részecskéket fújnak a gyártott darab felületére nagy sebességgel, ezzel a felületi minőséget néhány mikrométerrel lehet javítani. Ezután következik a csiszolás és polírozás, így akár 0,05 μm -es felületi minőség is elérhető. Utána történhet a különböző textúrák szerszámfelületre munkálása. A befejező lépés a bevonatolás, amit kb. 60°C-on végeznek, az epoxit ecsettel fel kell vinni a szerszám felületére, az epoxi a kapilláris effektus hatására kismértékben a pórusokba is beszivárog [5, 77, 10].

Tay és Haider a munkájukban az utólagos felületi minőség és szilárdságnövelés lehetőségeit vizsgálták. A vizsgálatok során homokfűvás, elektrolitikus nikkelezés (electroless nickel plating) és matt nikkel galvanizáció (semi-bright nickel electroplating) technológiákat használtak. Először homokfűvást alkalmaztak, ennek következtében a felesleges por eltávolításra került, továbbá a felületi érdességet 1-2 μm -rel javult, a szerszám keménysége ebben az állapotban 30-55 HV. Mindkét nikkelezési eljárásnál nikkelt visznek fel a szerszám külső felületére, a különbség a két eljárás között, hogy az elektrolitikus nikkelezésnél kémiai hatást nem segíti elő elektromos áram, így lassabban hordja fel a felületre a rétegeket. Továbbá a matt nikkelgalvanizálással az élek könnyebben alakíthatóak ki, viszont a felületi minősége elmarad az elektrolitikus nikkelezéshez képest. Először az elektrolitikus nikkelezést kell alkalmazni, aminek az időtartama 24 óra, ezután következhet a matt nikkel galvanizálása, amely 2 órát vesz igénybe. Az eljárásokkal 4-6 μm felületi érdesség érhető el, továbbá a felülethez közelebb eső rétegekben a sűrűség megnő, mert a nikkel ionok a felső rétegekben rakódnak le [11].

További felületi minőség javításra és sűrűség növelésre nyújt lehetőséget az utólagos szinterezés. Ehhez hőkezelní kell a darabot 1250°C környékén, így a szinterezési folyamat teljesen végbe tud menni. A 5. ábra szerint a hőkezelés során a zsugorodás szinte 0%, a porozitás pedig szinte teljesen megszűnik. Az átlagos felületi érdesség 8 μm körüli értékre csökkent, a darab keménysége pedig 330 HV30-ra nőtt. Továbbá az eljárással felületi edzés is elvégezhető, ha hűtési sebességet nő [12].



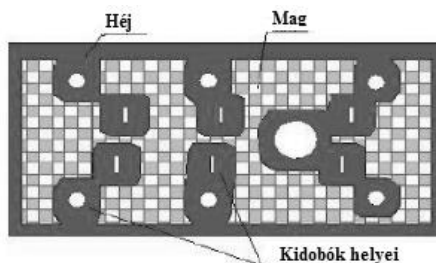
5. ábra A hőkezelés hatása a porozitásra és a zsugorodásra [12]

A DMLS technológiához kapcsolódóan több tervezési szempont is létezik. A Z irányú építés a leglassabb építési irány, így egy hosszúkas terméket fektetve gyorsabb gyártani, viszont állítva kisebb belső feszültség keletkezik a darabban, ez látható a 6. ábrán. Emiatt fontos figyelembe venni, hogy a gyártott darabra milyen igénybevételek fognak hatni [5].



6. ábra A pozicionálás hatása az építési időszükségletre és a belső feszültségre [5]

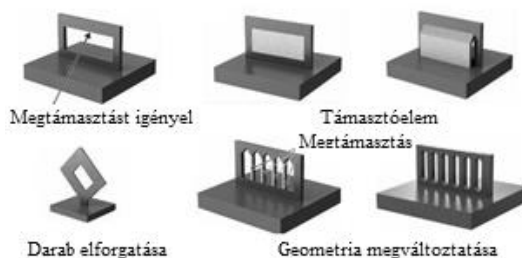
Szükségszerű, hogy az építési térfogatot minimalizáljuk, továbbá lehetőleg a prototípus vagy szerszám bonyolult részeit gyártssuk DMLS technológiával, a többi részt pedig hagyományos megmunkálással. Ha a gyártandó darab igénybevétele megengedi, akkor a gyártási idő és a költségek minimalizálásához nyújt segítséget az úgynevezett skin-core építési technika. Ezzel a technikával a darab külső része tömörre, a belső fele pedig hézagosra építhető, a 7. ábrán látható az eljárással létrehozott szerkezet [5].



7. ábra A skin-core technika [5]

További építési alapelv, hogy az üregek alaplappal párhuzamos felületeit meg kell támasztani valamilyen módon. Ez történhet támaszanyaggal, de akár a geometriája módosításával vagy a darab elforgatásával is. A forgatás a szögletes üregek esetén nyújt megoldást, a geometriát

pedig úgy lehet módosítani, hogy a nagyobb üregeket kisebb részekre osztjuk, a megoldások a 8. ábrán láthatóak [5].

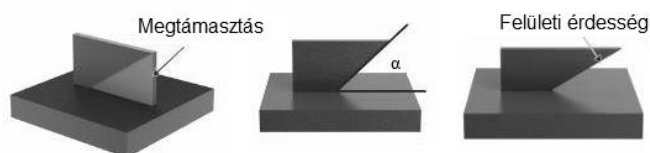


8. ábra A különböző megoldások szemléltetése [5]

Az alaplappal szöget bezáró felületek építhetősége is korlátozott, vagy meg kell támasztani az ilyen részeket, vagy a geometriát kell megváltoztatni, különben a felület jelentős mértékben érdessé válik. Minden anyaghoz tartozik egy meghatározott szög, amely alkalmazása biztosítja, hogy ne lépjen fel felületi hiba, az ajánlott értékeket az 1. táblázat tartalmazza. A 9. ábrán látható egy példa az alaplappal szöget bezáró felületek építhetőségének bemutatására [5].

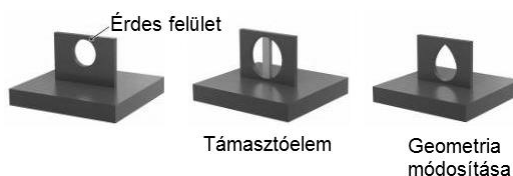
Rozsdamentes acél	30°
Titán	20°-30°
Alumínium	45°
Króm kobalt ötvözet	30°

1. táblázat Az ajánlott építési szögek [5]



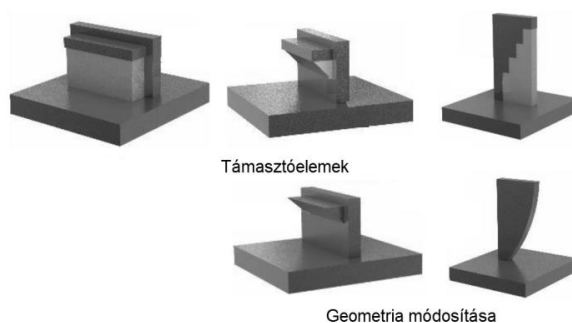
9. ábra Az építési probléma és megoldása [5]

A kisebb átmérőjű furatok probléma nélkül kivitelezhetőek, a nagyobb átmérőjű furatok esetében viszont a furat felső részében felületi hiba keletkezik, ezért megtámasztást kell alkalmazni vagy a geometriát kell módosítani. A furat geometriáját körről csepp formájúra lehet átalakítani, így a felső rész szöget zár be az alaplappal, a megoldások a 10. ábrán láthatóak [5].



10. ábra A furatok építhetősége [5]

A hosszúkás modellek nem építhetők oly módon, hogy a hosszabbik oldaluk a simítóléccel párhuzamos, mert a simítóléc a por szétterítése során a már megépített rétegeket károsítaná, ezért a modellt megfelelő szögben kell elhelyezni a simítóléchez képest. További alapelv, hogy a kilógó részek is megtámasztást igényelnek, a megtámasztás elérésére több módszer is létezik, ezeket mutatja be a 11. ábra [5].



11. ábra A kiálló részek gyártása [5]

2.2. Fröccsöntési szimuláció

A következő fejezetben bemutatom a fröccsöntési szimulációs programok fejlődésének történetét, felépítését, illetve a különböző hálózási- és elemtípusokat. Továbbá kitérek a hűtési szimuláció felépítésre, típusaira és a fröccsöntött termékek vetemedését befolyásoló tényezőkre is.

2.2.1. A fröccsöntési szimulációs programok fejlődésének története és felépítése

A CAD és CAM eljárásokat már az 1900-as évek közepétől kezdve alkalmazzák a mérnöki problémák megoldására. Az 1990-es években még a 2D-s tervező programokat használták, mára viszont a számítástechnikai fejlődés lehetővé tette a 3D-s szimulációs programok alkalmazását. A 3D-s programok előnye, hogy átláthatóbbá és kezelhetőbbé teszik a folyamatot. Mára a CAD és CAM programok mellett a szimulációs programok használata is elengedhetetlen a termékek és szerszámok tervezése során. A szimulációs programok használata előtt a szerszámtervezés többlépcsős volt, nagymértékben múlt a tervező mérnök tapasztalatán és a szerencsén. A szerszámokat többször ki kellett próbálni, és az ezekből nyert tapasztalatok alapján kellett utólag megmunkálni. A számítógépes szimulációs programok megjelenése óta a szerszám vizsgálata elvégezhető anélkül, hogy azt a valóságban ténylegesen el kellene készíteni. A szimulációs programok egy megoldó algoritmusra épülnek, amelyet további adatbázisok és geometriai adatok egészítenek ki, így képes a program az eredmények számítására [4, 13].

2.2.2. A szimulációs programok által felhasznált hálótípusok bemutatása

A szimulációk futtatásához az importált CAD modellhez először végeeselemes hálót kell létrehozni. A hálóelemeket csomópontok határozzák meg, ezek a csomópontok tartalmazzák a szimulációs adatokat. A hálóelemek követik a CAD modell határvonalát, a kisebb élhosszal rendelkező, finomabb hálók jobban leírják az eredeti modellt. A hálóelemek továbbá szétválasztják a CAD modellen belül lévő különböző testeket, a programok a hálóelemek segítségével határozzák meg a testek határvonalait. Három alaptípust különböztetünk meg, a két csomópontos beam, a három csomópontos háromszög és a négy csomópontos tetraéder elemet. A különböző elemtípusokat a 12. ábra szemlélteti. A legegyszerűbb a két csomópontos beam elem, ezt szokás a hűtőkör, beömlő és elosztócsatorna hálózására használni. A három csomópontos háromszög elemet a középsík és felületi hálózás során használják a termék, inzertek és stb. hálózására. A négy csomópontos tetraéder elem a legösszetettebb, így ez szolgáltatja a legpontosabb eredményeket, felhasználható beömlők, hűtőkörök, termékek, stb. hálózására [13, 14].



12. ábra A fröccsöntési szimulációs programok által felhasznált elemtípusok [14]

Ezekkel az elemtípusokkal három fajta háló hozható létre, a középsík, a felületi és a 3D hálózás. A középsík hálózás során a modell középsíkját vagy középvonalát használja fel a program a hálózás során. Három csomópontos háromszögelemek használhatóak a termék hálózására. A felületi hálózás a modell keresztmetszetének felületére hozza létre a három csomópontos háromszögelemekből álló hálót, a hűtőkörök és az beömlő- és elosztócsatorna hálózására ennél a hálózási típusnál is a két csomópontos beam elem használható. A 3D hálózás során a teljes keresztmetszetben négy csomópontos tetraéder elemet használ a hálózási algoritmus. Ennél a hálótípusnál a hűtőkörök és az beömlő- és elosztócsatorna hálózása történhet két csomópontos beam és négy csomópontos tetraéder elemekkel [13, 14].

2.2.3. Megoldó algoritmus feltevései

Ugyanazt a megoldó algoritmust használja a program a középsík és a felületi hálózáshoz. Minden megoldó algoritmus bizonyos feltételezéseken alapul, a középsík és

felületi hálózashoz használt algoritmus az általánosított Hele-Shaw áramlási modellre alapul, amely a következő feltételezésekkel él:

- a Newtoni folyadék áramlása lamináris,
- a tehetetlenség és gravitáció hatása figyelmen kívül hagyható,
- a hőszállítás a vastagság irányában elhanyagolható,
- a szélesség irányában a hővezetés elhanyagolható a vastagságbeli hővezetéshez hasonlítva,
- a hőleadás az éleken elhanyagolható.

Az elemtípusokra további feltételezések vonatkoznak:

- A beam elemekkel Newtoni folyadékok tengelyszimmetrikus, kör keresztmetszetű áramlása szimulálható. A nem kör keresztmetszetű áramlás olyan kör keresztmetszetű áramlással helyettesíthető, amely hidraulikai átmérője megegyezik, de az áramlási sebessége kisebb. A szűkülő keresztmetszetekből adódó veszteségeket a viszkózitásban használt Bagley korrekción alapuló empirikus modellel számíthatóak. A nyírásból származó kiegyensúlyozatlanságok nem számíthatóak beam elemmel.
- A középsík hálózást 2,5D hálózásnak szokás nevezni, mert a vastagság tulajdonságok a középsíkon található 2D hálózhoz vannak rendelve. A középsík hálózást csak akkor lehet alkalmazni, ha minden keresztmetszet szélesség/vastagság aránya minimum 4:1, ha az érték ennél kisebb, akkor az nagy hibát okoz, mivel az oldalt elhelyezkedő elemeket nem veszi figyelembe a hőátadás számításánál.
- A felületi hálózás, más néven módosított 2,5D hálózás, abban különbözik a középsík hálózástól, hogy más módon számítja ki a modell vastagságát. Amíg a középsík hálózásnál a középsíkon található elemeknél lehet beállítani a vastagságot, addig a felületi hálózásnál a felületeken található szemközti elemek távolságából számítja a program a vastagságot. Ehhez a szemközti elemeket összepárosítja egymással, ahhoz, hogy pontos eredményeket kapjunk az elemek minimum 85%-át kell összepárosítani. Emiatt fontos szerepet kap a kúpossággal rendelkező termékeknél a hálósűrűség [13, 14].

A 3D hálózashoz használt megoldó algoritmus különbözik az előbb ismertetett algoritmustól, mert kevesebb feltételezést és elhanyagolást tesz fel. A megoldó algoritmus:

- 3D Navier-Stokes egyenleteket használja,
- megadja minden csomópontra a nyomást, hőmérsékletet és a három irányhoz tartozó sebességkomponenseket,

- figyelembe veszi a hővezetést mind a három irányba,
- segítségével figyelembe vehető a tehetetlenség és a gravitáció hatása.

A 3D hálózással pontos eredmények számíthatóak az olyan nagy falvastagságú termékeknél is, amelyek már nem alkalmasak középsík vagy felületi hálózásra [13, 14].

2.2.4. Hűtési analízis

Több fröccsöntés szimulációs program is lehetőséget nyújt a fröccsöntő szerszámokban folyó folyamatok elemzésére. A három legelterjedtebb az Autodesk által kínált Moldflow, a CoreTech System által forgalmazott Moldex 3D és a Sigma Engineering GmbH által forgalomba hozott Sigma programcsomag. Mindhárom program hasonló módon határozza meg a hűtési analízis során az eredményeket. A szimulációs programok segítségével többféle vizsgálatot futtathatunk, pl. kitöltődési, utónyomási, zsugorodási, hűtési és stb. vizsgálatokat. A formakövető hűtések tervezése során a hűtési vizsgálatok kerülnek előtérbe, ezekkel optimalizálhatóak a hűtőkörök. A hűtési szimulációk során a program kiszámítja a szerszám, a termék és a hűtőkör hőmérsékletét is. A szerszám és a termék hálózása történhet 2D és 3D elemekkel is, a 2D-s elemeknél viszont a számítások során a program a hőáramot csak x és y irányban képes számítani, így a felületre merőleges irányú hőelvonást elhanyagolja. Ez a módszer meghatározza először a termékből származó hőáramlást és a hozzátartozó hőmérséklet-eloszlásokat, ezután a hőáram segítségével számítja a szerszám hőmérsékletét. 3D-s elemeket alkalmazva a program képes mind a három irányban kiszámítani a hő áramlást, így pontosabb eredményeket ad. A 3D-s elemekhez kétféle hűtési szimulációs megoldás létezik, a környezeti elemek befolyását felhasználó és a véges elemes hűtési eljárás. Az előbbi eljárásnál a termékből kiinduló hőáramot használja a program határfeltételnek, így számítja ki a szerszám külső felületeinek hőmérséklet-eloszlását, ehhez az eljárás a környezeti elemek befolyását összesíti, ezeket hőforrásként kezeli. Ilyen környezeti elem pl. a hűtőközeg bemeneti paraméterei, szerszám felületi hőmérsékletprofilja, vezérlés típusa stb.. A számítások során figyelembe kell venni a geometria befolyását is, a Moldflow ezt úgy teszi meg, hogy a hálólelemmel szomszédos elemek paramétereit közvetlenül felhasználja, a távolabb eső elemeknél viszont a paraméterek átlagát veszi. Minél több elem paramétere kerül közvetlen felhasználásra annál pontosabb az eredmény, de ezzel együtt nő a számítási idő is. A program három algoritmust tartalmaz, amelyek segítségével beállítható, hogy milyen mértékben vegye figyelembe a geometria befolyását. Az automatikus algoritmus meghatározza a minimális szomszédos elemszámot, amellyel még pontos adatokat lehet számítani, az elemszám elemenként változik. Az ideális módszer szolgáltatja a

legpontosabb adatokat, ehhez minden egyes elem geometriai befolyás számítása során figyelembe veszi az összes többi elemet a modellben. Ezt a módszert bizonyos összetett modelleknél nem lehet alkalmazni, mert összetett esetben akkora a számítási igénye, hogy jelenleg még nem léteznek megfelelő eszközök ennek biztosításához. A harmadik algoritmus a parametrikus, amelynél meg kell adni egy értéket, amelyet felhasználva számítja a program az elemek befolyását. Ez az érték képezi a vizsgálati határvonalat, tehát az értéknél nagyobb távolságra eső elemeket nem veszi már figyelembe a számításoknál. Miután meghatározta a felületi hőmérséklet-eloszlást, a határfeltétel integráljait felhasználva meghatározza a szerszám belső térfogatának hőmérsékleteit [13-22].

