

### 1.3. MŰANYAG FRÖCCSÖNTŐ SZERSZÁMBETÉTEK SZINTEREZÉSI TECHNOLOGIÁJA

*Szerzők: Hatos István, Hargitai Hajnalka, Kovács József Gábor*

#### 1.3.1 Bevezetés

A fröccsöntés napjainkban az egyik legmeghatározóbb polimer feldolgozási technológia, gyakorlatilag a műanyag termékek több mint egyharmadát ezzel az eljárással állítják elő. Az olvadáspontja fölé melegített polimer ömledéket nagy sebességgel szűk beömlő nyíláson át zárt szerszámba fecskendezik, ahol a kis viszkozitású ömledék kitölti a termék geometriájának megfelelő teret. A zárt szerszámüregben nagynyomáson kihűlő polimerből alakul ki a fröccsöntött (3D) termék. A fröccsöntés szakaszosan ismétlődő eljárás, gazdaságosságát döntően befolyásolja az ismétlődő szakaszok hossza, az a ciklusidő.

A fröccsöntési ciklus legmeghatározóbb része a hűtési idő, amely szerszámtól, feldolgozási hőmérséklettől, darabtérfogattól és geometriai összetettségtől függően a teljes ciklus több mint felét is kiteheti. A járműiparban számos olyan alkatrész van, amelyek gyártásánál a nagy térfogatuk, összetett geometriájuk, illetve az alkalmazott műszaki műanyag nagy feldolgozási hőmérséklete miatt a hűtésnek különösen nagy jelentősége van. A termék hűtésének optimalizálása tehát rendkívül fontos része a szerszámtervezési folyamatnak. Az ún. formakövető hűtőcsatornák kialakításával, amely szinte kizárólag csak a gyors prototípus gyártási technológiákkal lehetséges, nemcsak a hűtési hatékonyság, de a termék minősége is javítható [1].

Az 1.3 fejezet a szelektív lézer szinterezés, ezen belül is a DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*) technológiával foglalkozik, bemutatja az eljárás jellemzőit, előnyeit és korlátait formakövető hűtőcsatornával rendelkező fröccsöntő szerszámberendezések gyártásában.

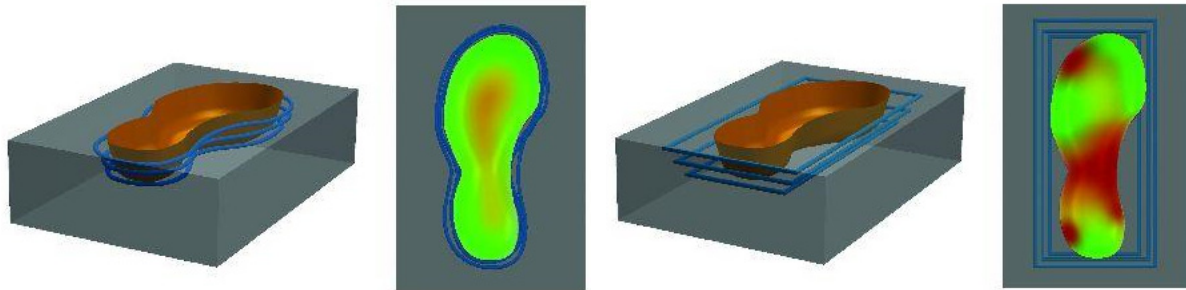
#### 1.3.2. A hűtés optimalizálása fröccsöntő szerszámberendezésekben

A fröccsöntés gazdaságossága a fröccsöntési ciklusidő csökkentésével, azon belül a hűtési idő csökkentésével jelentősen javítható. A hűtési idő a szerszám hőelvonó képességének fokozásával csökkenthető. A termék minőségét nagymértékben befolyásolja a hőelvonás egyenletessége, tehát a hűtés intenzitását úgy célszerű fokozni, hogy az minél kisebb hőmérséklet különbségeket okozzon a munkadarabban [1, 2].

Ez a kettős cél hagyományos hűtési rendszereknél – ahol a hűtőköröket fűréssal állítják elő – sokszor nem megvalósítható. Kialakulhatnak olyan részek, ahol a hűtési rendszer nem tud megfelelő intenzitással hőt elvonni. Az ideális egy olyan hűtőrendszer lenne, ahol a szoftveresen vagy tapasztalati úton tervezett hűtőkörök, akár változó keresztmetszetű csatornái tetszőleges nyomvonalon haladhatnak.

A forma- vagy kontúrkövető hűtés (*conformal cooling*) olyan speciális szerszámhűtési kialakítás, ahol a hűtőrendszer követi a formaüreg geometriáját. Az ilyen hűtőkörök előnye főleg összetett geometriájú fröccs termékek gyártásánál mutatkozik, ahol a csatlakozó egyenes

furatokkal kialakított hűtőrendszer, nem tud egyenletes hőmérséklet eloszlást biztosítani. A formakövető hűtés a hagyományosnál egyenletesebb hőelvonása az optimálisan elhelyezett hűtőkörök és a termék fala közötti egyenletes távolság miatt jelentkezik (1.3.1. ábra).



1.3.1. ábra: Hagományos (bal) és formakövető (jobb) hűtés  
(a piros szín nagyobb hőmérsékletet jelent) [3]

Az azonos hőelvonás kisebb belső feszültséget és deformációt okoz. Az intenzív hűtés hatására a fröccsöntés ciklusideje akár 30-50%-kal is csökkenthető. A hűtés további előnye a szerszám kisebb és egyenletesebb hőterhelése, ami a szerszám élettartamát növelheti [2, 3].

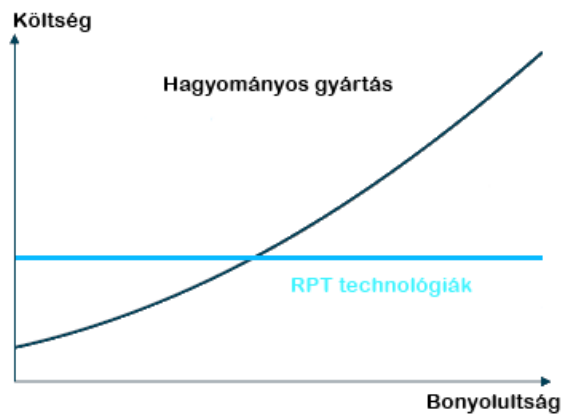
Az ún. formakövető hűtőcsatornák kialakításával nemcsak a hűtési hatékonyság, de a termék minősége is javítható [1]. Hassan és kutatótársai például azt találták, hogy a hűtőcsatornák helyzete jelentősen befolyásolja a zsugorodást [4]. Egy másik munkában kimutatták, hogy a legrövidebb hűlési időt eredményező hűtőrendszer kialakítás nem szükségszerűen az optimális hőmérséklet eloszlást eredményezi a termékben, tehát a tervezésnél ezt a szempontot is szem előtt kell tartani és figyelembe kell venni [5]. Emellett a hűtőcsatorna alakja is jelentős szerepet játszik a hőátadásban, például téglalap keresztmetszet esetén a hűtés javult [6]. Előző okok miatt számos kutatómunka fókuszál a hűtés optimalizálás, hűtőrendszer tervezés és gyártás területére.

Egyszerűbb formakövető hűtésű szerszámok gyárthatók hagyományos technológiákkal is, de a bonyolult és tetszőleges belső hűtőkör rendszerek előállítására kizárólag a rétegről-rétegre építő úgynevezett gyors prototípusgyártó technológiák, köztük a DMLS alkalmasak [7-9].

### 1.3.3. Gyors prototípusgyártás: fémporok lézeres szinterezése

A gyors prototípusgyártó (Rapid Prototyping, RP, RPT) – közismerten 3D nyomtató – technológiákat ma már számos területen alkalmazzák az orvosi alkalmazásoktól az otthoni hobbi felhasználásig. Az eljárások közös jellemezője, hogy a gyártandó darab 3D modelljét szoftveresen vékony rétegekre szelgetik, majd a szelgetelt rétegek egymásra építésével (vízszintes keresztmetszetek) rétegről-rétegre alakítja ki a fizikai terméket. Az RPT eljárások a hagyományos megmunkálásoktól eltérően, nem egy ráhagyással növelt előgyártmányból lebontanak, hanem általános alapanyagból (pl.: por, folyadék) felépítenek, akár nagybonyolultságú munkadarabokat is szerszámok nélkül. A gyártási költségekre a

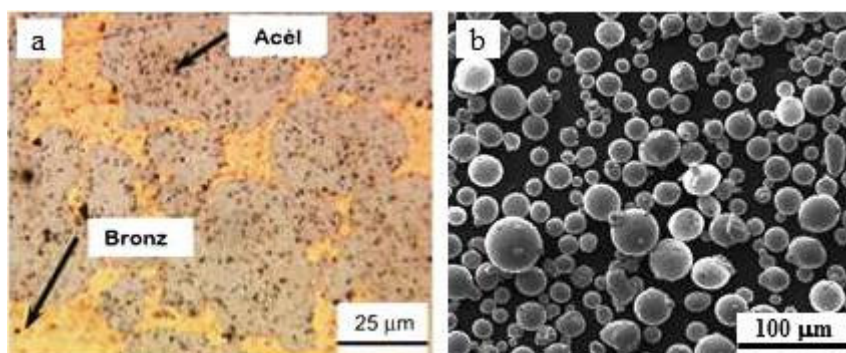
hagyományos gyártási eljárásokkal ellentétben a munkadarab bonyolultsága nincs jelentős hatása (1.3.2. ábra), azok leginkább a darab térfogatától függnek.