A véges elemes számításokhoz a program a fröccsöntött termék által leadott hőáramot használja határfeltételként, amely így a szerszám teljes vastagságában, minden csomópontra ki tudja számítani a hőmérsékleteket. A számításokhoz két megoldó algoritmus használható, az első csak a hővezetésből származó hőt veszi figyelembe, az előzőekben leírt eljáráshoz hasonló eredményt ad, csak a számítási időszükséglete kisebb. A másik algoritmus iterációs eljárás segítségével számítja ki az eredményeket, először a termék által átadott hőt számolja ki, ezt felhasználva pedig meghatározza a szerszám hőmérséklet-eloszlását. Ezzel a megoldással lehetőségünk van az ömledék és a szerszám fala között fellépő nyírás által bevitt hőmennyiség figyelembe vételére [13-22].

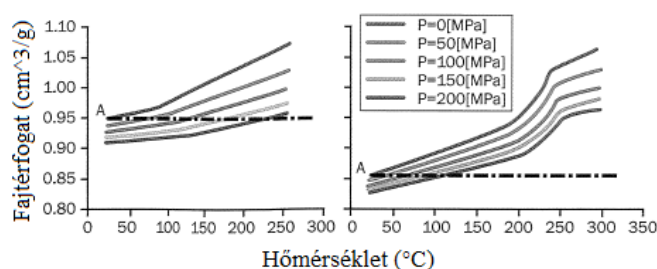
Az Autodesk által forgalmazott Simulation Moldflow Insight nevű programmal lehetőség nyílik időben állandósult és változó hűtési szimuláció futtatására. Az időben állandósult hűtési szimuláció azt jelenti, hogy a fröccsöntési ciklus elérte már az állandósult állapotot, amíg az időben változó szimulációkkal a gyártásindítástól az egyensúlyi állapotig, illetve a ciklus függvényében vizsgálhatjuk a hőmérséklet-eloszlásokat. Időben állandósult hűtési szimuláció futtatásánál lehetőség nyílik középsík, felületi és 3D-s hálózás használatára. Az eredményekben a program nem a ciklus függvényében ábrázolja a hőmérsékleti értékeket, hanem ezek átlagát képezi, így minden csomóponthoz egy hőmérsékleti eredmény tartozik. Az időben változó hűtéssel kétfajta szimulációt futtathatunk, az egyik szimuláció segítségével a fröccsöntési ciklus függvényében vizsgálhatjuk a hőmérséklet alakulását. A fröccsöntési ciklus folyamán a szerszám a befroccsöntési fázis alatt éri el a ciklus során a legnagyobb hőmérsékletet, ezután folyamatosan hűl, egészen a következő ciklus befroccsöntési szakaszáig, a folyamat leírása időben változó hűtéssel lehetséges, amely a szerszám hőmérséklet-változását számítja az idő függvényében. A számításokat csak végeelem analízissel lehet végrehajtani, továbbá a szimulációhoz csak felületi és 3D hálózás

használható. A másik szimulációval a gyártásindítástól a hőmérsékletek állandósulásáig terjedő időszakot vizsgálhatjuk [13, 14, 22].

A hűtőcsatornák hálózása történhet két csomópontos beam elemmel és négy csomópontos tetraéderes elemekkel. Az előző fejezetben említett egyszerűsítések és feltételezések miatt a beam elemek nem szolgáltatnak megfelelően pontos eredményeket. Továbbá a formakövető hűtések általában bonyolult geometriával is rendelkeznek, amit a beam elemek nem képesek lekövetni, illetve a hűtőkörben az áramlási viszonyok az esetleges elágazások és keresztmetszet-változások miatt összetett, ezért a hűtőkörök vizsgálatára csak a tetraéder elemes szimuláció alkalmas [13, 14, 22].

2.2.5. Zsugorodás és vetemedés

A termék zsugorodását a hűtés során végbemenő fajtérfogat-változás idézi elő, a zsugorodás a termék teljes térfogatában végbemegy, ezért nevezik térfogati zsugorodásnak. A térfogati zsugorodást befolyásolja a nyomás, hőmérséklet, kristályosság, feszültség relaxáció, gát elhelyezés és orientáció. A nyomás, hőmérséklet és a kristályos hányad hatása a 13. ábrán látható a nyomás-fajtérfogat-hőmérséklet diagramokon. Az ábra bal oldala egy amorf, jobb oldala pedig egy részben kristályos anyag pvT diagramját mutatja. Látható, hogy a részben kristályos alapanyag fajtérfogat-változása lényegesen nagyobb, mivel a kristályos rész olvadása nagyobb térfogatváltozással jár. Továbbá látható, hogy a nyomás növelése csökkenti a fajtérfogat-változást, viszont a hőmérséklet ellentétes hatású, tehát a növelése hatására nő a fajtérfogat-változás. A szaggatott vonal jelöli azt a nyomást, ami ahhoz lenne szükséges, hogy ne lépjen fel zsugorodás a termék hűtése során. Ez a nyomásérték már a 10000 MPa tartományba esik [14].



13. ábra Az amorf és a részben kristályos polimerek pvT diagramjai [14]

A hűtés során feszültségek keletkeznek a termékben, mert a szerszám korlátozza a zsugorodását. A feszültségek oldódása függ az anyag relaxációs karakterisztikájától és a hőmérséklettől. A hőmérsékletemelés hatására a feszültségek nagyobb hányada oldódik. Az orientáció hatása erősített és erősítetlen anyagoknál különböző. Az erősítetlen anyagok

zsugorodása az ömledék terjedési irányával párhuzamos irányban nagyobb, mint a merőleges irányban. Az erősített anyagok esetén fordított a helyzet, a zsugorodás az ömledék terjedési irányára merőlegesen nagyobb, mint a párhuzamos irányban. Elmondható továbbá, hogy a gáttól távolabb eső területeken kisebb maximális nyomás érhető el a fröccsöntési ciklus folyamán, emiatt ezek a területek zsugorodása nagyobb mértékű lesz, mint a gáthoz közelebb fekvő területek zsugorodása [14].

A zsugorodás önmagában nem okoz vetemedést, ha zsugorodás a termék minden pontján azonos, akkor a termék nem vetemedik meg, csak a térfogata a zsugorodással megegyező mértékkel csökken. A zsugorodás akkor vezethet vetemedéshez vagy maradó belső feszültséghez, ha a termék részei különböző zsugorodást szenvednek el. Egyenetlen zsugorodáshoz vezethet az orientációs hatás, gát helyzetéből adódó kitöltődés különbség és az egyenetlen hűtés. Az egyenetlen hűtés során a hűtőkörök a termék egyik oldalától több hőt vonnak el, mint a másiktól, emiatt a termék vetemedik vagy a belső feszültségek megmaradnak a termékben. A termék kidobási hőmérséklete határozza meg, hogy a belső feszültségek feloldódnak-e, ha magasabb hőmérsékleten történik a kidobás, akkor a termék vetemedik, ha kisebb a kidobási hőmérséklet, akkor pedig a feszültségek nem képesek feloldódni. Az első esetben hibás termék keletkezik, a második esetben a terméken nem látszik hiba, viszont a maradó belső feszültségek gyengítik a fröccsöntött terméket és ha a terméket újból felmelegítik, akkor oldódnak a feszültségek és elvetemedik [14].

2.3. Fröccsöntőszerszám-alapanyagok

Különböző ötvöztetésű és hőkezelésű alapanyagokat használnak a fröccsöntő szerszámok gyártására, mindig a követelményeknek megfelelő anyagot kell kiválasztani. Más típusú alapanyagot igényelnek a formalapok, kidobók, vezető elemek, stb. és a különböző speciális fröccsöntési eljárások is. A műanyag-alakító szerszámanyagokkal szemben támasztott követelmények összetettek, az alapanyagoknak megeresztésállónak, magas hőmérsékleten is kopásállónak, szívósnak, mérettartónak kell lennie, továbbá ellen kell állnia az ömledékkel kapcsolatos reakciókkal szemben is. A követelmények teljesülését kisebb széntartalom mellett Si, Mn, Mo, Ni, W, V ötvözők biztosítják. Az alapanyagok a különböző ötvözők hatására más mechanikai és fizikai tulajdonságokkal rendelkeznek, a szerszám-alapanyagokat lágyított állapotban szállítják a felhasználó részére. A megmunkálás utáni hőkezelés során éri el az anyag a végleges tulajdonságait. A végső hőkezelés a nemesítés, amely során először az anyagot magas hőmérsékletre hevítik, majd levegőben, olajban vagy meleg fürdőben lehűtik.

Az edzés után a szövetszerkezet martenzites, amely nagyon kemény és rideg. Ezután következik a megeresztés, amely folyamán kisebb hőmérsékleten a martenzit feszültsége oldódik és nő a szilárdság és a szívósság. Az első megeresztést követheti egy második megeresztés. A formalapok gyártására legelterjedtebb alapanyag az 1.2311 acél, vagy más néven P20-as acél, amely Cr, Mo, Mn ötvöztetésű előnemesített acél, amelyet a következő tulajdonságok jellemeznek [15- 17]:

- homogén szövetszerkezetű,
- jól forgácsolható,
- jó átedződése által egyenletes szilárdságú a teljes keresztmetszet mentén,
- nagy szívósságú,
- nitridálható, betétedzhető, lánggal és indukciósan edzhető, keménykrómozható, bevonatolható,
- jól polírozható, szikraforgácsolható, fotomaratható.

A speciális fröccsöntési eljárásokhoz léteznek nagy hőtűrésű, korrózióálló, stb. anyagok, ezek viszont kisebb szilárdságúak és a megmunkálásuk is nehezebb. A hűtési idő csökkentésére alternatív megoldást nyújtanak a nagy hővezető képességű anyagok, ilyen anyagokat gyárt az Ampco Metal. Több nagymértékben ötvöztetett réz alapanyagot árulnak, kapható jobb hővezető képességű, de rosszabb mechanikai tulajdonságokkal rendelkező anyag és létezik az acél mechanikai tulajdonságait megközelítő, de rosszabb hővezetésű réz alapanyag is [18- 20].

További megoldást nyújthat a hűtési idő csökkentésére, ha DMLS technológiával készült szerszámbetéteket kerülnek felhasználásra. A DMLS technológiához általánosságban felhasznált anyag a MS1 acélpor. A finiselés és hőkezelés után a P20-as acélhoz hasonló mechanikai és fizikai tulajdonságokkal rendelkezik a MS1 acélporból gyártott szerszámbetét. A felsorolt alapanyagok fontosabb mechanikai és fizikai tulajdonságait a 2. táblázat mutatja [17- 21]. Látható, hogy a legjobb hővezetési tulajdonsága a rézötvözeteknek van, viszont kis kopásállóságuk és magas árak miatt a tömeggyártásban nem alkalmazhatóak nyereségesen. A MS1 szerszámanyag kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, amelyek meghaladják a P20-as szerszámacél tulajdonságait. Az alapanyag ára viszont többszöröse a hagyományos szerszámacél árának.

	1.2311	Ampcoloy 83	Ampcoloy 88	Ampcoloy 940	MS1
Sűrűség [kg/m ³]	7800	8260	8750	8710	8100
Szakító szilárdság [MPa]	1020	1310	890	544	1950
Folyáshatár [MPa]	900	1000	680	475	1900
Rugalmassági modulus [GPa]	250	131	130	131	180
Hővezetési tényező [W/mK]	29	106	230	208	20
Fajhő [J/kgK]	460	420	420	380	450

2. táblázat A bemutatott szerszámalapanyagok fontosabb tulajdonságai [17- 21]

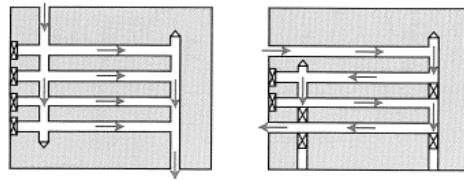
2.4. Hagyományos hűtési rendszerek

A következő fejezetben bemutatom a hagyományos hűtőrendszerek két alapvető fajtáját és a hagyományos gyártási eljárásokkal előállítható egyedi hűtési megoldásokat.

2.4.1. Soros és párhuzamos hűtési rendszerek

A hűtési rendszer több alkotóelemből áll, amelyek egységes működése teszi lehetővé a fröccsöntő szerszám temperálását. A hőmérsékletszabályozás után egy szivattyú segítségével történik a hűtőfolyadék keringtetése, amelyet általában több hűtőkörre bontanak. Miután a folyadék hőt vont el az ömledéktől, a szerszámból kilépve egyesítik és újra a hőcserélőbe vezetik a folyadékáramot [14].

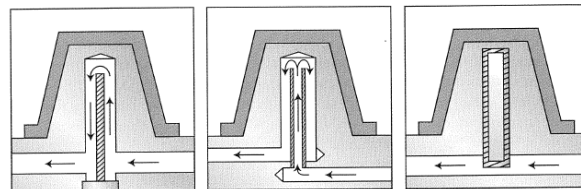
A hagyományos hűtési rendszereket fűrási eljárással készítik, ennek megfelelően csak egyenes szakaszok összegéből állhat. A hűtőfolyadék áramlása szerint a hűtési rendszerek két alapvető fajtára oszthatóak, ezeket a 14. ábra szemlélteti. A soros rendszereknél a folyadék belépési és kilépési pontja közötti rész leírható egy zárt vonallal, a hűtőkör nem tartalmaz elágazásokat. Ez a kialakítás elterjedtebb, előnye a párhuzamos rendszerekkel szemben, hogy a térfogatáram állandó a hűtőkör teljes hossza során, továbbá ha a hűtőcsatornák átmérője állandó, akkor a hűtőkör teljes hosszán az áramlás a turbulens tartományban tartható. További előnye, hogy a hűtőcsatorna esetleges eltömődés esetén a hiba forrása könnyen meghatározható, hátránya viszont, hogy a folyadék hőmérséklete az úthossz során folyamatosan nő. A párhuzamos kialakításnál a bejövő ág térfogatáramát elágazások segítségével szétosztják, hátránya, hogy a hűtőcsatornák eltérő áramlási ellenállása egyenetlen áramlást okoz, emiatt a hűtés egyenetlen [14].



14. ábra A soros és a párhuzamos hűtőrendszer szemléltetése [14]

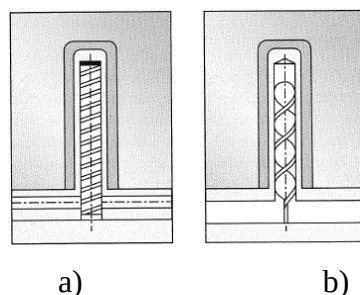
2.4.2. Alternatív hűtési megoldások

Az alternatív hűtési megoldásokkal olyan területektől is elvonható a hő, amelyektől a hagyományos hűtőcsatornákkal lehetetlen lenne. Ilyen megoldásokat igényelnek a különleges kialakítású magok, amelyeknél a hűtőfolyadékot kényszeríteni kell valamilyen módszerrel arra, hogy az adott területre folyjék. Ezeket a különböző megoldásokat szemlélteti a 15. ábra [14].



15. ábra A különböző hűtőujj kialakítások [14]

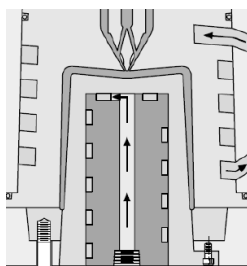
Az első megoldást az angol szakirodalom baffle-nak nevezi, látható, hogy ennél a megoldásnál a vízszintesen fűrt hűtőcsatornára merőleges furat található a mag belsejében. Az áramlás vonalába állított terelőlemez segítségével kényszerítik a folyadékot a függőleges irányú mozgásra, a lemez másik oldalán a folyadék visszatérhet az eredeti folyási irányába. Fontos tervezési szempont, hogy a hűtőujj furatátmérője nagyobb legyen, mint a hűtőcsatorna átmérője, mert csak így biztosítható, hogy a teljes folyadék a kívánt irányba áramoljon. A homogén hőelvonás érdekében a sárgarézből gyártott terelőlemezek csavart kialakításúak, ilyen csavarfelületű és a kétbekezdésű spirális terelőlemezt mutat a 16. ábra [14].



16. ábra (a) csavarvonalú és (b) kétbekezdésű spirál terelőlemez [14]

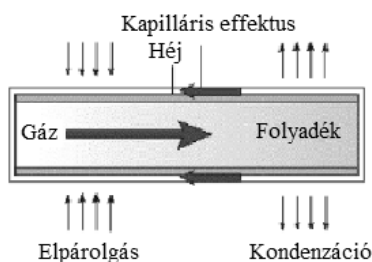
A második megoldás angol neve a bubbler, a működése hasonló az előbb ismertetett kialakításhoz, ennél a megoldásnál viszont egy cső inzert segítségével vezetik fel a folyadékot

a mag tetejéig, innen pedig egy nagyobb átmérőjű furat segítségével kerül elvezetésre a hűtőfolyadék. A nagy magok, amelyek átmérője nagyobb 44 mm-nél, olyan hűtési módszert igényelnek, ahol a hűtőfolyadékot egy furaton juttatják fel és az elvezetés egy kerületén spirális horonnyal rendelkező inzertről történik, a megoldás a 17. ábrán látható. Ez a megoldás nem csak magok hűtésére használható, hanem olyan lapos szerszámrészekhez is, amelyek fűrt vagy mart hűtőkörökkel nem szerelhetők. Fontos továbbá megemlíteni, hogy mind a két hűtőújj megoldásnál jelentős nyomáscsökkenéssel kell számolni a megnövekedett áramlási ellenállás miatt [13, 14].