1.3.2. ábra: Hagyományos és RPT gyártás költségei [10]

A formakövető hűtőkört tartalmazó szerszámbetétek jellemzően szerszámacélból készülnek, gyártásukhoz alkalmas „nyomtatót” több gyártó is kínál. Fémporok „3D nyomtatására” alkalmas berendezések már a ’90-es években kereskedelmi forgalomba kerültek, szélesebb körben való alkalmazásuk csak 10 évvel később indult meg. Az alapanyag minden esetben finomszemcsés fémpor, amelyet egy porterítő mechanizmus terít vékony (jellemzően 20-40  $\mu\text{m}$ ) rétegekben. Minden egyes porterítés után egy koncentrált lézersugár pásztázza végig a termék adott rétegbe eső keresztmetszetét. A pásztázott területen a por „összeolvad”, a nem pásztázott részeken a por érintetlen marad és egy későbbi gyártáshoz újra felhasználható marad [3].

Kezdetekben kétféle rendszer jelent meg a piacon. A DTM vállalat által fejlesztett ún. indirekt (két lépcsős) eljárással polimer bevonatú fémporok szinterezhetők. A szinterézést követi egy hőkezelés, amelynek célja a polimer eltávolítása. A megmaradó fém mátrix üregeit egy az alapfémnél kisebb olvadáspontú fémmel (jellemzően bronz) feltöltik (infiltrálás) (1.3.3. ábra a).



1.3.3. ábra: (a) indirekt eljárással gyártott, szinterezett darab metszete [11],  
(b) kötőanyag nélküli fémpor a direkt eljáráshoz (DMLS) [12]

A direkt eljárás (DMLS, Direct Metal Laser Sintering) kötőanyag nélküli fémporokat használ (1.3.3. ábra b). Az első kereskedelmi forgalomba kerülő DMLS rendszer 1995-ben jelent meg (EOSINT M250, fejlesztők: EOS, Electrolux Rapid Development). A CO<sub>2</sub> lézerrel felszerelt gépek kezdetben bronz-nikkel alapú porokkal 100 µm rétegvastagsággal dolgoztak. 1999-ben jelent meg az első vas alapú fémpor 50 µm rétegvastagsággal, majd nem sokkal később már a 20 µm építési rétegvastagság is elérhetővé vált. 2004-ben jelent meg a szilárdtest lézerrel felszerelt EOSINT M270 (1.3.4. ábra a) [13-15].



1.3.4. ábra: EOSINT M270 berendezés (bal)

és a gyorsprototípus gyártók piaci megoszlása 2010-ben (jobb) [16]

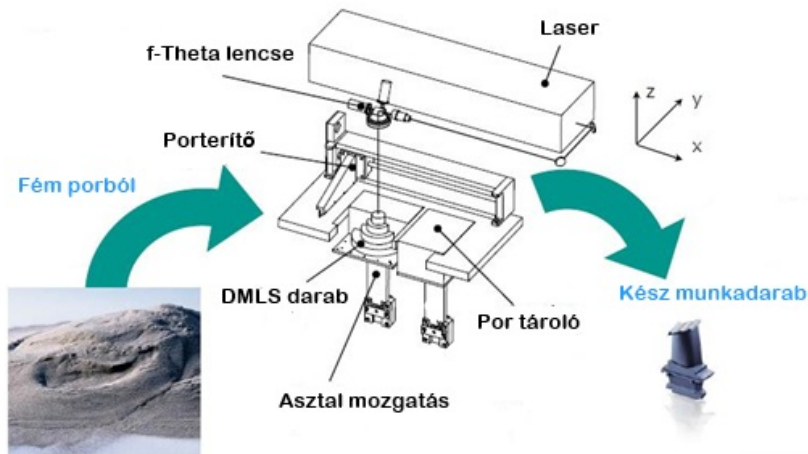
Napjainkban több vállalat kínál szerszámgyártásra alkalmas direkt technológiát (1.3.4. ábra):

- EOS (DMLS, Direct Metal Laser Sintering)
- Concept Laser GmbH (LaserCUSING)
- SLM Solutions GmbH (MTT) (SLM, Selective Laser Melting)
- ReaLizer GmbH (SLM, Selective Laser Melting)
- Renishaw (MTT) (SLM, Selective Laser Melting)
- 3DSystems/Phenix (DMP, Direct Metal Printing).

Legnagyobb piaci részesedése az EOS cégnek van a DMLS technológiával.

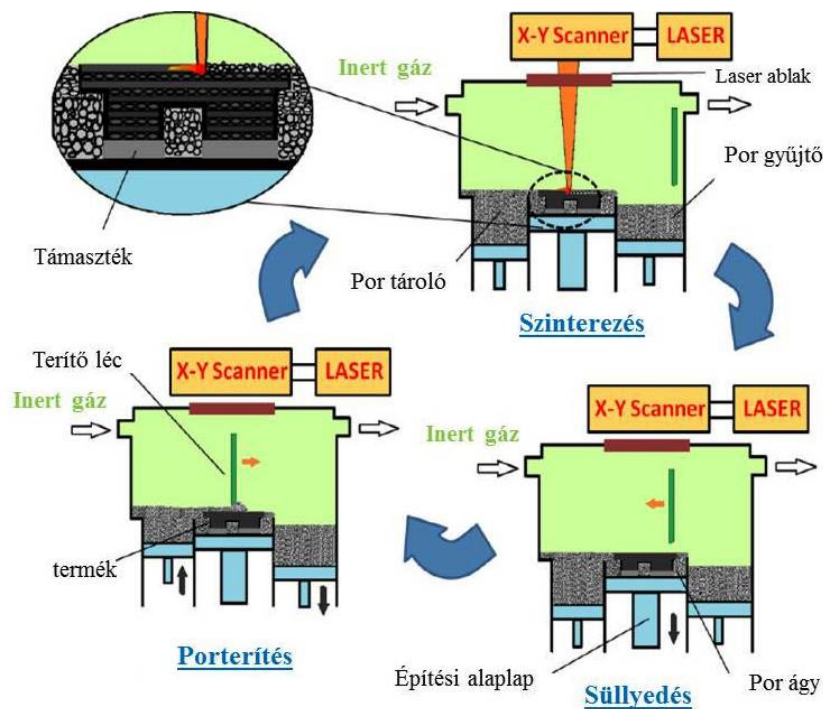
### 1.3.4. DMLS technológia

A DMLS technológia egy közvetlen felépítő eljárás, ahol a fémporok felületét lézersugárral olvasztják meg. A berendezés elvi felépítése a következő ábrán látható (1.3.5. ábra).



1.3.5. ábra: A DMLS berendezés elvi felépítése [17]

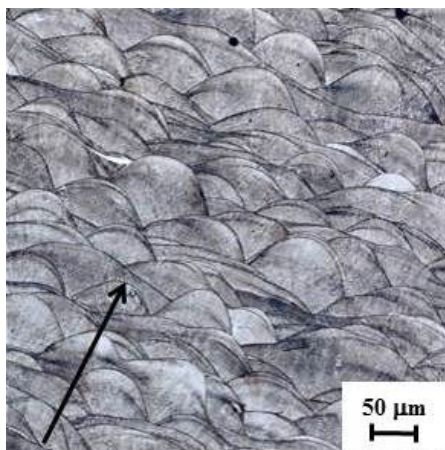
A lézeres szinterezőnek a rétegről-rétegre való építési módból adódóan szakaszosan ismétlődő működése van. Először a porterítő mechanizmus a rétegvastagságnak megfelelően egy új réteg port terít el a munkatérben. Minden egyes terítés után a termék adott rétegbe eső keresztmetszetét egy koncentrált lézersugár először a kontúrokon majd a teljes keresztmetszetben szinterezi. A pásztázott területeken a por „összeolvad”, a nem pásztázott részeken a por érintetlen és későbbi gyártáshoz újra felhasználható marad. A keresztmetszet szinterezése után az asztal lesüllyed egy rétegvastagságnyi, és a porterítő újabb réteg port terít szét. A folyamat addig ismétlődik, amíg a darab el nem készül (1.3.6. ábra).