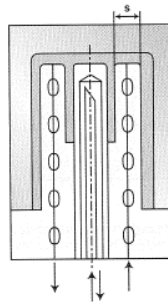
17. ábra Spirális inzertes megoldás [13]

A magok hűtésére egy további lehetőség az angol szakirodalom által thermal pin-nek nevezett megoldás, amely egy zárt, hengeres test, amelyben nagy hővezető képességű folyadék található, a szerkezet a 18. ábrán látható. A folyadék a hő hatására a henger maghoz közelebbi részén elpárolog, a kapilláris effektus hatására a folyadék és a gáz helyet cserél, a gáz a hűtőfolyadékkal érintkező részhez érve kondenzálódik és átadja a hőt a folyadéknak. A thermal pin helyett használható réz inzert is, ha a mag átmérője nagyobb mint 5 mm, viszont ennek a termikus hatásfoka csak a tizede. A 3 mm-nél kisebb átmérőjű magok hűtése csak levegővel megoldható, így viszont nem lehet a szerszámhőmérsékletet pontosan beállítani, ezért ezek alkalmazása nem ajánlott [13, 14].



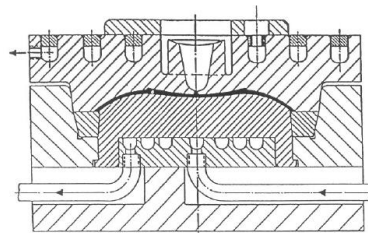
18. ábra Thermal pin [13]

A 19. ábrán látható összetett geometriájú termékek esetén a hűtés két részből tevődik össze, szükséges egy hűtőújj, a bordázott rész hűtéséhez. A termék további részét kettős spirális hűtőfuratok hűtik, amelyek két inzertből állnak. A spirális rész vastagságának minimum $s = 3$ mm-nek kell lennie [14].



19. ábra Kettős spirál hűtőfurat [14]

A lapos tárgyak hűtésére is létezik alternatív megoldás, ennél a kialakításnál a hűtőfuratok nem fúrtak, hanem ujjmaróval készítették, így a szerszámbetét két részből áll, egy lehetséges megoldást mutat a 20. ábra [13].



20. ábra Lapos tárgyak alternatív hűtése [13]

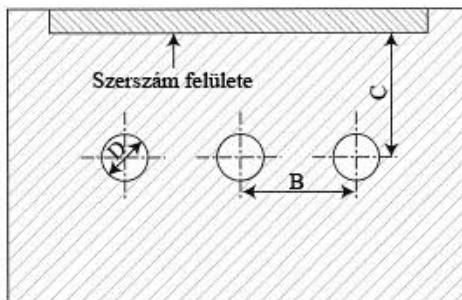
2.4.3. A hagyományos hűtési rendszerek tervezési szempontjai

A hagyományos hűtőkörök tervezéséhez több ajánlás, tervezési segédlet létezik, a következőkben ezeket a tervezési szempontokat mutatom be. A hűtőfuratok lehetőleg legyenek szabvány méretűek, mert így szabványos szerszámokkal és tűrések használhatóak. Fontos továbbá a csatlakozók gyors és precíz rögzítése, ezért szabványos felhasználása ajánlott. A falvastagság és a térfogat alapján a következők meghatározhatóak:

- hűtőcsatornák átmérője és elhelyezkedése,
- hűtési rendszer típusa,
- csatornák elrendezése és csatlakozása,
- hűtőkör hossza,
- hűtő folyadék áramlási sebessége és az átadott hőmennyiség.

A hűtőcsatornák elhelyezkedését és átmérőjét a termék falvastagsága befolyásolja. Ha a szerszám felületétől túl távol helyezkednek el a hűtőkörök, akkor megnő a szerszámfelület hőmérséklete és hűtési idő. A szerszámfelülethez közel elhelyezett csatornák hatására a felület hőmérséklet-eloszlása nem homogén, ez vetemedéshez vezethet. Ha a csatornák egymástól távol vannak elhelyezve, akkor a felület hőmérséklet-eloszlása az előzőekhez hasonlóan

inhomogén. A hűtőkörök átmérőjére és elhelyezkedésére vonatkozó tervezési ajánlásokat a 21. ábra és a 3. táblázat tartalmazza [13, 14].



21. ábra Magyarázó ábra a tervezési szempontokhoz [13]

Falvastagság [mm]	Átmérő (D) [mm]	Távolság a formaüregtől (C) [-]	Hűtőkörök közötti távolság (B) [-]
0-2	4-8	2,5D	max. 3D
2-4	8-12	2,5D	max. 3D
4-6	12-16	2,5D	max. 3D

3. táblázat A hűtőkörök tervezési ajánlásai [14]

A vetemedés elkerülése érdekében fontos, hogy a szerszámfelület hőmérséklet-eloszlása homogén legyen, az amorf alapanyagból készült termékek esetén a hőmérsékletkülönbség ajánlott határa az 5°C a részben kristályos anyagoknál ez az érték 10°C. A megfelelő felületi hőmérséklet-eloszlás eléréséhez a hűtőfolyadék belépési és kilépési pontok között mért hőmérsékletkülönbség maximumának ajánlott értéke 5°C, precíziós termékek esetén pedig 3°C [14].

A lamináris áramlásnál a hőmennyiség hővezetéssel terjed rétegről rétegre, az elvont hőmennyiség turbulens áramlás során lényegesen megnő, mert a hő hőszállítás és hővezetés formájában is terjed. Az áramlás típusának meghatározására szolgál a Reynolds szám, amely a következő képlettel írható le [23]:

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta} = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (3)$$

ahol v az átlagsebesség a d átmérőjű csőben, d a cső átmérője, ρ a közeg sűrűsége, η a közeg dinamikai viszkozitása, ν a közeg kinematikai viszkozitása, amely a $\nu = \eta / \rho$ egyenlettel helyettesíthető. A Reynolds szám növelhető a folyadék áramlási sebességének növelésével, további lehetőséget nyújt az áramlási keresztmetszet változtatása. Az áramlási sebesség növelésével viszont csökken a hőátadás, emiatt a sebességet nem érdemes növelni, ha a Re szám meghaladta a 10000 értéket [14].

2.5. Formakövető hűtések

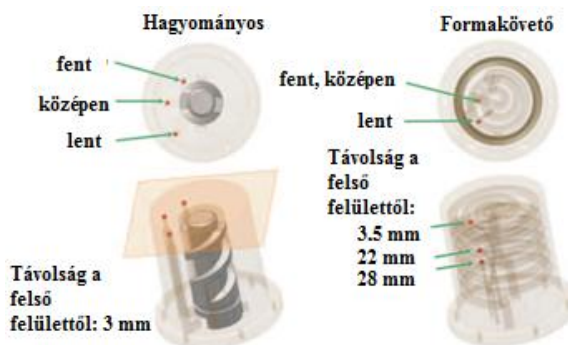
A következő fejezetben bemutatom a kontúrkövető hűtések és a kialakítási szempontjait, továbbá összehasonlítom a hagyományos megmunkálással készített hűtésekkel.

2.5.1. A formakövető hűtések bemutatása és tervezési szempontjai

A formakövető hűtési rendszerek olyan alternatív hűtési rendszerek, amelyek követik a formaüreg geometriáját, így a hűtőkör és a termék fala közötti távolság állandó. A hagyományos hűtőköröket fűrésszel alakítják ki, emiatt csak egyenes részekből állhat, így egy összetett geometriájú termék esetén kialakulhatnak olyan részek a darabon, ahol nem tud a hűtés megfelelő mennyiségű hőt elvonni és emiatt a termék vetemedik. A kontúrkövető hűtések ezzel ellentétben követik a termék geometriáját, így minden részről ugyanannyi hőt képes elvonni, ez lényegesen kisebb vetemedéshez és belső feszültséghez vezet. A fröccsöntési ciklus legidőigényesebb szakasza a hűtés, a formakövető hűtések gyorsabban vonják el a hőt a polimertől, így a hűtési idő több mint 25%-kal csökkenthető. További előnyt jelent, hogy a szerszámok ciklikus hőterhelése kisebb és egyenletesebb. A kialakítás előnyei a komplex geometriájú, nagy térfogatú vagy magas hőmérsékleten fröccsöntött darabok esetén érvényesülnek igazán, mert ezek igényelnek nagyobb és egyenletesebb hőelvonást. Az összetett geometria miatt csak anyaghozzáadás elvén működő technológiákkal gyárthatóak ezek az újszerű hűtések, viszont a tervezés szempontjai megegyeznek a hagyományos kialakítású hűtőkörök szempontjaival.

2.5.2. A kontúrkövető és hagyományos hűtések összehasonlítása

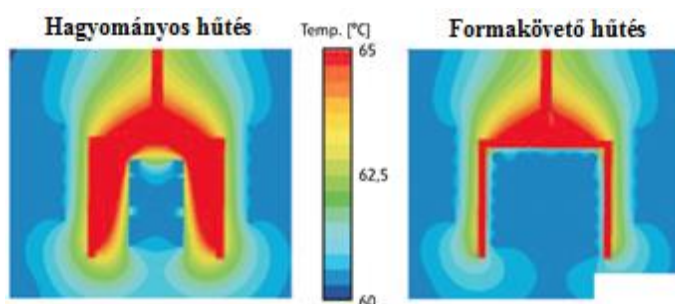
A kontúrkövető hűtések több szempont alapján hasonlíthatjuk össze a hagyományos megoldásokkal, ebben a fejezetben bemutatom az eddigi vizsgálatok szempontjait és eredményeit. Michaeli és Schönfeld [24] a hagyományos spirális hűtéssel ellátott és a kontúrkövető hűtéssel rendelkező szerszámbetéteket hasonlították össze, a munkájuk során fröccsöntési szimulációkat és fröccsöntési vizsgálatokat is végrehajtottak. A tesztek során egy négyszög és egy henger alakú formaüreg hűtési viszonyait vizsgálták. Mindkét formaüreghez két-két cserélhető szerszámbetét készült, az egyik hagyományos spirális hűtőujjal, a másik kontúrkövető hűtőcsatornákkal gyártott. A betétek különböző részein termoelemek találhatók, így a fröccsöntési ciklus folyamán vizsgálható a hőmérséklet változása. A betétek alakja és a termoelemek elhelyezkedése a 22. ábrán látható.



22. ábra Bal oldalt a hagyományos és jobb oldalon a formakövető hűtéssel ellátott [24]

Az álló- és a mozgóoldali formaadó lapokban a homogén hőmérséklet-eloszlás érdekében további hűtőfuratok találhatók. Először fröccsöntési szimulációt hajtottak végre, így meghatározták a hőmérséklet lefutást a szerszámban. Ehhez a szerszámot, a formaüreget és a hűtőkört képezték le és hálózta be. A szimulációkhoz felhasznált alapanyag PP, a fröccsöntési hőmérséklet 220°C , a szerszámhőmérséklet 60°C , a fröccsöntési ciklus 22,5 s.

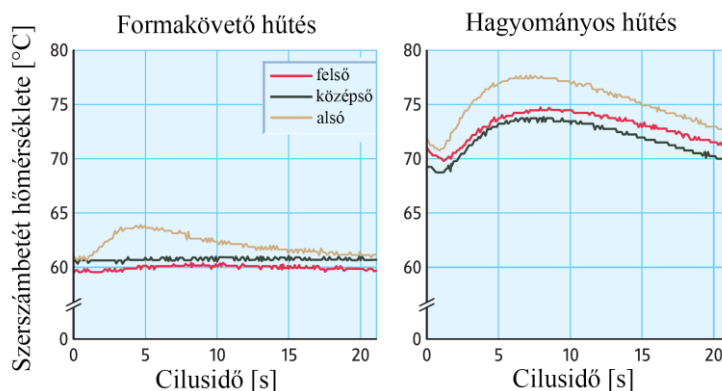
A 23. ábra a kidobás pillanatában ábrázolja a formaüregeket, látható, hogy a kontúrkövető hűtéssel ellátott betét intenzívebben hűtött és a hőt a hűtés a sarkokból is elvezeti. Az eredmények további vizsgálata során megállapítható, hogy mind a két formaüregben homogén a felületi hőmérséklet eloszlás a kidobási hőmérséklet elérésekor és a hőmérséklet eltérések a vártnál kisebbek. A maghőmérséklet minősége és hőmérséklet lefutásra gyakorolt hatásának további vizsgálatára fröccsöntéseket végeztek a szimuláció során használt technológia paraméterek segítségével. A felületi hőmérséklet eloszlást hőkamera, a hőmérséklet lefutást a termoelemek felhasználásával vizsgálták. A hőkamerás felvételek, amely a 23. ábrán láthatóak, hasonló eredményt mutatnak, mint a szimuláció, a hőmérsékletkülönbség kisebb, mint 3°C .



23. ábra Bal oldalon látható a hagyományos megoldással, jobb oldalon pedig a formakövető hűtéssel mért hőmérséklet-eloszlás a kidobás pillanatában [24]

A termoelemek által mért eredmények (24. ábra) értékelésénél válik láthatóvá a kontúrkövető hűtések előnye. A mérések folyamán az első 20 ciklus hőmérséklet-lefutását figyelték, ezek alapján elmondható, hogy a mérések végére mind a két szerszámbetétben a

hőmérsékletek állandósultak. A kontúrkövető hűtéssel ellátott betét hőmérséklete kb. 10°C kisebb, továbbá látható, hogy amíg a formakövető hűtéssel ellátott betétben a hőmérsékleti értékek a bemenő hűtővíz hőmérsékleti értékéhez közel alakultak, addig a hagyományos hűtéssel rendelkező betétben a hőmérsékletek a befroccsöntési fázisban hirtelen emelkedtek, utána lassan csökkenni kezdtek. Ezek alapján megállapították, hogy a kontúrkövető hűtési rendszerek a szerszám hideg vizes temperálásánál és az összetett geometriájú termékeknel kínál jelentős előnyöket a hagyományos eljárásokkal gyártott rendszerekhez képest.



24. ábra A hagyományos és a kontúrkövető rendszerrel rendelkező betétek hőmérséklet változása [24]

Wang és társai [25] az általuk fejlesztett algoritmus segítségével előállított kontúrkövető hűtések vizsgálták szimulációs eljárással. A vizsgálatok során összetett geometriájú darabokon végeztek szimulációkat, az első ilyen darab egy tűzoltó sisak volt. A szimuláció során felhasznált alapanyag ABS, a szerszám anyaga P20-as acél. A P20-as acél fajhője 460 J/(kgK), a sűrűsége 7800 kg/m³. Továbbá a hűtéshez kiválasztott anyag víz, amely hőmérséklete 25°C, a Reynolds szám pedig $Re = 10000$. A szimulációk során használt hűtőkörök átmérője $D = 10$ mm, a szerszámfelületről vett távolsága $l = 2,7$ mm és a hűtőcsatornák közötti távolság $W = 29,8$ mm.

A vizsgálatokhoz kitöltési, hűtési és további kitöltési és utónyomási szimulációkat hajtottak végre. Három főbb értéket vizsgáltak, a hűtési időt, a darab hőmérséklet-eloszlását és a zsugorodását. A hőmérséklet-eloszlást a szerszámfelületen számították, így meghatározhatóak a forró vagy hideg pontok és a hőmérséklet-változás. A fröccsöntött darab minőségi ellenőrzésére a zsugorodásvizsgálat szolgál, mert a zsugorodás segítségével következtethető a vetemedés, beszívódási helyek és légzárványok.

Az eredmények azt mutatták, hogy a formakövető hűtéssel hűtött termék hűtési időszükséglete több mint 26%-kal csökkent, továbbá az ömledék felületén mért átlagos hőmérséklet-eloszlás egyenletesebb, mint a hagyományos hűtéssel ellátott szerszám esetén. A kontúrkövető hűtést alkalmazva a hőmérsékletek a fröccsöntési ciklus alatt a 26,4 és

42,7°C-os tartományba estek, amíg a hagyományosan hűtött termék hőmérséklete elérte a 82°C-ot is, így körülbelül 47%-kal csökkent a maximális hőmérséklet. A zsugorodási eredmények ellentmondanak a várható eredménnyel, mert a teljes ciklus alatt nagyobb zsugorodás lépett fel a formakövető hűtés alkalmazásánál. Ez azzal magyarázható, hogy az utónyomási fázis kezdetén nagy zsugorodás lép fel, ezután a zsugorodás gyorsan kisebb értékhez tart és egyenletesebbé válik, a 2,1. másodpercben a zsugorodás még 10,3%, viszont a 2,7-ben már csak 7,1%, ami folyamatosan tovább csökken. További vizsgálatokat igényelnek a hűtőfolyadék áramlási tulajdonságai, a hűtőkör összetett alakjából adódóan várhatóan az áramlás sebessége és Reynolds száma változni fog a hűtőkör mentén. Ennek érdekében Wang és társai megvizsgálták a Reynolds szám és az áramlási sebesség eloszlását a hűtőkör mentén. Az eredmények szerint a bemenő kör tízezres Reynolds száma a második elágazás után 110,9-es értékre csökken, amely már a lamináris áramlás tartományába esik, így a hőátadási tényező lényegesen kisebb. Az áramlási sebességek a Reynolds számhoz hasonlóan alakulnak. Annak ellenére, hogy formakövető hűtés használatával a hőátadás lényegesen lecsökken, még így is több hőt képes elvezetni, mint a hagyományos technológiákkal elkészített hűtőkörök. Meg kell jegyezni viszont, hogy az áramlási vizsgálatok során a szimulációs programok egyszerűsített számítási eljárását használták, amivel a pontos értékek nem határozhatóak meg.

A vizsgálat második kísérleti modellje egy telefon előlap. A szimulációhoz felhasznált alapanyag PP, a szerszám anyaga megegyezik az előző vizsgálatnál felhasználttal. A hűtőkör átmérője $D=8$ mm, a csatornák szerszámfelülettől mért távolsága $l=11$ mm, a csatornák egymástól mért távolsága pedig $W=22,2$ mm. Az eredmények szerint a hűtési idő az előző példához hasonlóan csökkent, a szerszámfelület hőmérséklete a darab mentén közel egyenletes, körülbelül 36°C.

J.Meckley és R. Edwards [26] a munkájukban a formakövető és hagyományos hűtések közötti különbségeket vizsgálta fröccsöntési teszttel és szimulációval, ehhez amorf és részben kristályos polimert használtak fel három különböző szerszámkiakításban. A szerszámkiakításokhoz két alapanyagot használtak, a P20-as és az S4-es acélt. A P20-as acél hővezetési tényezője nagyobb, 29 W/(mK), az S4-es anyagé 22,6 W/(mK). A hővezetési tulajdonságok összehasonlításához egy-egy hagyományos hűtőkörrel ellátott szerszámot készítettek S4-ből és P20-ból. A harmadik kialakítás formakövető hűtéssel rendelkezik és S4-es acélból készült. A P20-as acél egy előedzett, közönséges fröccsszerszám anyag, amely Cr-Mo ötvöztetett acél 0,3-0,4% karbon tartalommal. Az S4-es acél egy kompozit anyag, 60%

rozsdamentes acél és 40% bronz tartalommal, a hővezetési tényezője kisebb a P20-as acélénál, csak 22,6 W/mK.

A szerszámokat az MIT által kifejlesztett ProMetal nyomtatási eljárással gyártották. Ez egy olyan prototípusgyártási eljárás, amelynél a tintasugaras nyomtatóban használt nyomtatófejhez hasonló szerkezettel folyékony kötőanyagot hordanak fel a fémorra. Miután a rétegekből felépült szerszám elkészült utólagos hőkezelés során részlegesen színterezik. A részlegesen színterezett darab zsugorodása kisebb, mint a teljesen színterezetté, viszont a szerkezete porózus, ezért a hőkezelés után bronzsal itatták át, amely feltölti a hézagokat. Végül mind a három szerszámbetét külső felületét matta munkálták, így az infravörös kamerás hőmérsékletméréseknél a visszavert fény nem befolyásolja a mérés pontosságát.

A két felhasznált polimer alapanyag a HDPE és a PC. A fröccsöntési folyamatot a P20-as hagyományos hűtéses szerszámra állították be, a HDPE anyaghoz a fröccsöntési hőmérséklet 176°C, a szerszám hőmérséklete 32°C, a PC anyaghoz pedig 304°C és 54°C-ot alkalmaztak. A hőmérsékleti egyensúly elérése érdekében a vizsgálatok előtt 50 percen át fröccsöntöttek. Az infravörös hőmérő segítségével mérték a szerszám felek és a fröccsöntött darabok hőmérsékletét. Három ciklust mértek minden darabból, először a formaüreget, azután a magot, a végén pedig a fröccsöntött darab külső és belső felületét. Ezeknél a méréseknél a hűtési idő 18 másodperc volt, ezután a hűtési időt a HDPE-nél 4, a PC-nél pedig 10 másodpercre állították és megismételték a méréseket. Az összehasonlítás érdekében szimulációkat végeztek, amelyhez a Moldflow Plastic Insight 6.1-es verzióját használták, továbbá a Moldflowból kapott nyomásokból az ANSYS segítségével meghatározták a formaüregben a nyomás miatt fellépő legnagyobb feszültséget.

A HDPE alapanyaghoz tartozó eredmények szerint a formakövető hűtéssel ellátott szerszám hőmérséklete a legkisebb, a hagyományos megoldások közül pedig a jobb hővezetéssel rendelkező P20-as szerszám kisebb hőmérsékletű. A szerszám felületi hőmérséklet-eloszlását vizsgálva látható, hogy a hűtőkörök környezetében kisebb a hőmérséklet, a hagyományos megmunkálással készült szerszámnál a formaüreg oldalán a legnagyobb a hőmérséklet, az osztósíkhöz közeledve pedig folyamatosan csökken. A formakövető hűtésnél ezzel szemben az osztósíkhöz közeledve a hőmérséklet nő. A hagyományos kialakításoknál három melegebb pont látható a felvételeken, a formakövető hűtésnél viszont csak egy ilyen terület fedezhető fel, továbbá a hőmérséklet-eloszlás is egyenletesebb ennél a kialakításnál. A hőmérséklet a darab felső felületén nagyobb, az oldalsó felületeken a hőmérséklet az osztósík fele haladva csökken, a hagyományos és a formakövető hűtéssel fröccsöntött daraboknál is. A mért és a szimulált eredményeket összehasonlítva

látható, hogy a Moldflow által a szerszámokra számított értékek nagyobbak, a hőmérsékletváltozások trendjeit minden esetben jól meghatározta a program. A fröccsöntött darab hőmérsékleteit a szimuláció a legtöbb esetben nagyobbra számította, mint a mért értékek. A PC-tal végzett fröccsöntések az előzőekben leírtakhoz hasonlóak, a formakövető hűtés a legkisebb hőmérsékletű, a hőmérséklet-eloszlás és a hőmérsékletváltozási tendenciák is hasonlóan alakultak. Különbség viszont, hogy a Moldflow által számított eredmények nagyobb mértékben eltérnek a mért értékektől. A 18 másodpercnyi hűtési idővel fröccsöntött darabok esetében a formakövető hűtések előnye kisebb mértékben érvényesült, mert a hőmérsékletek csak 1-2°C-kal voltak kisebbek és a hőmérséklet-eloszlás is egyenletes volt mind a három szerszám esetén. A 4 másodpercnyi hűtési idővel végrehajtott eredmények viszont már nagyobb különbségeket mutatnak, a formakövető hűtés előnyei jobban érvényesülnek. A formaüregben kialakuló maximális feszültség az ANSYS szerint 19,73 MPa, a szerszámmaghoz ennél nagyobb 57,21 MPa érték tartozik.

3. Felhasznált gépek berendezések és anyagok

A következő fejezetben bemutatom a dolgozatomban felhasznált berendezéseket és alapanyagokat.

3.1. A vizsgálatokhoz felhasznált gépek

A vizsgálatokhoz felhasznált HP számítógépek core i5-ös processzorral és 8 GB RAM-mal rendelkeztek. Az alkalmazott szimulációs szoftver az Autodesk Moldflow Plastics Insight 2013-as verziója volt.

3.2. A vizsgálatokhoz felhasznált alapanyagok

A mérések során a BASF által gyártott Terluran GP35 nevű ABS alapanyagot használtam fel. Az alapanyag legfontosabb tulajdonságait a 4. táblázat tartalmazza [27].

Tulajdonság	Mennyiség	Mértékegység
Fröccsöntési hőmérséklettartomány	220-260	°C
Ajánlott szerszámhőmérséklet	30-60	°C
Ajánlott fröccsöntési sebesség	200	mm/s
Olvadási sűrűség	1040	kg/m ³
Rugalmassági modulus	2300	MPa
Folyáshatár	44	MPa
Folyási alakváltozás	2,4	%
Szakadási nyúlás	12	%
MVR	34	cm ³ /10min

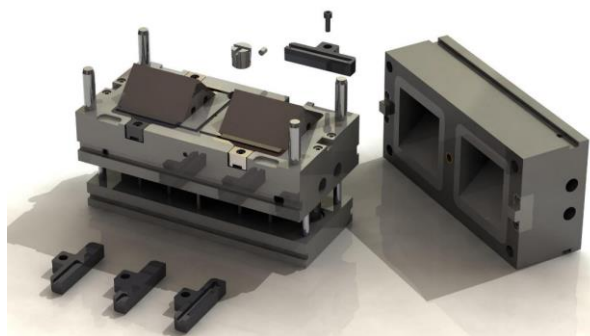
4. táblázat. Terluran Gp35 fontosabb jellemzői [27]

4. Kísérleti rész

A kísérletek során a hagyományos és a formakövető hűtési rendszerek hűtésre és termékminőségre gyakorolt hatását vizsgáltam. Továbbá összehasonlítottam a szerszámacélból és a rézötvözetből készült szerszámbetétek hővezetési tulajdonsága által a fröccsöntési ciklusra gyakorolt hatását.

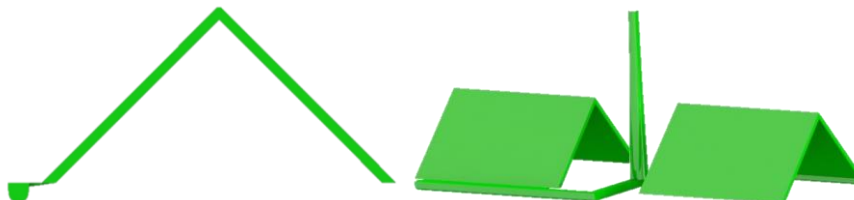
4.1. A szerszám felépítése és a hűtőkör kialakítások

A szerszámbetéteket a tanszéken található sátoztető szerszám formaüregéhez terveztem, amely a 25. ábrán látható. Ez a szerszám két fészkes, változtatható a gát típusa és száma. A meglövés történhet egy oldalról és két oldalról tű és film gáttal is, továbbá változtatható a meglövés helye is a termék hossza mentén. Ez úgy érhető el, hogy a gát körüli rész betétezett, így könnyedén változtatható a gáttípus. A több oldali meglövés beállítása az elosztócsatornában található ömledék terelővel történik. A terelő három állása lehetséges, mindkét fészek szimmetrikus, aszimmetrikus és két oldali meglövése. A szimulációkhoz az egyoldali meglövést és a termék teljes oldalán áramlást biztosító film gátat választottam ki.



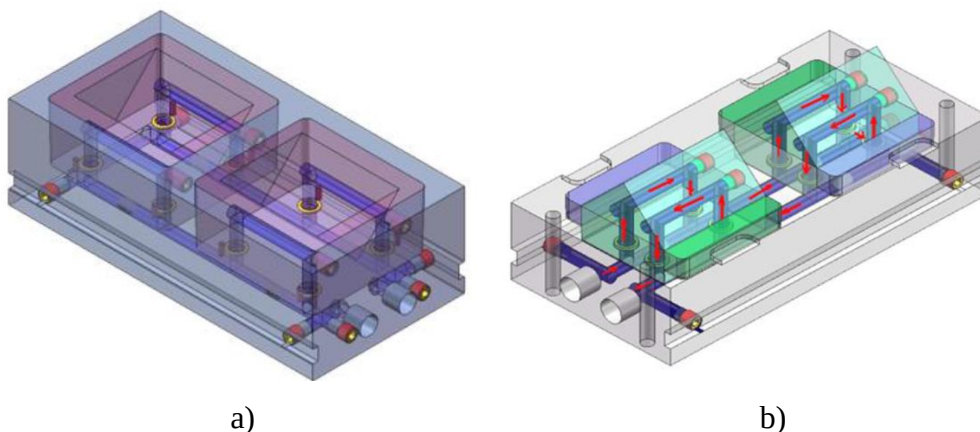
25. ábra A sátortető szerszám

A szerszám által gyártott fröccsöntött terméket mutatja a 26. ábra, látható, hogy a termék két egyenes 2 mm vastag síklapból áll, amelyek derékszöget zárnak be egymással. A próbatest vetemedése a két lap találkozási szögének megváltozásával írható le, így mérhető a deformáció mértéke.



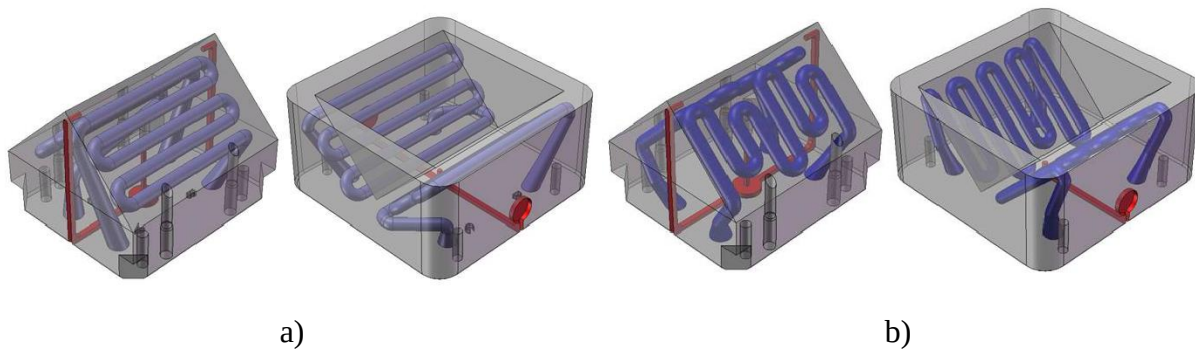
26. ábra Bal oldalt a fröccsöntött próbatest profilja és jobb oldalt az izometrikus képe

A csésze befoglaló mérete 95x95x46 mm, a formaüreg mérete 70,66x75x35,33 mm. A termék megfelelő eltávolításának biztosításához a csésze és a mag is 1°-os kúposággal gyártott. A mag befoglaló mérete 65x75x57,5 mm. A szerszám felek egykörös hűtési rendszerrel temperálhatóak, amit a 27. ábra mutat. Látható, hogy a hűtőkör hagyományos kialakítású, szerszámfelénként az alsó oldalon egy belépési és egy kilépési ponttal. A szerszámlapok alulról és oldalról lettek megfűrva, a szerszámbetétek szintén oldalról és alulról 8 mm átmérőjű furattal fűrtak [28].



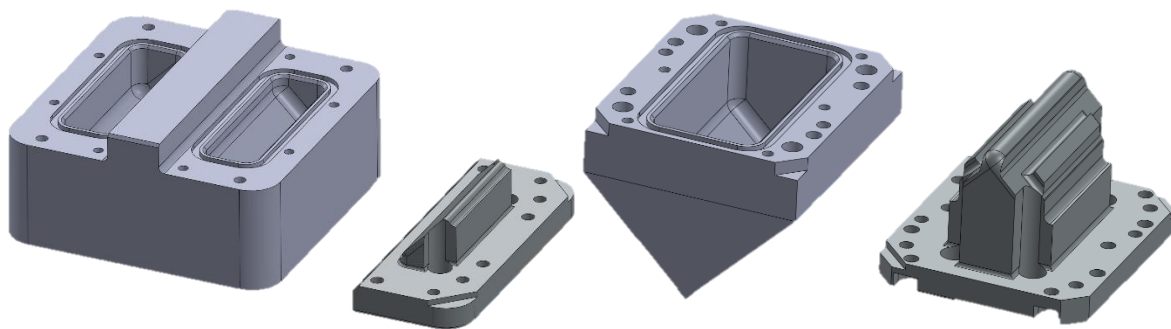
27. ábra Az álló a) és a mozgó b) oldal hűtőkör kialakítása [28]

Litauszki és Lapincs munkáját felhasználva történt a DMLS szerszámbetét hűtőkör kialakításának kiválasztása. Ők különböző RPT technológiával gyártott nem fém alapanyagú szerszámbetéteken hajtottak végre szimulációs és tényleges fröccsöntési vizsgálatokat. A munkájuk során a különböző hűtőkör kialakítások hatását vizsgálták a fröccsöntési technológiára és a termék minőségére. Az első eredmények alapján két kialakítást választottak ki, ezek a 28. ábrán láthatók. Látható, hogy mindkettő kialakítás kör keresztmetszetű, soros elrendezésű és több lekerekített irányváltás található a hűtési út során. Továbbá a belépő keresztmetszet átmérője 8 mm, ami a betétbe belépve 5 mm-re csökken, emiatt változni fognak az áramlási viszonyok a szerszámbetétben. A szimulációk során a 28. ábra b) részén látható hűtőkör-kialakítást választottam, mert a hűtőcsatornák elhelyezkedése könnyebb előállítást tesz lehetővé, továbbá ez a kialakítás kisebb görbületeket tartalmaz, ez javítja a folyadék áramlási és hőátadási viszonyait. A hűtőkörök görbületi íveit tovább optimalizáltam.



28. ábra Vízszintes a) és függőleges b) hűtőkör kialakítás [28]

A DMLS hűtési tulajdonságát hagyományos megmunkálással előállított szerszámbetétek hűtési tulajdonságaival hasonlítottam össze. A hagyományos acél alapanyagból készült és hagyományos hűtőrendszerrel kialakított szerszámbetétén kívül vizsgáltam még hagyományos hűtési rendszerrel rendelkező, de nagy hővezető képességű alapanyagból előállított szerszámbetéteket és hagyományos acél alapanyagból készült, de összetett geometriájú, hagyományos megmunkálással előállított hűtőrendszerrel szerelt szerszámbetéteket. A nagy hővezető képességű szerszámbetét hűtőkör geometriája megegyezik a hagyományos szerszámbetétek hűtőkör geometriájával. Az összetett geometriájú, hagyományos megmunkálással készült szerszámbetéteknél a szerszámbetét üregelt és az üregbe illeszkedő terelőelemmel irányítható az áramlás. Az üregelt szerszámbetéteket és a terelőelemeket mutatja a 29. ábra.