1.3.6. ábra: A gyártás folyamata [18]

A rétegenként történő lézeresugaras összeolvadás eredményeként egy, az 1.3.7. ábrán látható „legyezőszerű” struktúra alakul ki az építés irányú (Z) keresztmetszetben.





1.3.7. ábra: Fém munkadarab keresztmetszetéről készített mikroszkópos felvétel N=50X nagyításban (a nyíl a szinterezés irányát jelöli) [3]

A fémek lézeres szinterezése a polimerek szinterezésével (SLS) ellentétben minden esetben igényli a felépítendő daraboknak egy sík kiinduló felülethez való rögzítését, illetve az építési szempontból kritikus felületek (kis meredekségű alsó felületek) támasztékkal való biztosítását (1.3.8. ábra).



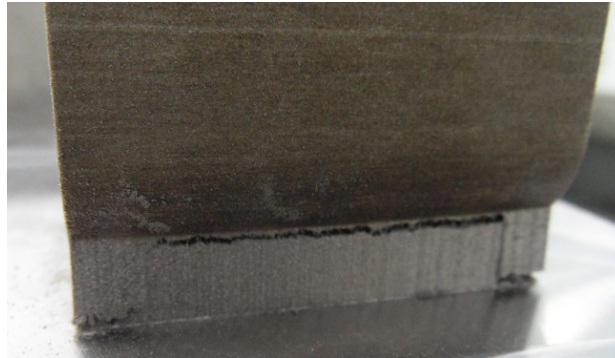
1.3.8. ábra: munkadarab támasztékkal ellátva (bal), a támaszték belső szerkezete (jobb)

A támasztékok képzése szoftveresen történik. A RP gyártást támogató szoftverek rendelkeznek a támasztékok tervezését támogató automatikus és manuális funkciókkal. A támasztékok anyaga a munkadarabéval megegyező, de nem tömör, hanem üreges szerkezetű. A támaszték kialakítását az alábbi okok indokolják:

- Annak érdekében, hogy a legfelső szinterezett réteg biztosan kötődjön az alatta lévő rétegekhez, akkora hőbevitelt kell alkalmazni, ahol a hőhatási övezet több rétegre kiterjed. Ha a szinterezett terület alatt nincs tömör anyag, akkor rétegvastagságot meghaladó porréteg szilárdul meg, illetve jelentős részlegesen kötött szemcse tapad a felülethez. Következmény a nem geometria szerinti méret, illetve rossz felületi érdesség.
- A terített por rétegvastagsága 20 μm terítés esetén a szinterezett felület felületi érdességének nagyságrendjébe esik. Normál építési folyamat esetén a porterítő

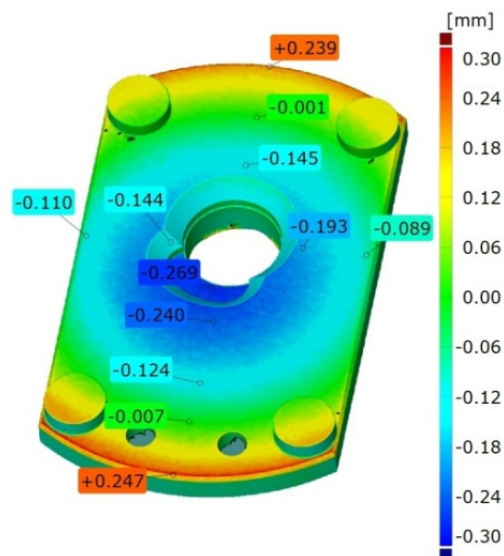
fizikailag érintheti az előzőleg szilárdított réteget. Ha a már felépített rész nincs megfelelően rögzítve az alaplaphoz, akkor a porterítés során elmozdulhat.

- Szinterezés során jelentős belső feszültségek keletkeznek. A darab nem megfelelő rögzítése esetén a belső feszültségek hatására a már szinterezett részek deformálódnak. Ez a porterítővel való ütközést, illetve pontatlan gyártást eredményez. Nem megfelelő erősségű támaszték képzés esetén a szinterezett rész elválhat a támasztól (1.3.9. ábra).



1.3.9. ábra: Belső feszültségek hatása

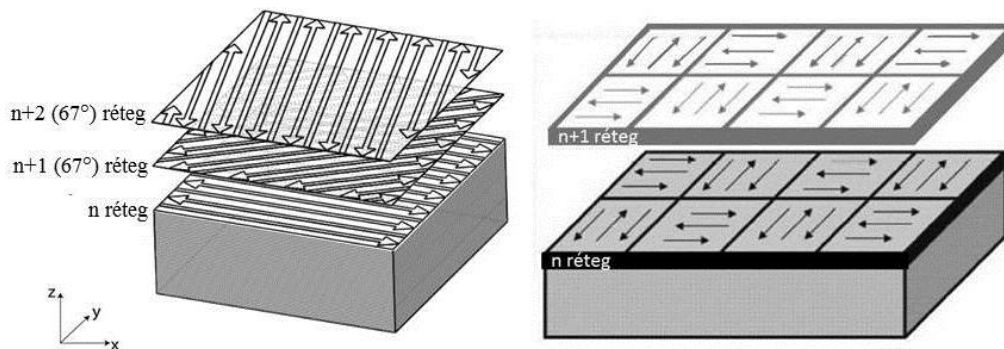
A belső feszültségek okát és mértékét befolyásoló tényezőket számos irodalom vizsgálja [12, 19-26]. Az irodalmi elemzés után kijelenthető, hogy a nagyobb energia bevitel nagyobb belső feszültséget eredményez. Kiseb belső feszültség várható gyorsabb pásztázási sebesség alkalmazásával, a pásztázási távolság növelésével és nagyobb rétegvastagság alkalmazásával [24]. A belső feszültség nagyobb lesz hosszú pásztázási szakaszok alkalmazása esetén. Sík munkadarabok az alaplappal párhuzamos építés esetén az alapról való levágás után nagymértékű deformációt szenvedhetnek. A deformáció mértéke jellegzetes, a darab középpontból induló közel koncentrikus körök mentén változik (1.3.10. ábra).



1.3.10. ábra: Belső feszültségek hatása (a színek a deformáció mértékét mutatják) [19]

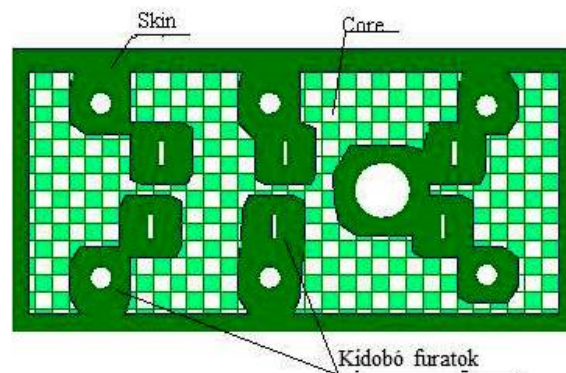
A belső feszültségek csökkentésére az általánosan alkalmazott rétegenként változó irányú párhuzamos pásztázási stratégia helyett módosított stratégiákat fejlesztettek ki (1.3.11. ábra).

Ezek a stratégiák a kisebb belső feszültséget a pásztázási hosszak csökkentésével és pásztázási irányok gyakori változtatásával érik el [20-22].