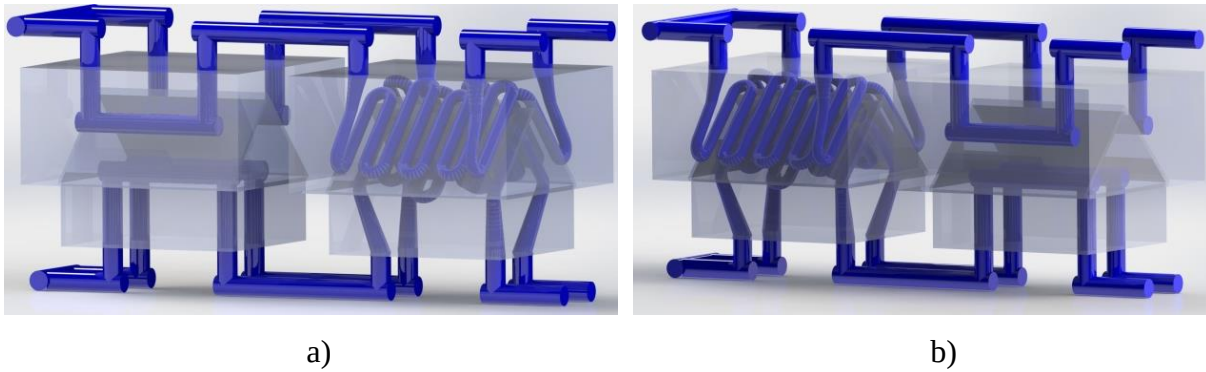


29. ábra Az álló a) és a mozgó b) szerszámbetét és a hozzátartozó terelőelemek

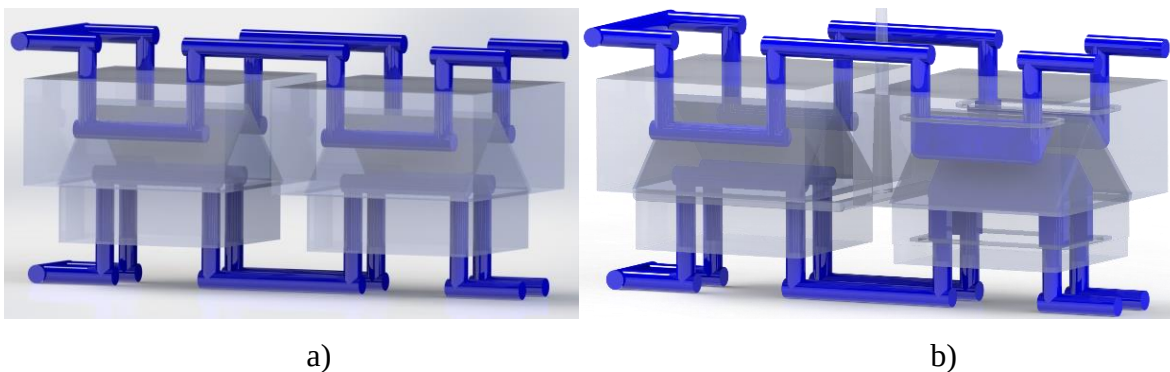
4.2. Szimulációs modellkialakítások

A szerszámbetétek modelljei a Solidworks nevű CAD rendszerrel lett létrehozva. A szimulációk futtatásához a hűtőköröket, a szerszámbetéteket és a terméket egy fájlba kell rendezni, ehhez a megfelelő kényszerek kiosztása után egy összeállítási fájlt kell létrehozni a CAD programmal.

Az első kialakításnál, amely a 30. ábra a) részén látható, a belépőághoz közelebb helyeztem el a DMLS technológiával gyártott szerszámbetéteket, a másik formaüregbe hagyományos hűtőrendszerrel ellátott szerszámbetéteket helyeztem. A második elrendezésnél, amelyet a 30. ábra b) része mutat, a belépőághoz képes a DMLS szerszámbetétek a távolabbi formaüregben találhatók. A két kialakítás összehasonlításának segítségével ellenőrizhető, hogy milyen hatással van a belépőág helyzete a hűtőkörök hatásfokára. Továbbá összevethető a hagyományos és a formakövető hűtések hatékonysága. A harmadik kialakításnál mindkét formaüregben hagyományos technológiával gyártott szerszámbetétek találhatók, a két betét alapanyaga különbözik. Az egyik az Ampcometal által gyártott Ampcoloy rézötvözet, a másik pedig a hagyományos P20-as acél, az elrendezés a 31. ábra a) részén látható. A negyedik kialakításnál a belépő ághoz közelebb található az összetett geometriájú, hagyományos hűtési rendszerrel előállított szerszámbetét, a másik fészekbe pedig a fűrt, hagyományos alapanyagú szerszámbetétet helyeztem (31. ábra b) része).



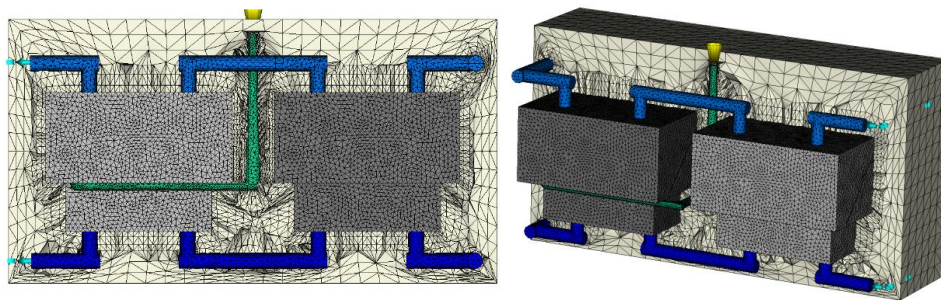
30. ábra A DMLS szerszámbetét a hűtőkör belépőágához közelebbi a) és távolabbi b) formaüregbe helyezve



31. ábra A két hagyományos hűtőkör az Ampcoloy szerszámbetét a) vizsgálatához és az üregelt szerszámbetét szimulációs modellje b)

4.3. Szimulációs modell felépítése és a szimulációs paraméterek

A szimulációs modellt az Autodesk által forgalmazott Simulation Moldflow Insight 2014 nevű programmal építettem fel. A négy csomópontos tetraéderes elemekkel a tér mind a három irányában kiszámítható a hőmérséklet-eloszlás, ezért a hálózás során ilyen típusú elemeket használtam. Ezután következik a szerszámbetétek köré helyezett szerszámtömb létrehozása, amellyel a szerszámbetétek körül található szerszámlapok hővezetési tulajdonságai szimulálhatóak. Ehhez a szerszámtömb felületét hozza létre a program, amely segítségével történik a hálózás. Először a felületi hálóelemeket hozza létre a program, után következhet a térfoga hálózása négy csomópontos tetraéder elemekkel. A szimuláció indítása előtt még meg kell adni a szükséges technológiai és szimulációs paramétereket. A fröccsöntési szimuláció futtatására alkalmas modell látható a 32. ábrán.



32. ábra A szerszámbetét köré épített szerszámtömb

A szimulációk során kitöltődési, utónyomási, hűtési és vetemedési analízist futtattam. A hűtési szimuláció 3D véges elemes hűtési analízis, ezt a Moldflowba beépülő Simulation CFD nevű program megoldó algoritmusával segítségével végeztem el. Ez a program egy áramlási szimulációs program, ennek a segítségével pontosan számítható a hűtőkörökben végbemenő áramlás. A hűtési analízishez a hővezetéssel számoló algoritmust állítottam be. A szimuláció futtatása során a 5. táblázatban látható beállításokat használtam. Az alapanyag a BASF által gyártott Terluran GP 35 ABS, amely ajánlott fröccsöntési hőmérséklete 220-260°C, kidobási hőmérséklete pedig 120°C. Ez az alapanyag erősítetlen, így a szimulációkhoz kikapcsoltam a szálerősítési analízist, amellyel a program szálak okozta mechanikai tulajdonságok megváltozását számolja. A számítások során a program viszont figyelembe vette a gravitációt és a tehetetlenségi hatást, utóbbival szimulálható a szabadsugar kialakulása. A szimuláció a szerszámhőmérséklet egyensúlyi értékének elérése után indul, ez a hőmérséklet 40°C, amely megegyezik a hűtőfolyadék hőmérsékletével. A szimulációkhoz felhasznált fröccsöntő gép a tanszéken is megtalálható Arburg Allrounder 370S Advanced 700-250. Az első szimulációk futtatása után a hűtőfolyadék térfogatáramának és hőmérsékletének befolyását vizsgáltam. Ehhez további szimulációkat futtattam, először a térfogatáramot emeltem 4 liter/percről 8 liter/percre. Ezután visszaállítottam a térfogatáramot 4 liter/percre és a hűtőfolyadék hőmérsékletét csökkentettem 40°C-ról 20°C-ra.

Fröccsöntési hőmérséklet [°C]	230
Kidobási hőmérséklet [°C]	120
Környezeti hőmérséklet [°C]	25
Kezdeti szerszámhőmérséklet [°C]	40
Térfogatáram 1 [l/min]	4
Térfogatáram 2 [l/min]	8
Hűtőfolyadék hőmérséklete 1 [°C]	40
Hűtőfolyadék hőmérséklete 2 [°C]	20

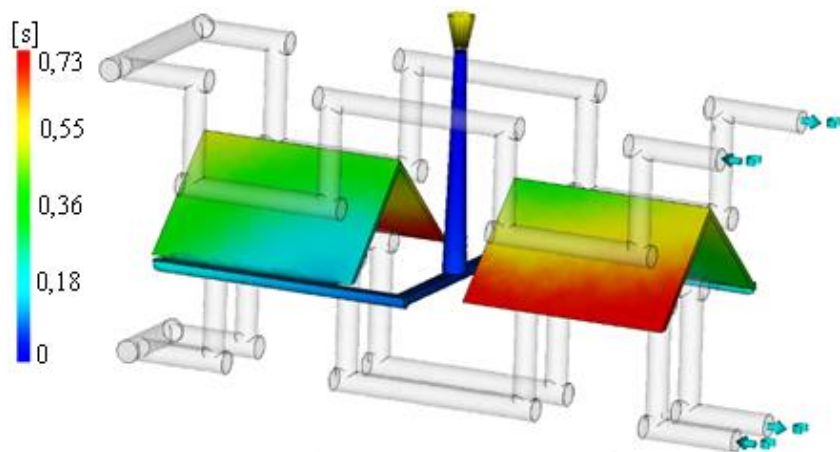
5. táblázat Fontosabb szimulációs paraméterek

4.4. Szimulációs eredmények

A Moldflow a numerikus eljárás végeztével többféle kiértékelési lehetőséget kínál, a kitöltési analízistől egészen a vetemedésszámításig. A munkámban legfőképp a szerszámbetétek hőmérséklet-eloszlásának vizsgálatával és a termék vetemedésvizsgálatával foglalkoztam.

4.4.1. Kitöltési analízis

A 33. ábra mutatja az egyik modellhez tartozó kitöltődési vizsgálat eredményét. A további modellek eredményei nem térnek el jelentősen, mert a kitöltődést befolyásoló tényezők minden modellben azonosak. Látható az ábrán, hogy a formaüreg kitöltődése kb. 0,7 másodperc alatt ment végbe, továbbá, hogy a kitöltődés a film gát folyási út szerinti legközelebbi pontjában indult és onnan fokozatosan haladt végig.

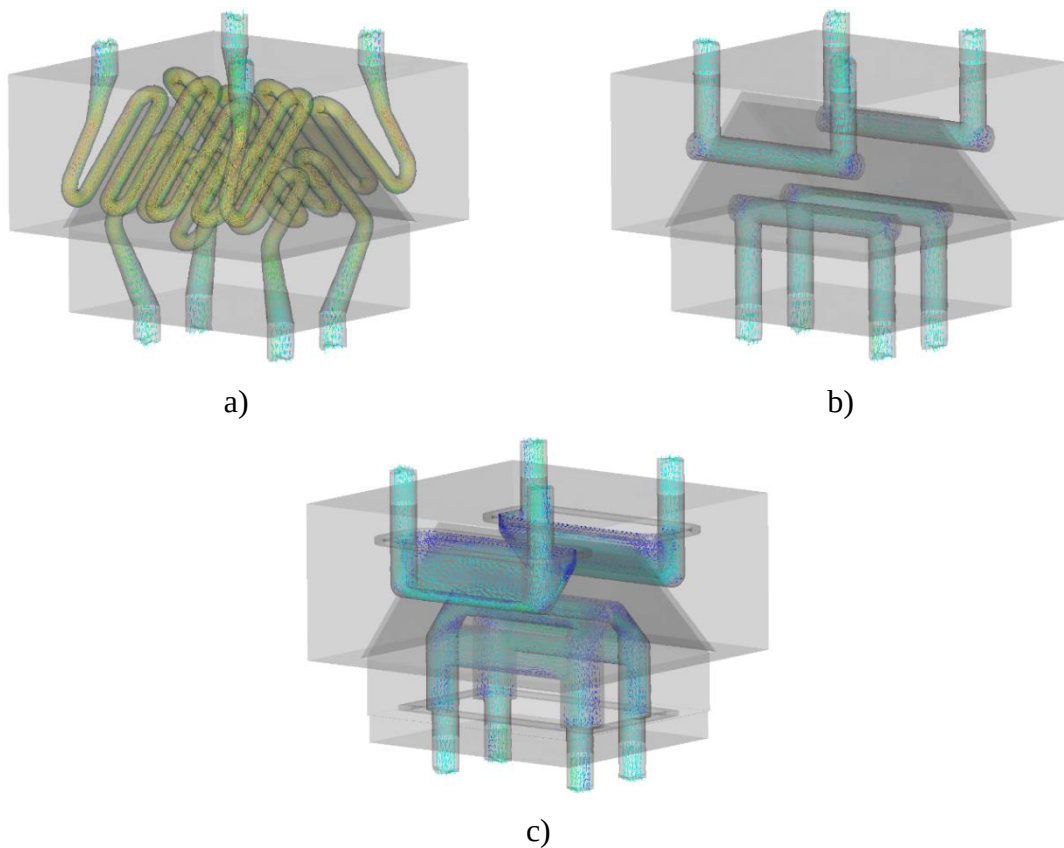


33. ábra Kitöltődési vizsgálat eredménye

4.4.2. Hűtőkör analízise

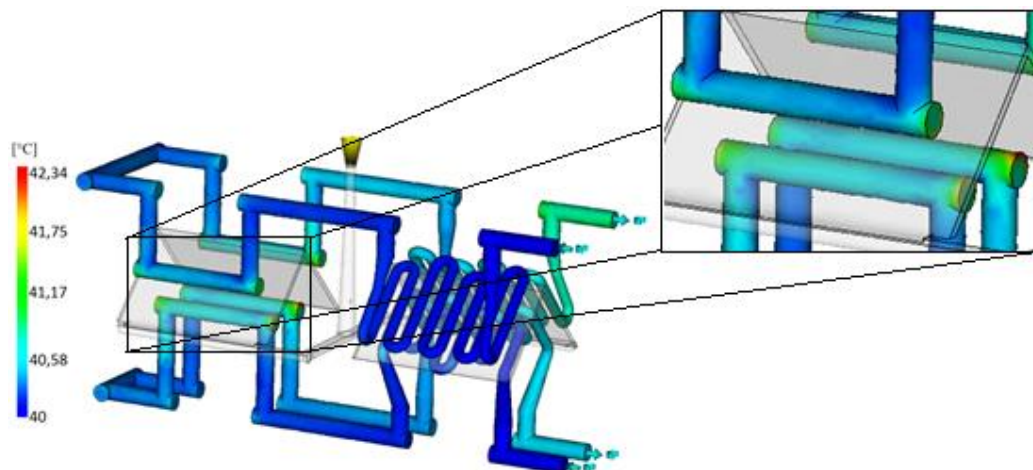
A 34. ábrán látható az áramlási sebesség az út függvényében. A sötétkék szín jelöli a legkisebb, a piros szín pedig a legnagyobb áramlási sebességet. Látható, hogy a hagyományos kialakítású betétben a sarokpontokon a hűtőfolyadék pang, ami csökkenti a hőátadást és növeli a pangó zónában elhelyezkedő hűtőfolyadék hőmérsékletét, ezáltal csökkenti a hűtési hatékonyságot. Látható továbbá, hogy a DMLS betétben az átmérőszűkítés hatására lényegesen megnő a folyadék sebessége, ezzel javítva a Re számot, így növelve a hőátadási tényezőt. Az üregelessel készült szerszámbetétekben a folyadék áramlási sebessége a sarkokban lecsökken, ezeken a helyeken csökken a hűtési hatékonyság. A hűtőkör viszont

olyan kialakítású, hogy a legfontosabb helyeken a sebesség nő, így a mozgó szerszámbetét felső éléhez több hűtőfolyadék áramlik.



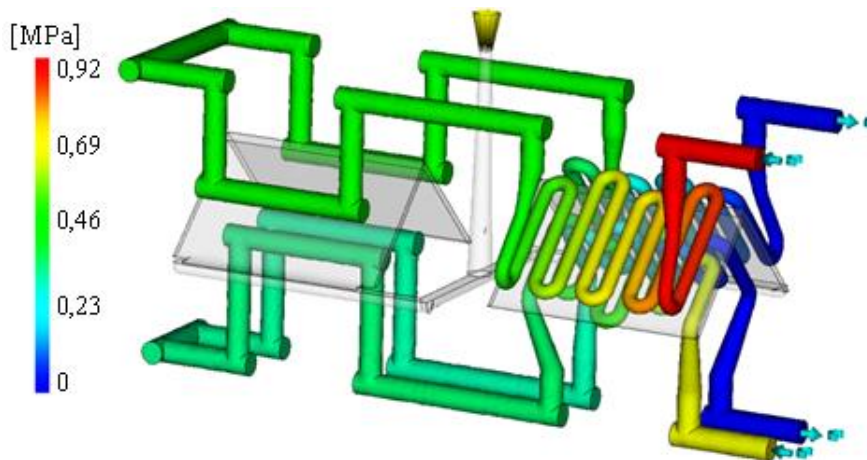
34. ábra A folyadék áramlási sebessége az út függvényében a DMLS a), a hagyományos b) és az üregelt c) szerszámbetétekben

A pangó zóna hőmérséklet növekedése látható a hűtőfolyadék hőmérsékletén is, amit a 35. ábra mutat. Látható, hogy azokon a helyeken, ahol a folyadék sebessége lecsökken, a hőmérséklet kb. 2°C-kal megnő.