1.3.11. ábra: bal: hagyományos pásztázási stratégia [20], jobb: módosított stratégia („island” pásztázás, Concept Laser GmbH) [21]

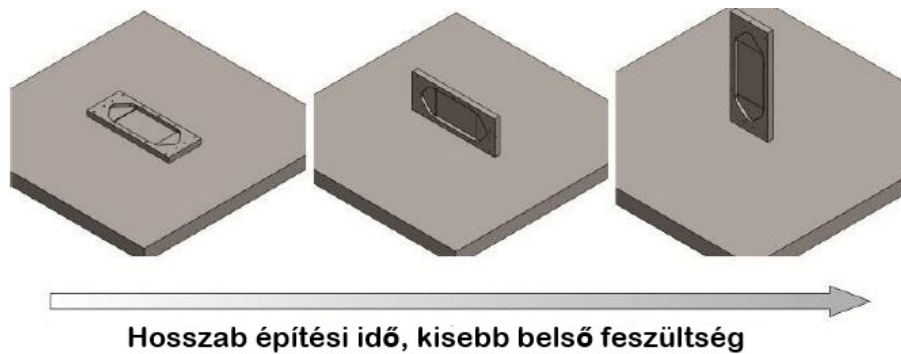
Nagyméretű szerszámok gyártásánál alkalmazható a belső feszültségek- és az építési idő csökkentése érdekében a *Skin-Core* építési mód [17, 27]. A külső felületeket néhány mm szélességben a legkisebb rétegvastagsággal (0,02-0,05 mm) építik, a belső mag részt pedig sakktábla stratégia szerint pásztázza a lézer minden második rétegben (1.3.12. ábra). A külső réteg a lehető legnagyobb szilárdságú és keménységű lesz, és a belső rész gyorsabban elkészül.



1.3.12. ábra: A *Skin-Core* szerkezet egyetlen rétege az integrált kidobó furatokkal [17]

A pásztázási hosszak csökkentésének további lehetséges módja a darab síkmetszeteinek területét minimalizáló nyomtatási pozícióba való forgatás. Az ilyen típusú elhelyezés a réteg terítések számát és az építési időt jelentősen növelheti.





1.3.13. ábra: Modell elhelyezés hatása a belső feszültségekre és építési időre [23]

A gyártás befejeztével az alaplaphoz támasztékkal kötött munkadarabot, a támasztékon keresztüli levágással eltávolítjuk az alaplaptól, a támaszték nyomát pedig mechanikusan eltávolítjuk.

Az alaplapról való levágás utáni belső feszültségek okozta deformáció a levágást megelőző feszültség csökkentő hőkezeléssel megelőzhető. Az egyes fémporok adattáblázata tartalmazza az ajánlott hőkezelések paramétereit.

A fémek szinterézése az oxidáció elkerülése érdekében védőgáz közegben történik. Acél porok esetén nitrogén az alumínium és titán poroknál argon védőgázt használunk. A nitrogén ellátás történhet külső forrásból vagy beépített nitrogén generátor segítségével is.

### 1.3.5. A DMLS technológia alapanyagai

A DMLS technológia egy közvetlen felépítő eljárás, ahol a fémporok felületét lézersugárral olvasztják meg. A felhasználható fémporok választéka széles, a gyártók különféle iparágak igényeinek megfelelően. Szerszámgyártáshoz alkalmas fémporkeverék a jelentősebb gyártól mindegyikénél megtalálható. Fröccsöntő szerszámgyártáshoz leggyakrabban az 1.2709 (18% Ni Maraging 300, X3NiCoMoTi 18-9-5) szabványszámú acéllal megegyező kémiai összetételű fémporkeveréket használnak.

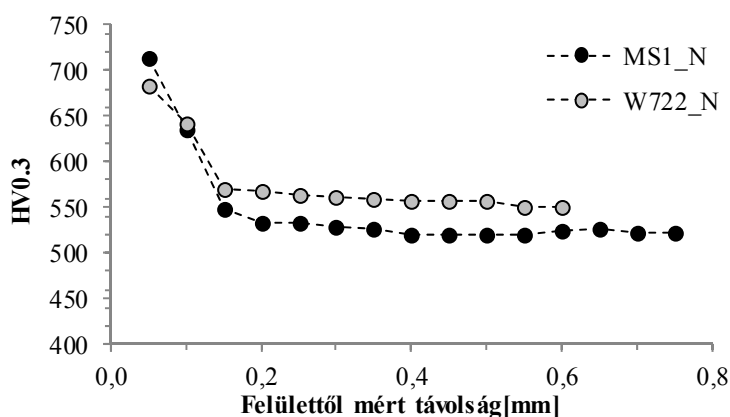
A maraging típusú acél elnevezése az angol „martensitic aging” kifejezésből született. Az acél korbont gyakorlatilag nem tartalmaznak, viszont nagy százalékban tartalmaz nikkelt, kobaltot és molibdént. Az acélok a kiválóan keményíthető ötvözetek sorába tartoznak, nagy szilárdságukat a martenzit megeresztése során létrejövő intermetallikus fázisoknak köszönhetik [28].

A gyártók a fémporkeverékeiket saját márkanév alatt forgalmazzák. A továbbiakban szereplő anyag tulajdonságok EOSINT M270 típusú 200W névleges lézer teljesítményű szinterezőn, EOS MaragingSteel MS1 (1.2709) porból készített próbatestek vizsgálata és gyártói adatok alapján vannak feltüntetve. Az MS1 darabok legfontosabb tulajdonságainak összehasonlítását a gyakori szerszámanyagokkal az 1.3.1. táblázat tartalmazza.

1.3.1. Táblázat: Szerszáanyagok tulajdonságai [29-32]

	IMPAX SUPREME (P20)	ORVAR SUPREME (H13, 1.2344)	W722 VMR (1.2709)	MS1 (1.2709)
Sűrűség [kg/m <sup>3</sup> ]	7800	7800	8100	8100
Szakító szilárdság max. [MPa]	1020	1820	2000	1950
Folyáshatár max. [MPa]	900	1520	1800	1900
Keménység max. [HRC]	50	54	55	54
Rugalmassági modulus [GPa]	205	210	200	180
Hővezetési tényező (adott hőmérsékleten mérve) [W/mK]	28 (200°C)	25 (20°C)	21 (20°C)	20 (20°C)
Fajhő [J/kgK]	460	460	420	450

A szinterezett darabok az azonos összetételű hagyományos darabokkal megegyező mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek [31, 32]. A termékek hagyományos módon hőkezelhetők, forgácsolhatók és bevonatolhatók. Az MS1 alapanyagú munkadarab keménysége építés után ~38-40 HRC, a maximális keménység eléréséhez a szokásos hőkezelés ~500°C-on való 3-5 óra hőtartás, majd levegőn hűtés. A MS1 szinterezett darabokat nitridálás esetén nem szükséges több lépcsőben hőkezelni, a nitridálással egy műveletben a kiválások keményítés is végbemegy. A 1.3.14. ábra 3.1.14. ábra az MS1 acél és az azonos összetételű hagyományosan gyártott szerszámacél kéreglefutási görbéjét mutatja be karbonitridálás után.



3.1.14. ábra: Azonos összetételű karbonitridált DMLS darab (MS1) és hagyományos acél (W722) kéreglefutási görbéje (saját mérési eredmény)

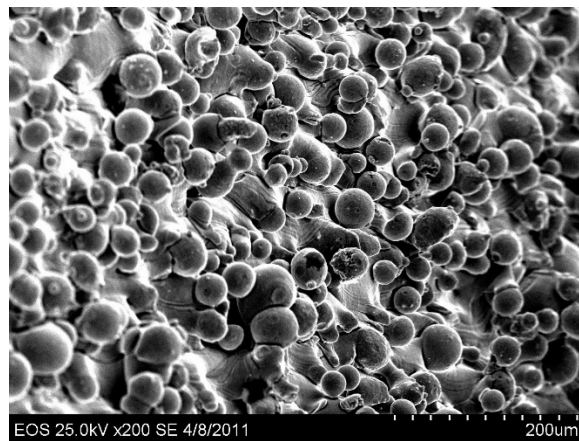
### 1.3.6. A DMLS technológia gyártási korlátai, felületi érdesség és pontosság

A gyártók a különböző iparági igényeknek megfelelő munkaterű szinterezőket kínálnak. Az ékszer- és fogászati termékek gyártásának gépei kisméretű munkatérrel rendelkeznek. A standard méretű, szerszámgyártásra is használt gépek alaplapja 250x250 mm, a maximális építési magasság 200-300 mm.

Az RPT és CAD rendszerek közti adatcserére általánosan az STL (Standard Tessellation Language) fájlok segítségével történik. Az STL egy felületleíró adatformátum, a munkadarab felületét háromszögek segítségével írja le. Az STL fájl minden háromszöghöz eltárolja a csúcspontok (x,y,z) koordinátáit. Minden háromszöghöz meghatározandó a normálvektorának iránya is. A normálvektornak minden esetben a felületből kifelé kell mutatnia, mert ez alapján határozza meg a nyomtató szoftver a nyomtatandó keresztmetszeteket [33].