35. ábra A hűtőfolyadék hőmérséklete az út függvényében

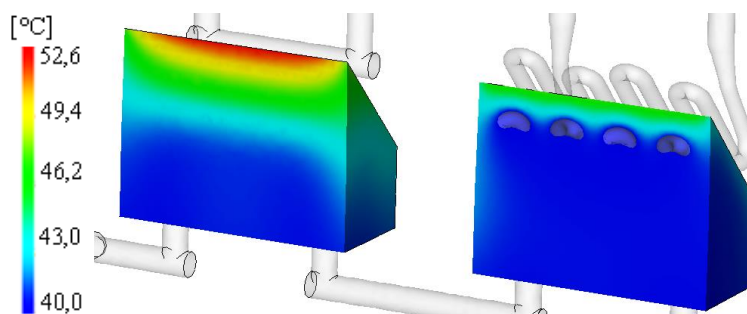
Az eredményeken látható továbbá (36. ábra), hogy a DMLS szerszámbetét összetett hűtőkör geometriája miatt a hűtőfolyadék nyomásesése nagy, a DMLS szerszámbetét után a nyomás a felére esik a kezdeti értékhez képest.



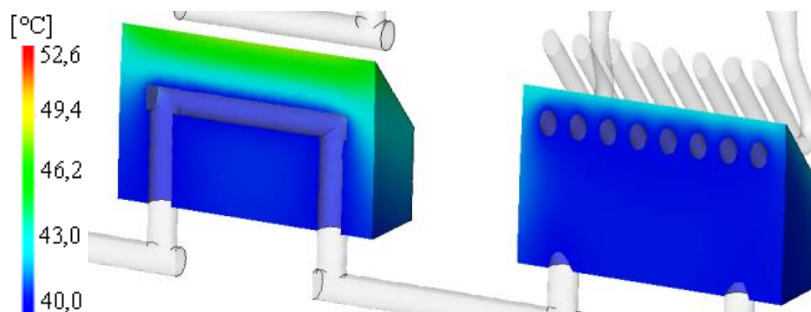
36. ábra A nyomás a hűtési út függvényében

4.4.3. Szerszámbetét hőtani vizsgálata

A hűtési szimulációk eredményeként a program többek között kiszámítja a szerszámbetétek hűtési ciklus végén vett hőmérséklet-eloszlását a teljes keresztmetszetben. A jobb kiértékelhetőség érdekében különböző síkok mentén kettévágtam a szerszámbetéteket, így láthatóvá válik a teljes keresztmetszetben a hőmérséklet-eloszlás. Az 37. ábrán látható a DMLS és a hagyományos rendszer által hűtött szerszámbetétek hőmérséklet-eloszlása a középső keresztmetszetben. Látható, hogy a DMLS szerszámbetét a felület közelében kb. 46°C-os, az alatta lévő terület közel 43°C-os, viszont a keresztmetszet további része a hűtőközeggel megegyező hőmérsékletű. A hagyományos betét felülethez közeli része lényegesen melegebb, kb. 53°C-os, a keresztmetszet további része fokozatosan csökkenő hőmérsékletet mutat. Összehasonlítva a két betétet, látható, hogy a DMLS szerszámbetét lényegesen jobban elvezette a termékből származó hőt. Hasonló képet mutat a 38. ábra, amelyen látható a hőmérséklet-eloszlás a hagyományos hűtőkör és a DMLS hűtőkör belépési pontjának keresztmetszetében. Látható továbbá, hogy a szerszámbetét közepétől a széle fele haladva a felület közeli hőmérséklet fokozatosan csökken.

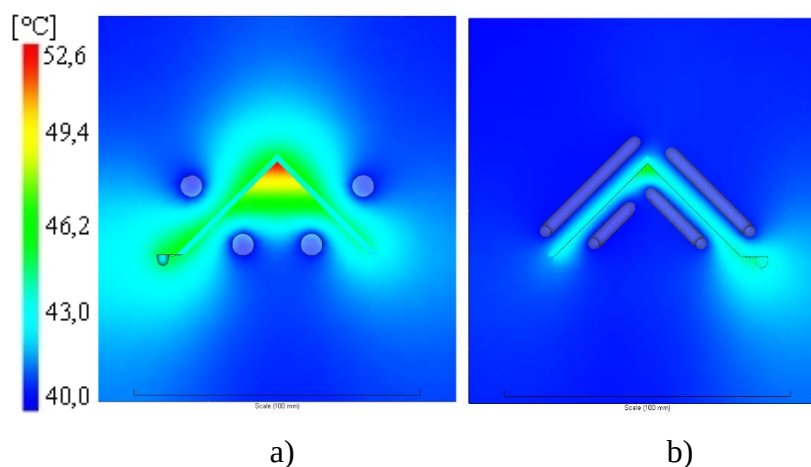


37. ábra Hőmérséklet-eloszlás a DMLS és hagyományos betétek középső keresztmetszetében



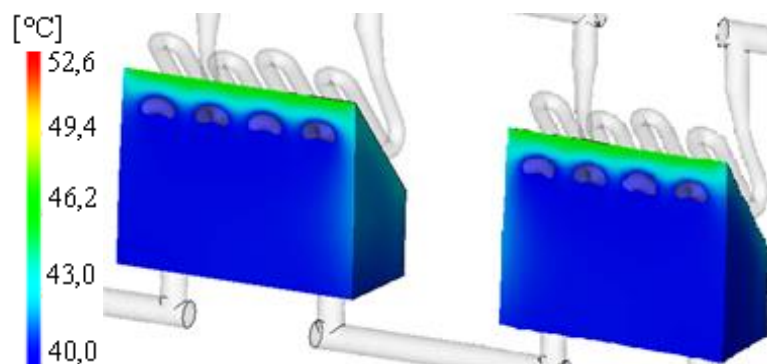
38. ábra A hőmérséklet-eloszlás a hagyományos hűtőkör beömlési keresztmetszetében

Az előbbi irányra merőleges síkok felvételével láthatóvá válik a hőmérséklet-eloszlás a szerszámbetét szélességbeli irányában, ezeket ábrázolja az 39. ábra. Az ábrákon a szerszámblokkhoz tartozó hőmérséklet-eloszlást is ábrázoltam. Látható, hogy a hagyományos betét esetében a hőáram a szerszámblokkra is átadódik, továbbá a teljes keresztmetszetben a hőmérsékletek meghaladják a DMLS szerszámbetétben ábrázoltakat. A DMLS szerszámbetétnél látható, hogy a hűtés jó hatásfokkal elvezeti a hőmennyiséget, csak a filmgátnál halmozódik fel a hő. Látható továbbá, hogy a hagyományos hűtésnél a mag oldali szerszámbetét felső élén a hőmérséklet több mint 5°C-kal megnő, ez vetemedéshez vezethet, a DMLS szerszámbetétnél ilyen hőmérsékletemelkedés nem tapasztalható.



39. ábra A hőmérséklet-eloszlás a szerszámbetét szélessége mentén a) a hagyományos és b) a DMLS szerszámbetét keresztmetszetében

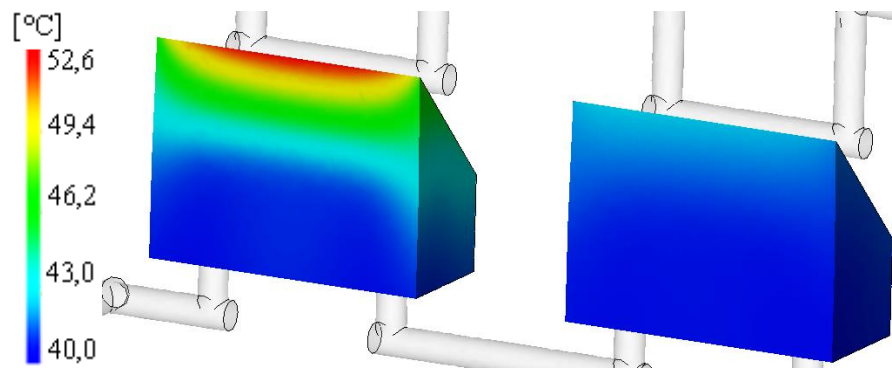
Vizsgáltam továbbá, hogy milyen hatással van a DMLS szerszámbetét elhelyezkedése az eredményekre, ehhez olyan szimulációt is futtattam, ahol a DMLS betét hűtőfolyadék beömlési pontjától távolabbi fészekben helyezkedik el. Az 40. ábrán látható eredményeken lényeges különbség nem látható a két betét középső keresztmetszetében vett hőmérsékleti eloszlásában, ennek alapján elmondható, hogy nagy áramlási sebesség esetén nincs befolyással a betét elhelyezkedése a hűtési hatékonyságra. A felületi hőmérséklet-eloszlás vizsgálata további eredménnyel szolgálhat, amelynek segítségével egyértelműen eldönthető az elhelyezkedés hatása.



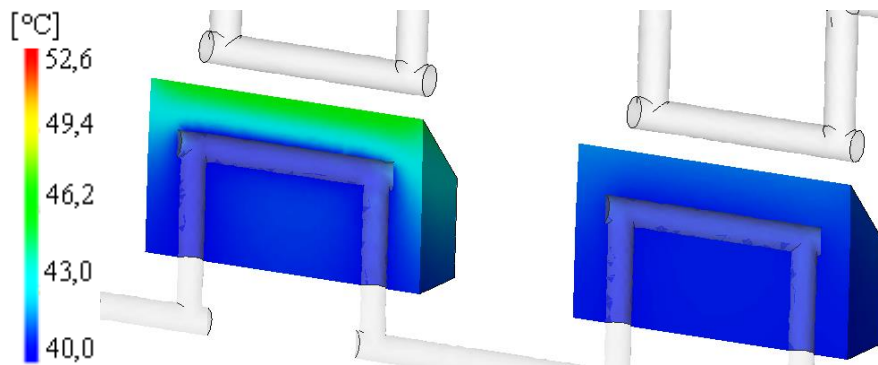
40. ábra A két DMLS szerszámbetét összehasonlítása a pozíció alapján

Az 41. ábra és az 42. ábra a hagyományos és az Ampcoloy 940-es szerszámbetét hasonlítja össze az előzővel megegyező módon. Az Ampcoloy 940-es szerszámbetét hőmérséklet-eloszlása egyenletesebb, a legmelegebb ponton is csak 42°C körüli a hőmérséklet. Látható továbbá, hogy az Ampcoloy szerszámbetét hőmérséklet-eloszlása a hűtőcsatornák keresztmetszetében közel egyenletes. Ezek az eredmények alapján elmondható, hogy az Ampcoloy betét hagyományos fűtőrendszerrel is jobban képes elvonni a hőt a vizsgált szerszámnál, mint a DMLS technológiával gyártott hűtőkörök. Viszont összetettebb hűtőkör-geometriát vizsgálva ez az eredmény már nem feltétlenül érvényes, mert a DMLS technológiával jobban lekövethető a termék geometriája. Az ábrán látható továbbá, hogy a szerszámbetétek belső irányba eső oldalán a hőmérsékletek nagyobbak, mint a külső oldalon. Ez valószínűleg abból következik, hogy itt helyezkedik el a szerszámban a beömlő csatorna és így ebből az irányból is fellép hőáramlás. Az Ampcoloy 83 és 88-ból készült szerszámbetétek szimulációs eredményei a várt képnek megfelelőek, az Ampcoloy 83 alapanyagnak 100 W/mK a hővezetési tényezője, ennek megfelelően a hőmérsékletek is nagyobbak. Az Ampcoloy 88 alapanyag hasonló hővezetési tényezőjű, mint a 940-es, amelynek 200 W/mK érték körüli a hővezetési tényezője, ennek megfelelően az Ampcoloy 940-es hőmérsékleti-eloszlásához hasonló a kép, némileg egyenletesebb az eloszlás és alacsonyabb a maximális

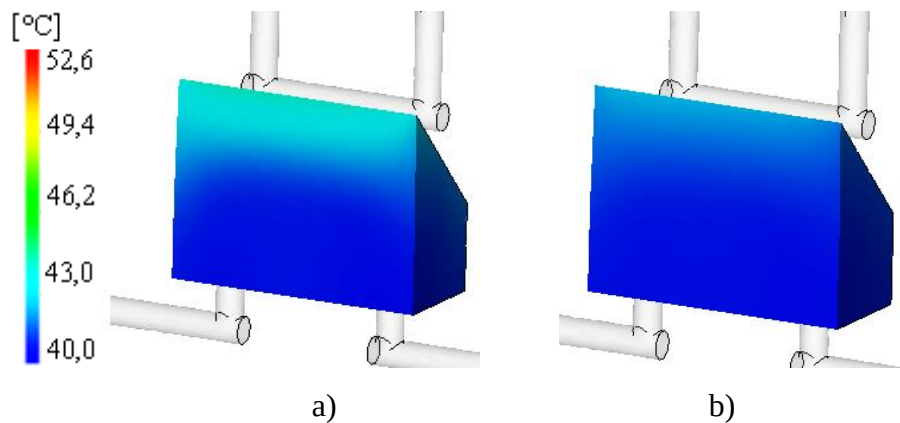
hőmérséklet értéke. Az Ampcoloy 83 és 88 alapanyagból készült szerszámbetétekhez tartozó, a szerszám közepén számolt hőmérsékleti eloszlást mutatja.



41. ábra A hagyományos és az Ampcoloy 940-es szerszámbetét hőmérséklet-eloszlása a középső keresztmetszetben



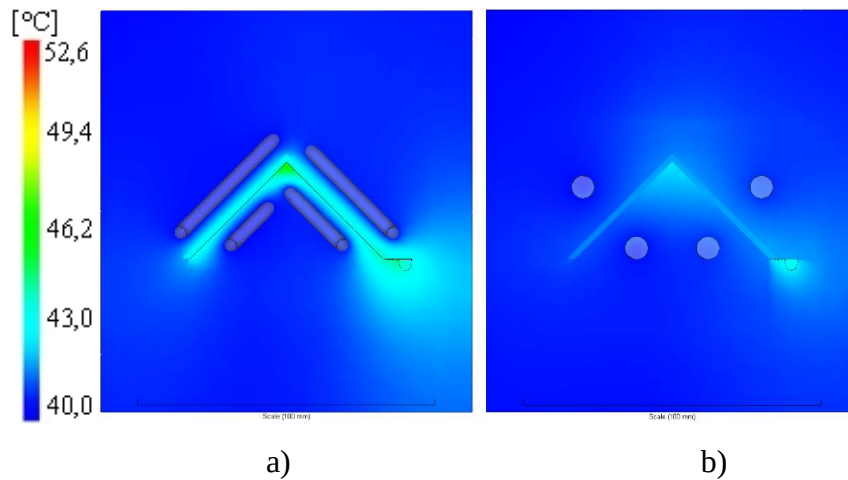
42. ábra A hőmérséklet-eloszlás a hűtőcsatornák keresztmetszetében



43. ábra Az Ampcoloy 83 a) és 88 b) alapanyagból készült szerszámbetétekhez tartozó hőmérsékleti eloszlás a szerszámbetét középső keresztmetszetében

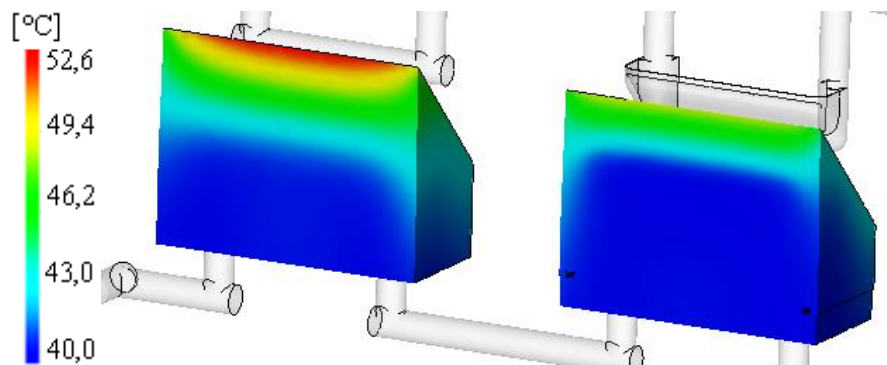
Az előző eredményekből látható, hogy az Ampcoloy szerszámbetét lényegesen jobb hűtési tulajdonságokkal rendelkezik, mint a hagyományos szerszámbetét, ezért a szélességbeli hőmérséklet-eloszlás kiértékelése során a DMLS betéttel hasonlítom össze. A DMLS és az Ampcoloy 940 szerszámbetét összehasonlítását mutatja az 44. ábra. A jobb hővezető

képességű Ampcoloy szerszámbetét a hőt a szerszám külső részéhez vezeti, emiatt a hőmérséklet-eloszlása egyenletesebb, nem alakulnak ki nagyobb hőmérsékletkülönbségek.



44. ábra A hőmérséklet-eloszlás a) a DMLS és b) az Ampcoloy szerszámbetétben

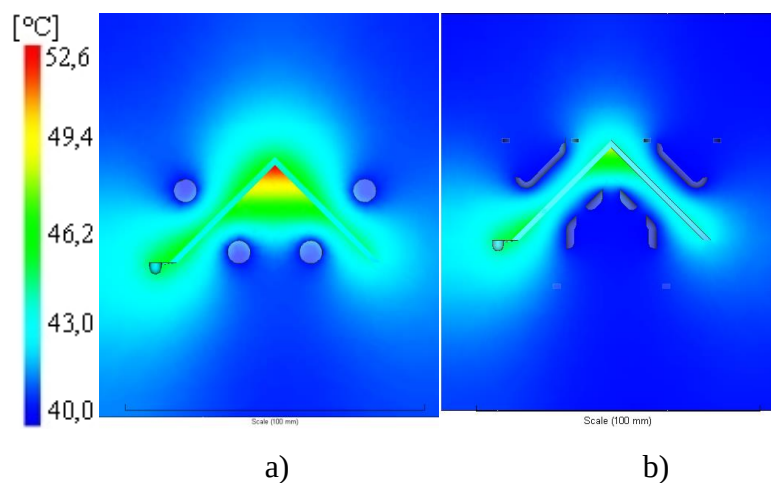
A hagyományos eljárással készült, hagyományos kialakítású hűtőkörrel rendelkező és a hagyományos eljárással készült, üregelt szerszámbetétek hosszirányú hőmérséklet-eloszlását mutatja a 45. ábra. Látható, hogy az üregeléssel készült szerszámbetét maximális hőmérséklete kisebb, a hőmérséklet-eloszlás egyenletesebb. A hőmérséklet-eloszlás a DMLS szerszámbetéthez hasonló, a DMLS szerszámbetét maximális hőmérsékleténél viszont néhány fokkal nagyobb az üregelt szerszámbetét maximális hőmérséklete.