Az STL file 3D felületeket csak közelíti. RPT gyártásnál nem a tervezett modell kerül közvetlenül gyártásra, hanem annak háromszögekkel közelített mása. A közelítés pontosságát a háromszög generálás sűrűsége határozza meg. A CAD programok paramétereit kínálják fel a háromszögesítés indítása előtt. Az egyik a húrhiba, ami a legnagyobb távolság, amely a valóságos kontúr és a generált háromszögek között lehet, a másik az a legnagyobb központi szög, amely a kontúrt közelítő élhez húzható. Nem elég finom háromszögesítés esetén a nyomtatott darab 3D felületein látszódnak a síkfelületek, illetve a CAD modellhez képest méretbeli eltérések adódnak. A túl finom háromszögesítés indokolatlan méretű STL fájlt eredményez. A CAD rendszerek nem minden esetben generálják hibátlanul az STL fájlokat. Ilyen hibák lehetnek a hálón keletkező rések, felülettorzulások, átlapolások, alul- vagy túlhatározott pontok stb., a hibák javítása célszoftverekkel lehetséges (pl. Materialis Magaics RP) [33].

RP technológiáknál a gyártott munkadarab az STL modell alapján meghatározott adott vastagságú szeletekből épül fel, így az csak közelíti az eredeti modellt (1.3.21. ábra a). A szeletelési lépcsők nagyságából a munkadarabok elméleti felületi érdessége meghatározható. A munkadarabok tényleges felületi érdességét a lépcsőhatáson kívül, a technológiai felületi érdesség és a részlegesen átolvasztott porszemcsék (1.3.15. ábra) mennyisége és elhelyezkedése együttesen alakítja ki.

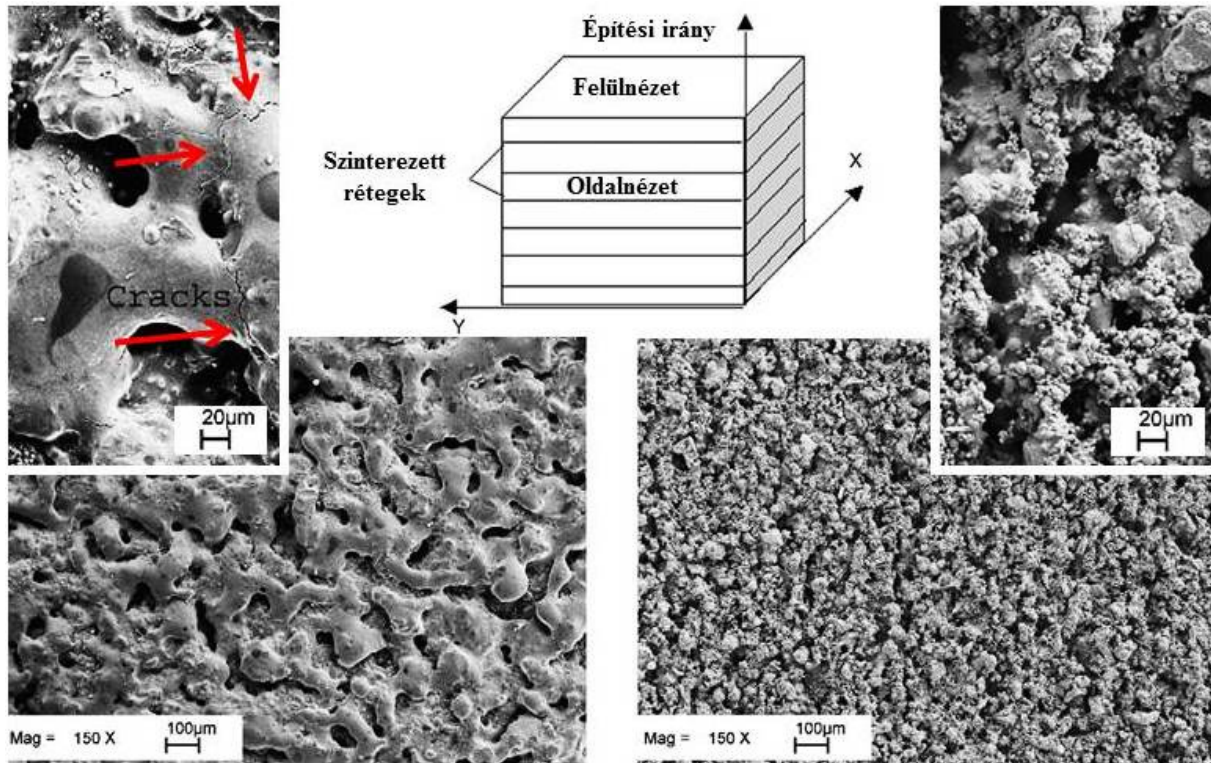


1.3.15. ábra: Részlegesen átolvasztott porszemcsék a felületen

### **Felületeken kialakuló mikroszerkezet**

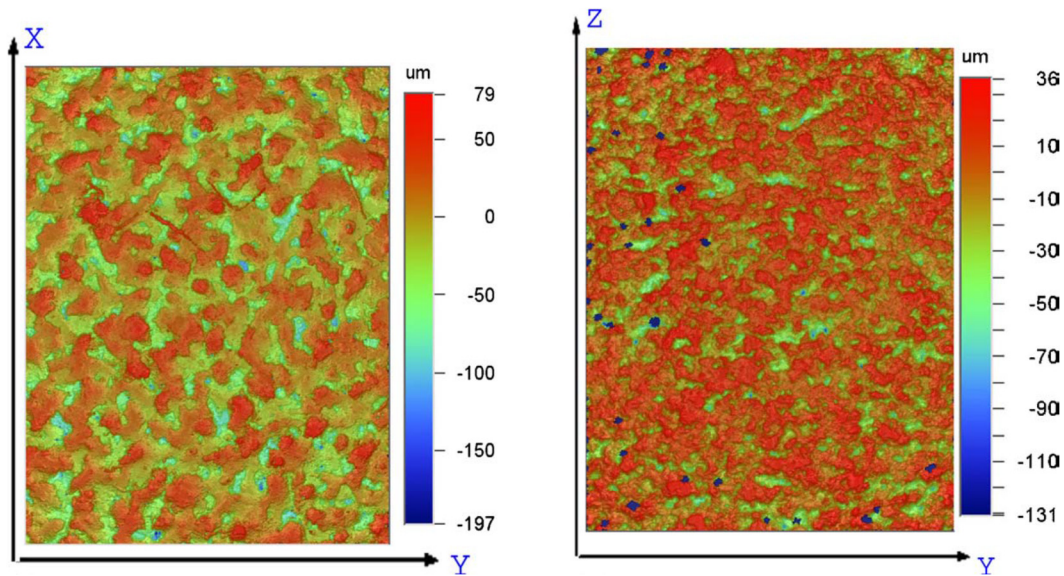
A DMLS technológiával készített darabok felületei morfológiájának vizsgálatával számos szakirodalomban foglalkoztak. Wang és társai EOSINT M250 berendezésen végzett építési kísérleteiknél azt tapasztalták, hogy az építési irányra merőleges felület durvább, mint az

oldalsó felületek, továbbá a felületen az átlagos pórusméretnél nagyobb pórusok találhatóak (1.3.16. ábra). A szinterezett darab nemcsak durva felületű, de a hősokk következtében kialakult mikrorepedések hálózata is megfigyelhető a felületen [34].



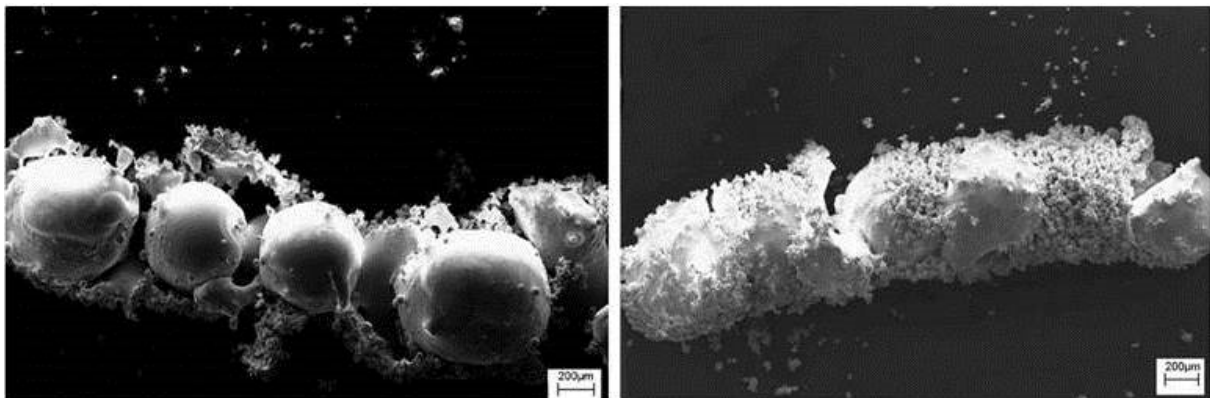
1.3.16. ábra: A szinterezett felületek szerkezete (SEM) az építési irányra merőlegesen (bal) és párhuzamosan (jobb) [34]

Míg felülnézetben nagy kör alakú szemcséket lehet látni, oldalnézetben finomabb a felület, és az építési rétegek határfelületén elnyúlt pórusok jönnek létre, többnyire a meg nem olvadt részecske határok mentén. A két oldal mélység és magasság különbségei között jól láthatók a 3D topográfiai felvételeken is, ahol a magasság értékeket a színes skála mutatja [34].