45. ábra A hagyományos és az üregelt szerszámbetét hosszanti hőmérséklet-eloszlása

Az üregelt és a hagyományos szerszámbetétek és a szerszámbetétek köré épített szerszámblokk szélességbeli hőmérséklet-eloszlását mutatja a 46. ábra. Látható, hogy a maximális hőmérsékleti érték kb. 3°C-kal kisebb, a hőmérséklet-eloszlás egyenletesebb. A hagyományos hűtéshez hasonlóan a maximális hőmérsékleti értékek a mozgó szerszámbetét felső élénél találhatóak, az üregelt szerszámbetét álló szerszámfelében a hőmérséklet egyenletes, csak a beömlő környékén nő néhány fokkal. A keresztmetszeti hőmérséklet-

eloszlás eredményei alapján az üregelt kialakítás hűtési hatékonysága a hagyományos és a DMLS betét közé helyezhető.



46. ábra A hagyományos és az üregelt szerszámbetét szélességbeli hőmérséklet-eloszlásának vizsgálata

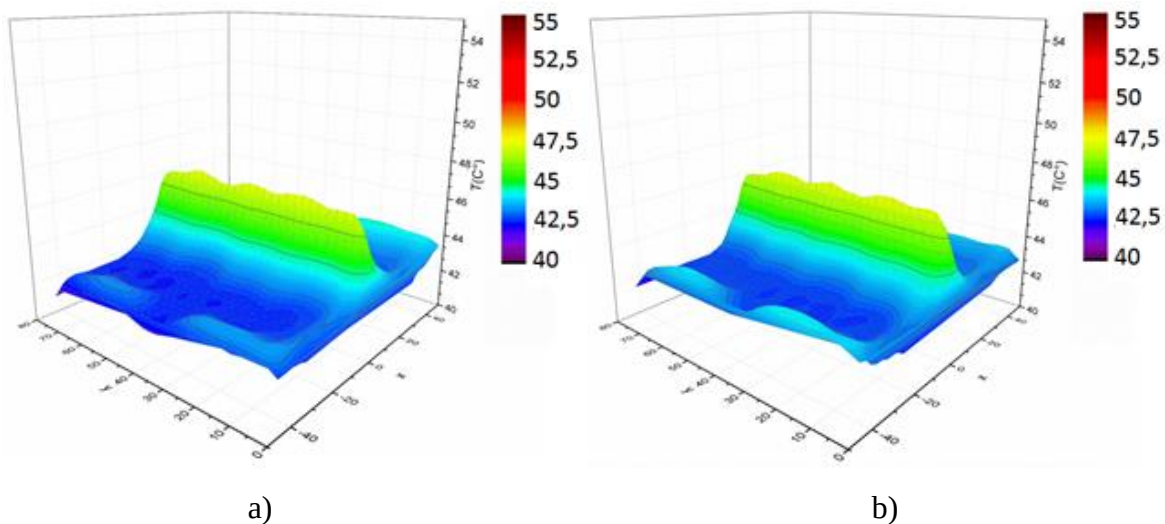
4.4.4. Szerszámbetétek felületi hőmérséklete

További összehasonlítást nyújt a felületi hőmérsékletek összevetése. Ezeket az értékeket a program az egész fröccsöntési ciklus átlagolt hőmérsékleteit felhasználva határozza meg. A Moldflowból kimentett ábrák nehezen összehasonlíthatóak, ezért 3D diagramokat hoztam létre az adatokból. Ehhez szükségem volt a csomópontokhoz tartozó koordinátákra, amiket egy makro segítségével olvastam ki a Moldflowból. A koordináták levetítése és transzformálása után minden csomópontoz tartozó x és y koordinátát megkaptam. A csomópontokhoz tartozó hőmérsékleti értékek kiolvasása után már minden adat adott volt a diagram létrehozásához, ezt az Originlab által forgalmazott Origin nevű diagramkezelővel végeztem el.

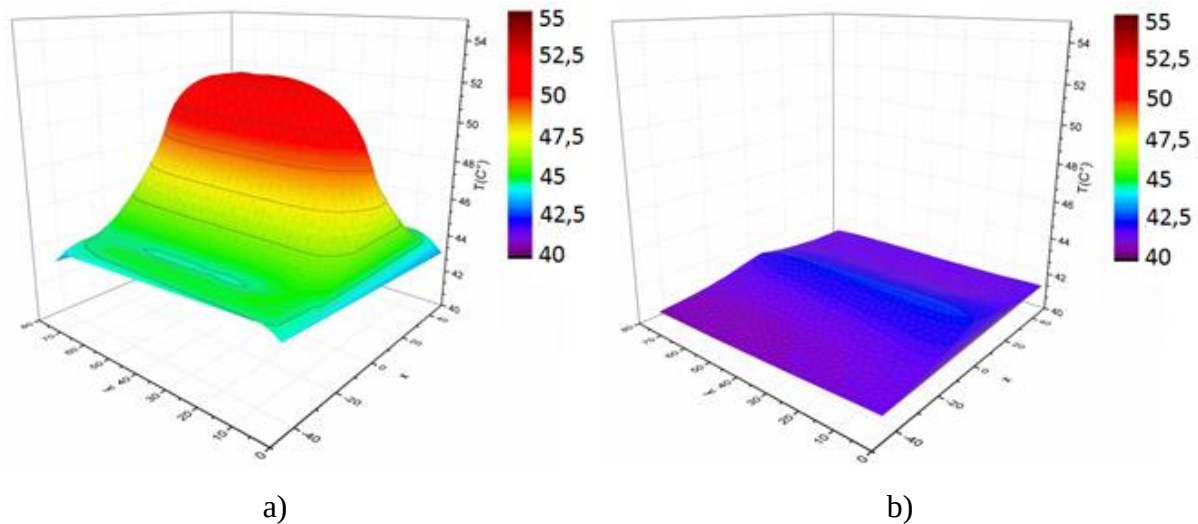
A 3D diagramok az 47-49. ábrán láthatóak, amelyek segítségével elmondható, hogy a DMLS szerszámbetétek pozíciója nem befolyásolja a hűtési hatékonyságot. Továbbá látható, hogy a DMLS betétek a felületi hőmérsékletkülönbsége 7°C körüli, amely a részben kristályos anyagokhoz tartozó 10°C -os hőmérsékleti ajánlásnak eleget tesz, de az amorf anyagokra vonatkozó 5°C -nak már nem. Az Ampcoloy 940-ből készült szerszámbetét felületi hőmérséklet különbsége, viszont csak 3°C körüli, így jobb hűtési hatékonysággal rendelkezik, mint a DMLS betét. A hagyományos megoldáshoz képest mind a DMLS és az Ampcoloy szerszámbetét is jobb eredményeket ért el, a DMLS betét 6°C -kal, az Ampcoloy betét pedig 10°C -kal kisebb maximális hőmérsékleti értékkel rendelkezik.

A fűréssal készült hűtőköröket összehasonlítottam az üregelési eljárással előállított szerszámbetéttel is, a felületi hőmérséklet-eloszlások láthatók a 49. ábrán. Az üregelt

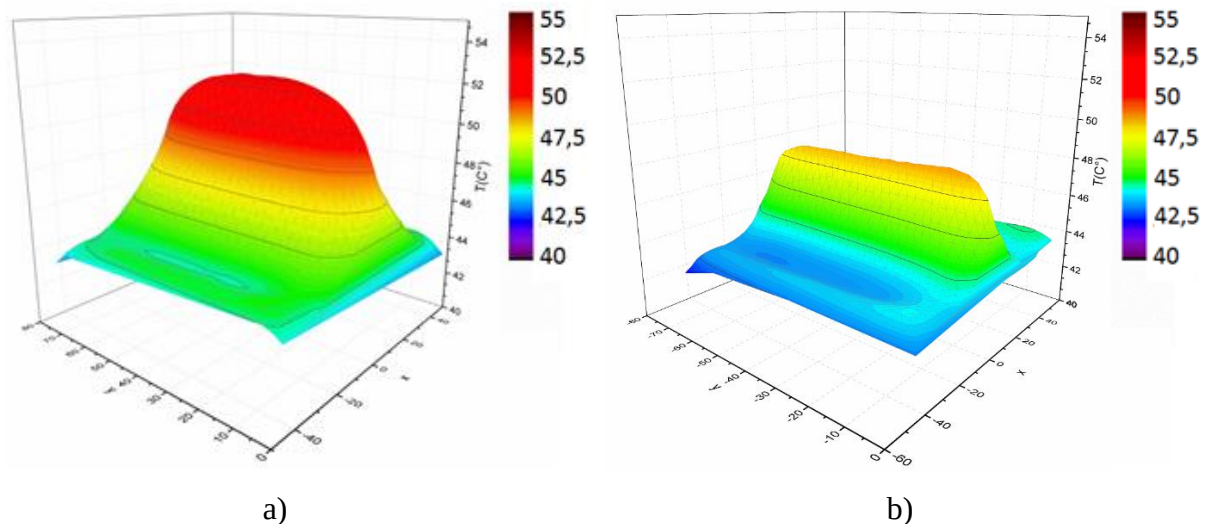
szerszámbetéthez tartozó hőmérséklet-eloszláson látható, hogy a maximális hőmérséklet kisebb, csak a mag felső élénél emelkedik meg a hőmérséklet néhány fokkal, ebből a részből a hőmennyiség elvonása a hűtőkörök segítségével nem lehetséges. A gát oldalán a hőmérsékletek nagyobbak, mint a túlsó oldalon, hasonlóan a DMLS szerszámbetéthez ez a megoldás sem képes a gátnál felgyülemelő polimertől elvezetni a hőmennyiséget. Továbbá a többi megoldáshoz hasonlóan jól látható a hűtőkör helye a hőmérsékleti eloszláson, az üregelt szerszámbetét esetén a hőmérséklet-különbsége 7°C , ez az érték a hagyományos szerszámbetéténél 6°C -kal kisebb, a DMLS szerszámbetéténél pedig 2°C -kal nagyobb. Ezek alapján elmondható, hogy a megoldás hűtési hatékonysága a DMLS és a hagyományos szerszámbetétek hűtési hatékonysága közé tehető, a hagyományos megoldásnál kb. 4°C -kal kisebb a maximális hőmérséklet, a DMLS szerszámbetéténél viszont nagyjából $2,5^{\circ}\text{C}$ -kal nagyobb a legnagyobb hőmérsékleti érték az üregelt szerszámbetét magjában.



47. ábra A belépési ponthoz közelebb a) és távolabb b) lévő DMLS szerszámbetéthez tartozó felületi hőmérséklet-eloszlás

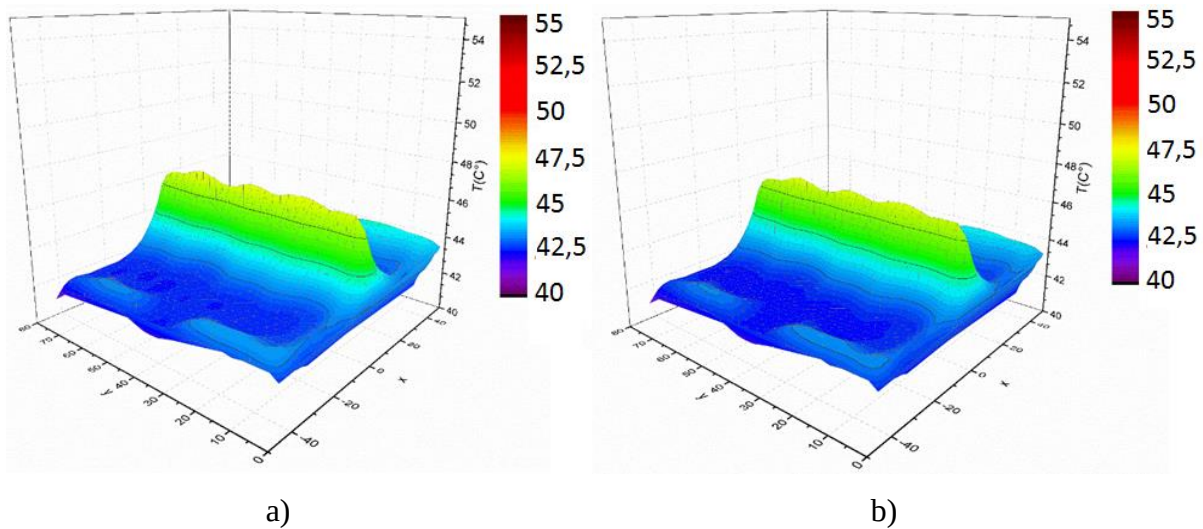


48. ábra A hagyományos alapanyagú, fúrással előállított és az Ampcoloy 940 alapanyagú szerszámbetéthez tartozó hőmérséklet-eloszlás



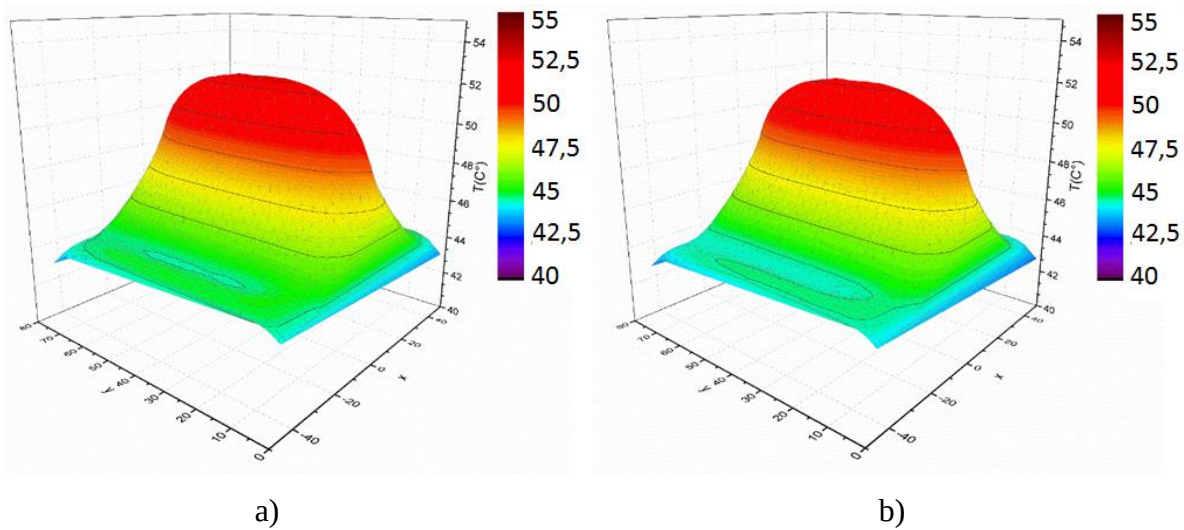
49. ábra A hagyományos a) és az üregelt b) szerszámbetétek felületi hőmérséklet-eloszlásának összehasonlítása

A továbbiak során a technológiai paraméterek hatását vizsgáltam a hűtési tulajdonságokra. Ehhez először a hűtőfolyadék térfogatáramát dupláztam meg, 4 liter/perc-ről 8 liter/percre emeltem. A kiértékeléshez a 3D diagramokat használok fel, a DMLS szerszámbetét eredményei láthatóak az 50. ábrán 4 l/perc és 8 l/perc-es térfogatáramon. Lényeges különbség nem mutatható ki, a maximális hőmérséklet csökkent, a hőmérséklet-eloszlás viszont egyenletlenebbé vált.



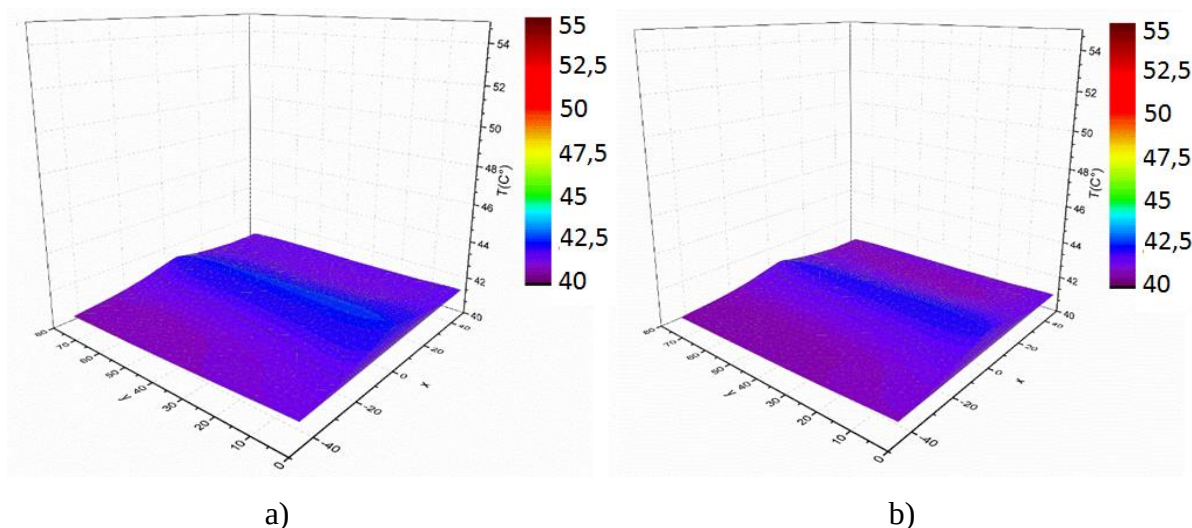
50. ábra A DMLS szerszámbetétek 3D diagramja a) 4 és b) 8 l/perc térfogatáramon

A hagyományos szerszámbetéthez tartozó hőmérséklet-eloszlások összehasonlítása a DMLS szerszámbetéthez hasonlóan nem mutat lényeges különbséget, a két hőmérséklet-eloszlás az 51. ábrán látható.