1.3.17. ábra: 3D topográfiai felvétel lézerszinterezett alkatrész felületéről az építési irányra merőlegesen (bal) és párhuzamosan (jobb)

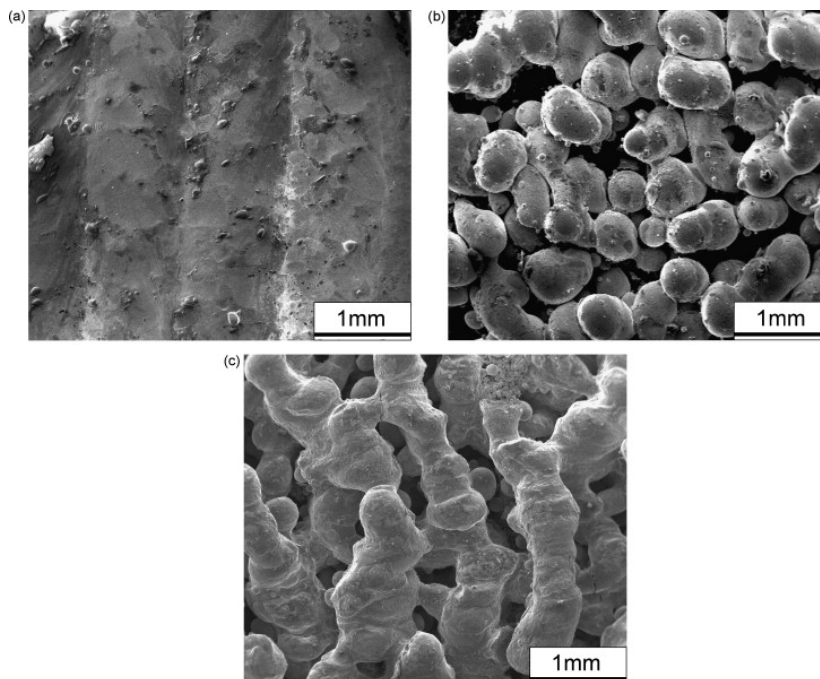
Simchi és Pohl ugyanolyan berendezéssel egy vonalban végzett pásztázást követően az előzőekhez hasonló mikroszerkezetet figyeltek meg (1.3.18. ábra) [35].



1.3.18. ábra: Egy vonalban végzett pásztázást követően készített SEM felvételek (P - 215 W, v - 50 mm/s, N<sub>2</sub> atmoszféra) (bal): felülnézet; (jobb) oldalnézet [35]

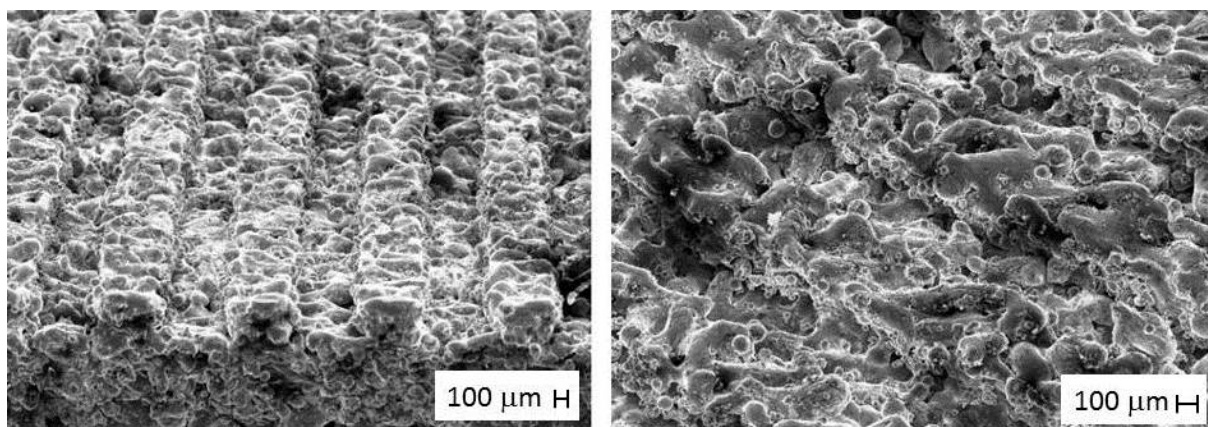
Gu és Shen különböző gyártási paraméterek hatását vizsgálták a felületen kialakuló mikroszerkezetre [36]. Nagyobb lézer teljesítmény és kisebb pásztázási sebesség összefüggő, nagysűrűségű (tömör) szinterezett felületet, míg kisebb pásztázási sebesség és ugyanakkora lézer teljesítmény egyenetlen, durva és agglomerátumokat tartalmazó felületet eredményezett. Kis lézer teljesítmény és kis pásztázási sebesség hatására porózus szerkezet jött létre, felületre nyitott pórusokkal (1.3.19. ábra). Hasonló eredményeket kaptak Sateesh és társai is egy hasonló kísérletsorozatban EOSINT M250 berendezésen végzett kísérletekkel [37].





1.3.19. ábra: Lézerszinterelt minták felületi struktúrája különböző gyártási paraméterek mellett: (a)  $P = 300 \text{ W}$ ,  $v = 0.05 \text{ m/s}$ ; (b)  $P = 300 \text{ W}$ ,  $v = 0.08 \text{ m/s}$ ; (c)  $P = 250 \text{ W}$ ,  $v = 0.05 \text{ m/s}$  [36].

Bineli és csoportja szisztematikusan változtatták az EOSINT M270 berendezés gyártási paramétereit saját tervezésű mikroreaktor előállításához. A kis és nagy lézer energia megfelelő helyen történő alkalmazásával porózus mikroszatornákat alakítottak (1.3.20. ábra), ugyanakkor a megfelelő részeken nagymértékben tömör szerkezetet hoztak létre. Gu és Shen kísérleteinél [36] megfigyelt durva és gömbszerű agglomerátumokat tartalmazó felület Bineli és társai kísérleteinél is jelentkezett [23].

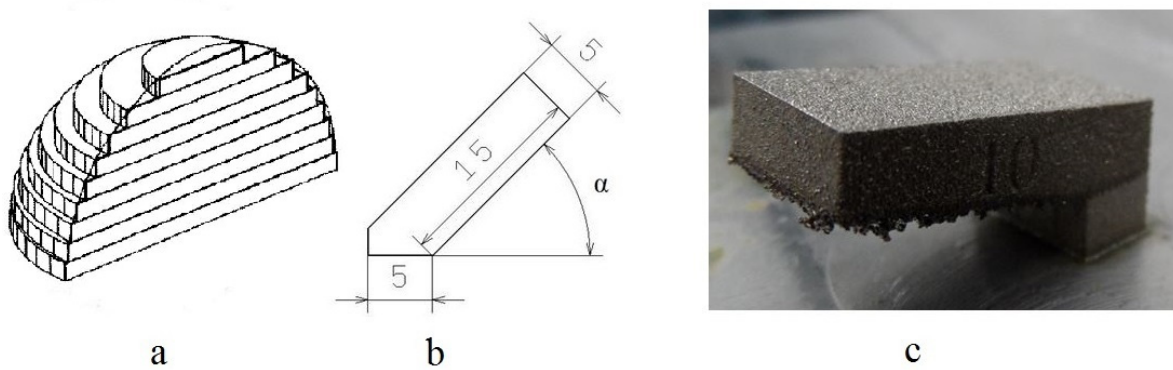


1.3.20. ábra: Lézerszinterezéssel kialakított mikroszatornák elektron mikroszkópos képei [23]

#### 1.1.1. DMLS alkatrészek felületi érdessége

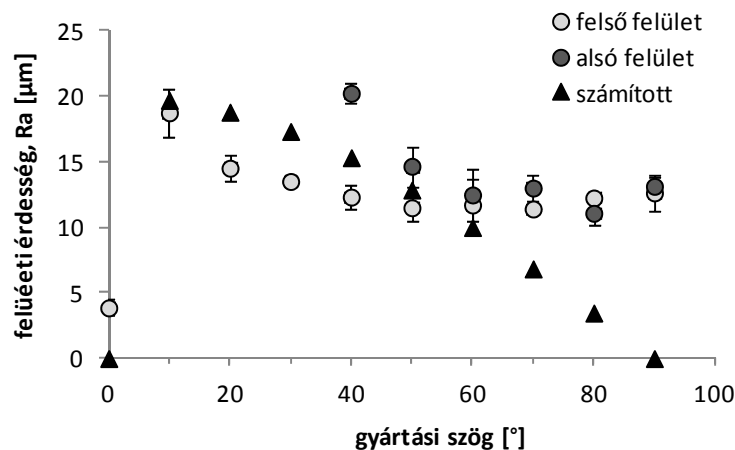
A tényleges felületi érdesség előrejelzésére matematikai modellel lehetséges. Az építési orientációnak mérhető hatása van a felületi érdességre és a várható geometriai méretekre. Az

építési orientáció hatása a mérhető, a méréshez használt próbatetekben az  $\alpha$  szöget változtattuk  $10^\circ$ -onként a  $0^\circ$ - $90^\circ$ -os tartományban (1.3.21. ábra b és c).



1.3.21. ábra: (a) 3D modellek szeletelése, az építési rétegek kialakítása, (b) próbatetek rajza az építési irány megadásával, (c) szinterezett próbatest

A változó felületi érdességek a próbatetek építési alaplappal  $\alpha$  szöget bezáró két párhuzamos oldalán (alsó és felső oldal) mérhetők, valamint az elméleti (lépcsőzöttségéből adódó) felületi érdesség értékek számíthatók az  $\alpha$  építési szög függvényében (1.3.22. ábra). A legkisebb érdesség  $\alpha=0^\circ$  értéknél az alaplappal párhuzamos minta felső oldalán mérhető. Kis  $\alpha$  értékek esetén a szeletelési lépcsőzetesség szabad szemmel is látható a felületen. A felületek meredekségének növelésével a szeletelési hiba és felületi érdesség csökken.



1.3.22. ábra: Felső és alsó oldal érdesség értékei  $\alpha$  szög függvényében, valamint az elméleti (lépcsőzöttségéből számított) felületi érdesség [38]

Az alsó oldal felületi érdessége kis  $\alpha$  értékeknél a  $10^\circ$ - $30^\circ$  tartományban nem mérhető. Kis meredekségű alsó felületek esetén, a szeleteléssel generált modell egyes rétegei az alatta levőhöz képest nagymértékű túlnyúlásokkal rendelkeznek, ezek megtámasztás nélküli építése bizonytalan. A belső feszültségek hatására a vékony rétegek könnyen deformálódnak, a deformáció pedig növeli a porterítés közbeni kontaktust a porterítő léccel. Ez a gyengén kapcsolódó felület leszakadásához vagy a teljes építési folyamat leállításához vezethet. A túlnyúló felületek esetén az első megszilárdult réteg vastagsága meghaladhatja a modell szerinti

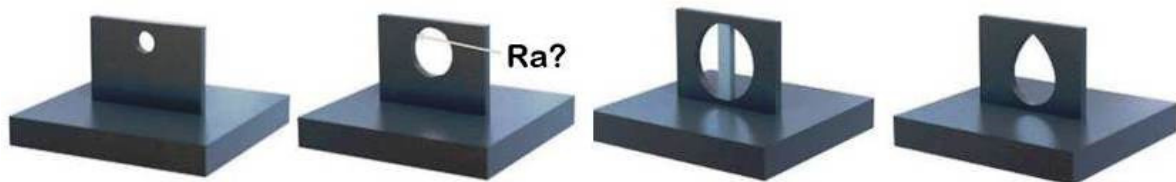
rétegvastagságot, mivel a lézer nem csak egy rétegni pörreget hevít. Az alsó szilárd felület hiánya miatt ezek a túlnyúló részek túlhevülnek, azok külső felülete a túlhevülés hatására sötétebbé válik.

A lézer szinterezett alkatrészek gyártása túlnyúló felületek esetén fokozott körültekintést igényel. Az alsó felületek  $30^\circ$ -os dőlésszögig rossz felületet eredményeznek, ami az instabil gyártási folyamat eredménye, ezek megtámasztása szükséges (1.3.23. ábra). Jó felületet és a technológiától elvárható  $\pm 0,1$  mm-es tűréseken belüli terméket az  $\alpha \geq 45^\circ$  esetén kaphatunk.



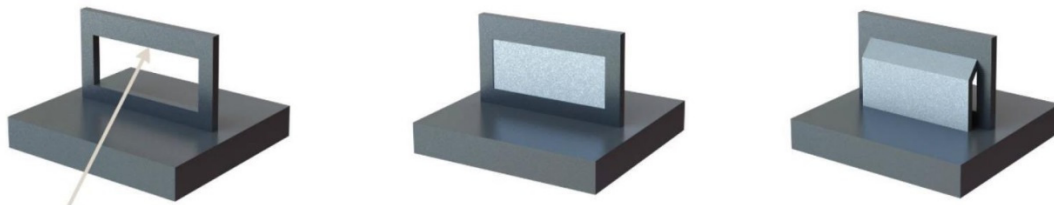
1.3.23. ábra: Kritikus alsó felületek építése (támaszték alkalmazása) [39]

A furatok gyártási problémája a kritikus dőlésszögű alsó felületek építési problémájával magyarázható. Minél nagyobb a furat átmérő, a furat felső részének annál hosszabb részen nincs meg a kellő meredeksége. A furatok az elvárt felületi érdesség, geometriai pontosság és gyárthatósági korlát függvényében támasz vagy támasz nélkül építhetők, a kisméretű furatok – átmérő kisebb, mint 10 mm – általában támasz nélkül építhetők. Amennyiben a használati funkciókat megengedik a nagyméretű furatok építési problémája a geometria módosításával könnyen megoldható (1.3.24. ábra).



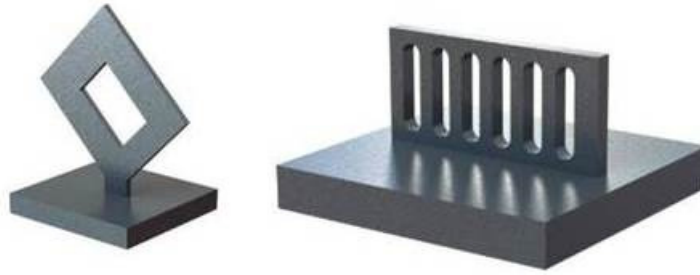
1.3.24. ábra: Furatok szinterezése [39]

Az építési alaplappal aluról párhuzamos felületek közvetlenül nem gyárthatók. Az alsó felületeket támasztékkal kell ellátni.



1.3.25. ábra: Alsó sík felületek támasztéka [39]

Alternatív megoldás lehet a munkadarab  $30^\circ$ -nál nagyobb szöggel való elforgatásával az alaplappal alsó párhuzamos felületek megszüntetése (1.3.26. ábra). Ez összetett daraboknál nagy körültekintést igényel. Amennyiben a konstrukció engedi, a darab nyomtatási szempontból öntámasztóvá tervezésével könnyen gyártható darabot nyerünk (1.3.26. ábra).



1.3.26. ábra: Forgatással illetve áttervezéssel nyomtatható darab [39]

Az előző példákban szereplő alapeometriák nyomtatási problémáival találkozunk összetett darabok nyomtatásakor is. A gépészeti alkatrészeket döntő többségben hagyományos forgácsolással történő gyártásra tervezik. A 3D nyomtatásra történő hatékony tervezés nem lehetséges a technológia ismerete nélkül. Lényegében mindent ki lehet nyomtatni, de a gazdaságos és pontos gyártás a nyomtatásra tervezett geometriák esetében biztosítható.

A bemutatott gyártási alapelvek alapján a DMLS darabok méretpontossága több tényezőtől függ (geometria, technológiai paraméterek, felületi érdesség és az esetleges belső feszültségek okozta deformáció). Kisméretű daraboknál optimális építési esetben akár  $\pm 50 \mu\text{m}$  tűrésen belül is gyárthatunk, nagyméretű darabok esetén  $\pm 0,1-0,2 \text{ mm}$ -es tűrésen belüli gyártás a reális. A lézer szinterelt darabok a felületi minőség szempontjából elmaradnak a hagyományos úton (forgácsolás, öntés) készített munkadaraboktól. A jellemző gyártás utáni átlagos felületi érdesség  $Ra 10-15 \mu\text{m}$ . A durva felületi érdesség értékek miatt szükséges lehet a munkadarabok felületének utólagos finomítása (sörétezés, forgácsolás, csiszolás, polírozás), amivel akár tükrös felületet is nyerhető [29].