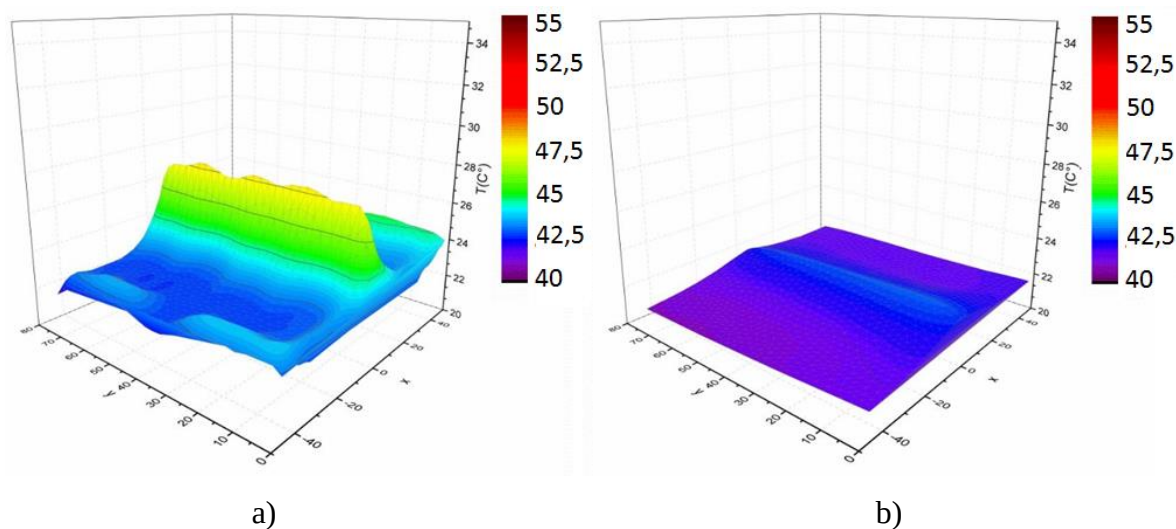
51. ábra A hagyományos szerszámbetéthez tartozó hőmérséklet-eloszlás a) 4 és b) 8 l/perc térfogatáramon

Az Ampcoloy 940 alapanyagból készült szerszámbetét hőmérséklet-eloszlása az előző kettővel ellentétben egyenletesebb értékeket mutat 8 l/perc-es térfogatáramon. A maximális hőmérséklet a DMLS betéhez hasonlóan csökkent (52. ábra).



52. ábra Az Ampcoloy szerszámberet hőmérséklet-eloszlása a) 4 és b) 8 l/perc térfogatáramon

A továbbiakban a hűtőfolyadék hőmérsékletét változtattam, 40°C-ról 20°C-ra csökkentettem, a folyadék térfogatáramát az eredeti 4 l/percre visszaállítottam. Az 53. ábrán láthatóak az eredmények, amelyek hőmérséklet-eloszlása nem mutat különbséget a 40°C-os hűtővíz eredményeihez képest. A hőmérsékletek csak eltolódtak 20°C-kal, egyéb változás nem észlelhető.

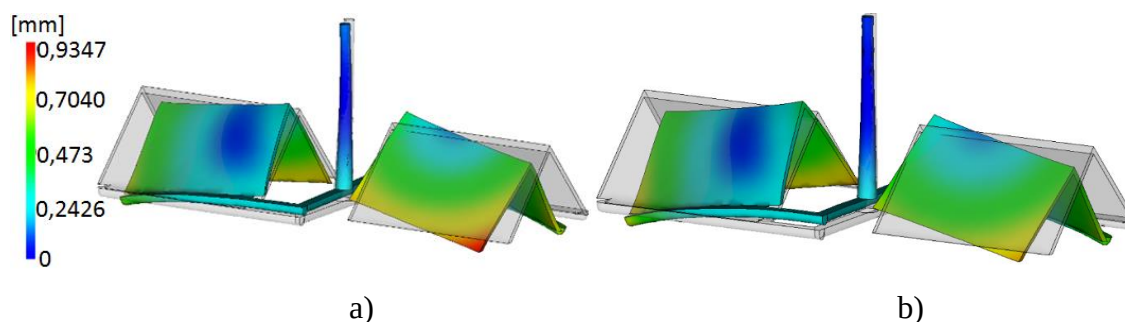


53. ábra A 20°C-os hűtőfolyadékhoz tartozó hőmérséklet-eloszlás a) DMLS és b) Ampcoloy 940 szerszámberet felületén

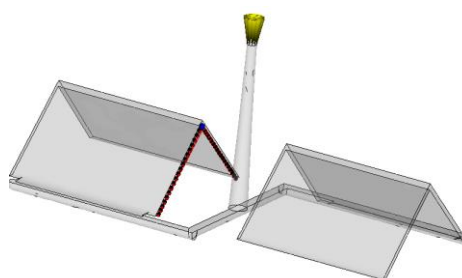
4.4.5. Vetemedési analízis

A hőmérséklet-eloszlások kiértékelése után a vetemedési eredmények vizsgálatával foglalkozom. A vetemedést befolyásolja a hűtési egyenletességen kívül a nyomás, a gát elhelyezkedése és az orientáció. A szerszámalkításból adódik, hogy várhatóan a termék a film gáthoz közelebbi oldalon az utónyomási szakasz során nagyobb nyomás halmozódik fel

az ömledékben, így jobban kompenzálja a fellépő zsugorodást. Az alapanyag erősítetlen, így az ömledék terjedési irányával párhuzamos irányban a zsugorodás nagyobb értékű. Az ilyen fajta hatások együttesen lépnek fel, így nehezen meghatározhatóak. A Moldflow a vetemedési eredményeket a többi eredményhez hasonlóan grafikusán ábrázolja, az értékekhez színeket rendelve. Az 54. ábra mutatja a Moldflowból kimentett vetemedés szimulációs eredményeket hússzoros nagyításban. Látható, hogy az eredmények ilyen módon nem kiértékelhetőek, ezért az 55. ábrán látható derékszöget bezáró négy élhez tartozó szögdeformáció segítségével vizsgálom a továbbiakban a vetemedést. Ehhez először lekötöttem az él csúcspontjának x, y és z koordinátáját, továbbá az él végpontjainak x, y és x koordinátáit. Így kerülhető el, hogy a 54. ábrán látható módon kiforduljon a termék a deformálatlan állapothoz tartozó síkból. Ezután kimentettem az élekhez tartozó csomóponti adatokat a hozzátartozó koordináta értékekkel együtt, ezekkel Microsoft Excel-ben szögfüggvények segítségével meghatároztam a két lap által közbezárt szöget, a kiértékelt eredményeket diagramokban ábrázoltam.



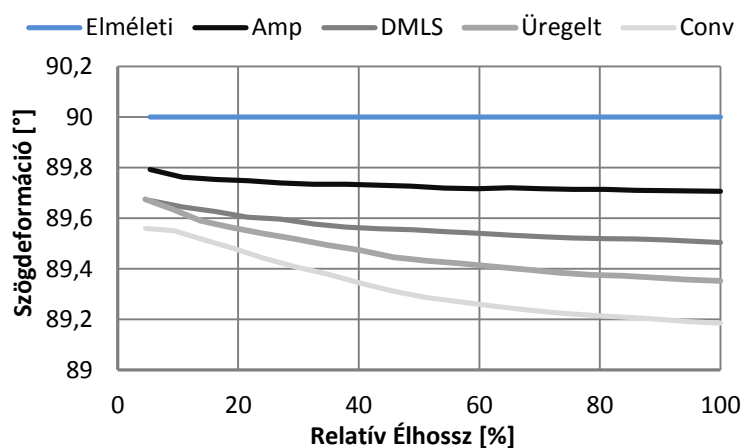
54. ábra A vetemedés szimulációs eredmények a) Ampcoloy és b) DMLS és hagyományos betétek esetén



55. ábra A szögdeformáció számításokhoz felhasznált él

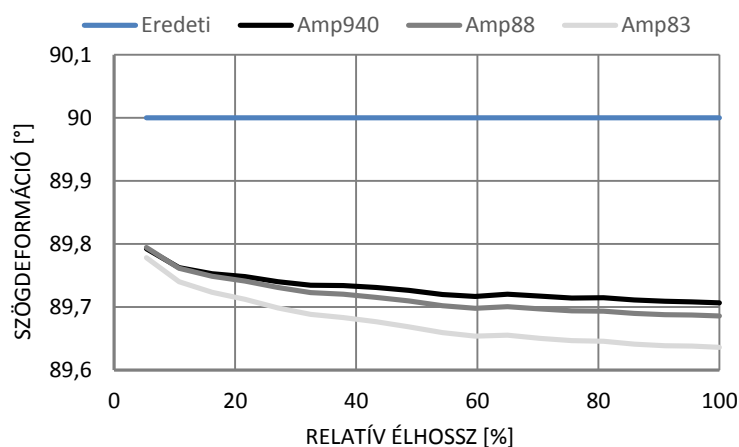
A 56. ábra mutatja a különböző szerszámbetétekhez tartozó szögdeformációs adatokat a beömlőhöz közelebb és a mozgó szerszámbetéthez közelebb eső él hosszának függvényében. A relatív élhossz nullpontja a csúcspontban található. Látható, hogy a deformálatlan állapotbeli 90°-os szöget az Ampcoloy szerszámbetéthez tartozó termék közelíti meg leginkább, de a DMLS szerszámbetétkben fröccsöntött termék is jobb értékeket ér el, mint a

hagyományos betét által előállított fröccsöntött termék. A hőmérséklet-eloszlásnak megfelelően az üregeléssel előállított szerszámbetéthez tartozó próbatest a DMLS és a hagyományos szerszámbetéttel előállított termék szögdeformációja közé esik. Látható továbbá, hogy a relatív élhossz mentén a szögdeformáció nő, a termék a külső oldal fele kagylósodik minden esetben.



56. ábra A különböző szerszámbetétekhez tartozó szögdeformáció a relatív élhossz függvényében

A 57. ábra mutatja a különböző Ampcoloy szerszámbetétek által előállított termékek szögdeformációját a relatív élhossz függvényében. A relatív élhossz nullpontja az előzőekhez hasonlóan a termék csúcspontjában található. Látható, hogy az összes Ampcoloy betéthez tartozó termék kisebb szögdeformáció értékkel rendelkezik, mint a DMLS szerszámbetéthez tartozó termék. Az Ampcoloy szerszámbetétek fajhője kb. megegyezik, a hővezetési képességük viszont különböző. Az Ampcoloy 83 hővezetési tényezője lényegesen kisebb, mint a másik két Ampcoloy anyagé, ennek megfelelően a hozzátartozó szögdeformáció is nagyobb.



57. ábra Az Ampcoloy szerszámbetétekhez tartozó termékek szögdeformációja az élhossz függvényében

5. Összefoglalás

A hűtési idő a fröccsöntési technológia legmeghatározóbb része, így ennek csökkentése javítja legnagyobb mértékben a termelési hatékonyságot. A hűtési hatékonyság optimalizációjára a legjobb megoldás a formakövető hűtési rendszerek, amelyek követik a fröccsöntött termék kontúrvonalát. Ezzel a megoldással egyenletesebben és nagyobb hőmennyiség vonható el a terméktől, mint a hagyományos hűtési rendszerekkel, ezáltal csökken a hűtési idő és javul a termék minősége. A formakövető hűtési rendszerek tervezése összetett feladat, így a hűtőkörök szimulációs ellenőrzése elengedhetetlen

A dolgozatomban bemutatom a különböző prototípusgyártási eljárásokat, az RPT technológiákhoz kapcsolódó gyorszerszámozási technikákat. Továbbá kitérek a hagyományos és a formakövető hűtési rendszerek alapvető különbségeire, bemutatom milyen korlátokkal és előnyökkel jár a fröccsöntési szimulációs programok alkalmazása a formakövető hűtési rendszerek tervezése során. Az irodalomkutatás legvégén ismertetem azokat a kutatásokat, amelyek formakövető hűtések előnyeivel és tervezésével foglalkoznak.

A dolgozatomban összehasonlítottam a hagyományos és a formakövető hűtési rendszereket fröccsöntés-szimulációs eljárással. Továbbá vizsgáltam a különböző hővezetésű és fajhőjű fröccsöntőszerszám-alapanyagok a fröccsöntési ciklusra és a termék minőségre gyakorolt hatását. Megállapítottam, hogy egyszerű geometriájú termékek esetében is a hagyományos helyett formakövető hűtési rendszer alkalmazása jelentősen javítja a termék minőségét. Az eredmények alapján elmondható, hogy a rézalapú erősen ötvözt szerszámanyagok hagyományos hűtési rendszerrel is több hőmennyiséget képesek elvonni, mint a formakövető hűtések, így ezek az anyagok nagyobb mértékben javítják a termékminőséget. A rézalapú Ampcoloy szerszámanyagok lényegesen drágábbak, mint a formakövető hűtési rendszerekhez használt MS1 alapanyag, a kopásállóságuk viszont kisebb, így csak bizonyos esetekben gazdaságos az alkalmazásuk. A szimulációs eredmények validálása történhet a tényleges fröccsöntések elvégzése után, a szkennert élek szögdeformáció számításával, a fröccsöntött termék 3D szkennelt modell és a szimulációból kinyert modell összehasonlításával, illetve a fröccsöntés közben felvett hőkamerás képek elemzésével.

6. Irodalomjegyzék

1. An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011, , PlasticsEuropem EuPC, EuPR, EPRO, Brussels, 2012
2. Buzási Lajosné: Fröccsöntés helyzete Magyarországon 2012-ben, Műanyag és gumi, 2012. szeptember, 49. sz., p. 321-325
3. Wohlers Associates: Wohlers Report 2013, Colorado: Wohlers Associate Inc., 2013, 297 p., ISBN 0-9754429-9-6
4. Dunai A., Macskási L.: Műanyagok fröccsöntése, Budapest: Lexica kiadó, 2003, 456 p., ISBN 963 206 550 6
5. Prototípusgyártás a műanyagiparban, előadás segédlet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Budapest, 2013
6. I. Ilyas, C. Taylor, K. Dalgarno, J. Gosden: Design and manufacture of injection mould tool inserts produced using indirect SLS and machining processes, Rapid Prototyping Journal, Vol. 16, 2010, p. 429-440
7. Házkötő I.: Műszaki 2D-s ábrázolás, Budapest: Műegyetemi Kiadó, 2006, 116 p.
8. A. Coremans, M. Kauf, P. Hoffmann, Laser assisted rapid tooling of molds and dies, Proceedings of the Fifth European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Finland, 1996, p. 195–210
9. F. Petzoldt, H. Pohl, A. Simchi, B. Alcantara : DMLS gets an expert once-over, Metal Powder Report January 2006;Vol. 61, p. 10-13
10. M.W. Khaing, J.Y.H. Fuh, L.Lu : Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts, Journal of Materials Processing Technology Vol.113, 2001, p. 269-272
11. F.E.H. Tay, E.A. Haider : Laser sintered rapid tools with improved surface finish and strength using plating technology, Journal of Materials Processing Technology Vol. 121, 2002, p. 318-322
12. A. Simchi, F. Petzoldt, H. Pohl : On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling, Journal of Materials Processing Technology Vol.141, 2003, p. 319-328
13. Fröccsöntési szimuláció, előadás segédlet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Budapest, 2012

14. Jay Schoemaker : Moldflow design guide, Munich: Hanser Publisher, 2006, 326 p., ISBN-10: 1-56990-403-0
15. Dr Pálmai Z., Dévényi M., Szőnyi G. : Szerszámanyagok, Budapest: Műszaki kiadó, 1991, 381 p., ISBN 963-10-8939-5
16. Artinger, Csikós, Krállics, Németh, Palotás: Fémek és kerámiák technológiája, Budapest: Műegyetemi kiadó, 2006, 420 p.
17. Böhler P20 adatlap http://www.bucorp.com/files/P20_data_sheet_09032013.pdf, 2013. szeptember 11.
18. Ampcoloy 83 adatlap http://www.ampcometal.com/common/datasheets/en/A83_EX_E.pdf, 2013. szeptember 11.
19. Ampcoloy 88 adatlap http://www.ampcometal.com/common/datasheets/en/A88_EX_E.pdf, 2013. szeptember 11.
20. Ampcoloy 940 adatlap http://www.ampcometal.com/common/datasheets/en/A940_EX_E.pdf, 2013. szeptember 11.
21. EOS MaragingSteel MS1 adatlap (http://www.harbec.com/media/uploads/maragingsteel_ms1_material_data_sheet_07-07_en.pdf) 2013. szeptember 11.
22. Autodesk Wikihelp, <http://wikihelp.autodesk.com>, 2013. szeptember 5.
23. Lajos T. : Az áramlástan alapjai, Budapest: Egyetemi tankönyv kiadó, 2008, 662 p. ISBN 13: 9789630663823
24. W. Michaeli, M Schönfeld: Komplexe Formteile kühlen, Kunststoffe, 2006, Vol. 08, p. 37-41
25. Y. Wang, K-M. Yu, C. C.L. Wang, Y. Zhang: Automatic design of conformal cooling circuits for rapid tooling, Computer-Aided Design, 2011, Vol. 43, p. 1001-1010
26. J.Meckley, R. Edwards: A Study on the Design and Effectiveness of Conformal Cooling Channels in Rapid Tooling Inserts, Technology Interface Journal, 2009, Vol. 10, No. 1, ISSN# 1523-9926
27. Terluran GP 35 adatlap, https://www.styrolution.com/Product/ABS_Terluran-GP-35_SKU300600120829_lang_de_DE.html, 2013. szeptember 11.
28. Litauszki Katalin: Prototípus szerszámbetétek temperálásának fejlesztése, diplomamunka, Budapest, 2012