Simchi különböző technológiai paraméterek (lézer teljesítmény, pásztázási sebesség és vonaltávolság, rétegvastagság) és a fémpor jellemzőinek hatását vizsgálta a sűrűsége és a mikroszerkezet kialakulására különböző acélporok alkalmazásával. Kimutatta, hogy a bevitt lézer energiájának növelésével (nagyobb lézer teljesítmény, kisebb pásztázási sebesség, kisebb távolság a pásztázások között, kisebb rétegvastagság) jobb tömörödés érhető el [35, 40]. A technológiai paraméterek mellett a fémpor jellemzői is nagymértékben befolyásolják a tömörödést. A kisebb méretű szemcsék nagyobb felületen több energiát nyelnek el, amellyel a szinterezés határfoka nő [40].

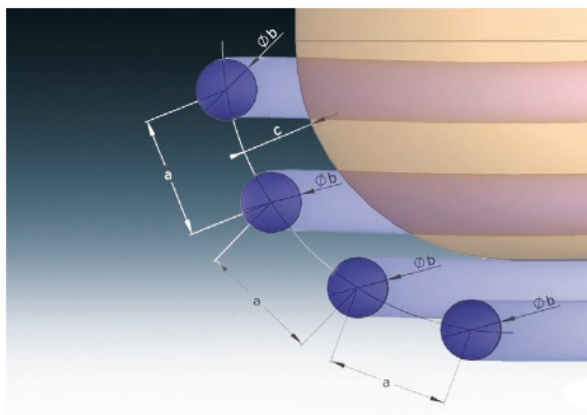
### 1.3.7. DMLS betétek formakövető hűtéssel

A formakövető hűtés gazdasági és minőségi előnyeit és szerszám élettartam növelő hatását már korábban ismertettük. A hűtőkörök kialakítása nagyon változatos lehet, nagy és összetett szerszámok hűtését gyakran több vagy változó átmérőjű hűtőkörrel oldják meg (1.3.27. ábra).



1.3.27. ábra: Szerszám betét formakövető hűtéssel [41]

Több kutatás is foglalkozik az optimális furatméret és -elhelyezés meghatározásával [42-45]. Egyértelmű irodalmi ajánlások nincsenek, általános megállapítás a hűtőfuratok darabhoz közelebbi vezetésével csökken a ciklus idő, de minőségi problémák léphetnek fel. Az EOS cég ajánlásait az 1.3.28. ábra mutatja be.

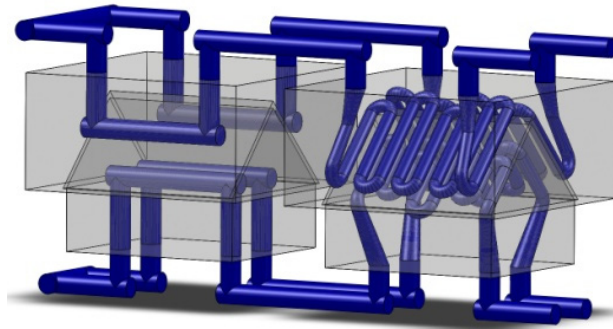


A fröccstermék falvastagsága mm	Furat átmérő mm	Furatközpontok egymástól való távolsága mm	Furatközep faltól való távolsága mm
	$b$	$a$	$c$
0 - 2	4 - 8	$2 - 3 \times b$	$1.5 - 2 \times b$
2 - 4	8 - 12	$2 - 3 \times b$	$1.5 - 2 \times b$
4 - 6	12 - 14	$2 - 3 \times b$	$1.5 - 2 \times b$

1.3.28. ábra: Hűtőkör tervezési ajánlások [45]

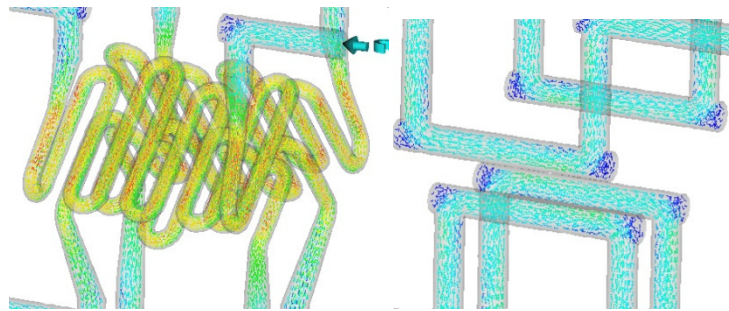
A hűtőkörök tervezése tapasztalati úton és szimulációs programok alkalmazásával is történhet. A következőkben hagyományos és formakövető hűtéssel ellátott szerszám betét kialakítás (1.3.29. ábra) áramlási és hőmérsékleti szimulációs eredményeit mutatjuk be. A hagyományos betét P20 szerszám acél alapanyagú, a formakövető hűtésű betét anyaga MS1 acél. A vizsgált szerszám betét egyszerű geometriájú sátozott forma gyártására alkalmas [2].





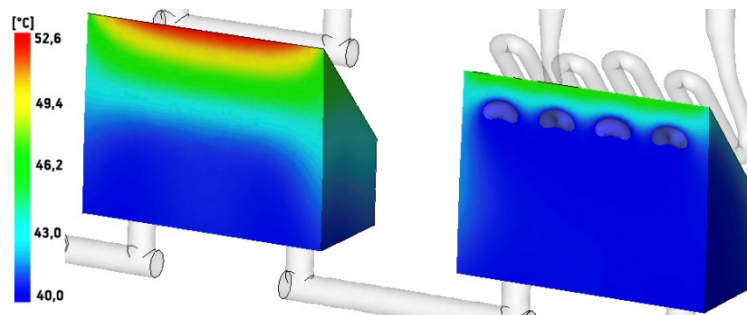
1.3.29. ábra: Hagyományos (bal) és formakövető (jobb) hűtőkör kialakítás a fröccsöntő szerszámban elhelyezett betétekben [2]

A hűtőközeg áramlási sebessége szimulációs szoftverek segítségével meghatározható (1.3.30. ábra). A kék a kisebb, a piros szín pedig a nagyobb áramlási sebességet jelöli. A hagyományos betétben a sarokpontokon pangó övezet alakul ki, ami rontja a hűtési hatékonyságot. A DMLS betétben az átmérő szabadon változtatható, így változtatható a folyadék áramlási sebessége, a növekvő sebességgel így növelhető a hőátadás hatékonysága [2].



1.3.30. ábra: A folyadék áramlási sebessége a hűtőcsatornáknak a DMLS (bal) és hagyományos (jobb) betét esetén [2]

A szerszámbetétek keresztmetszeti hőmérsékletének vizsgálatakor jól látható, hogy mindkét betét felülethez közeli részén nagyobb a hőmérséklet, azonban a hagyományos betét felülethez közeli része jóval melegebb (1.3.31. ábra) [2].



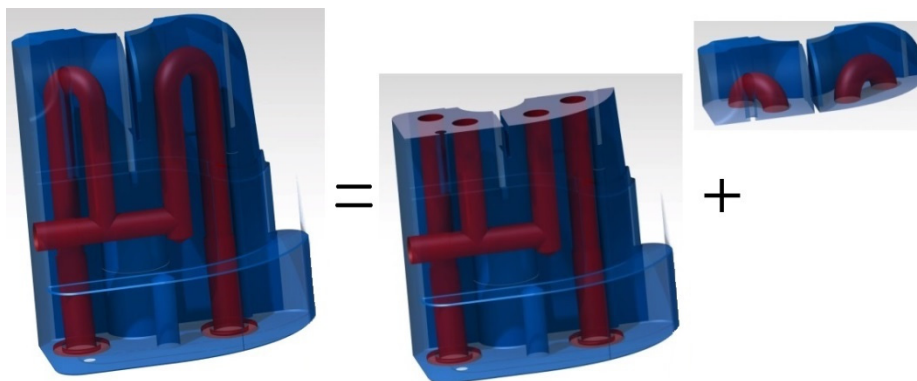
1.3.31. ábra: Hőmérséklet eloszlás a hagyományos és DMLS betétek középső keresztmetszetében [2]

### 1.3.8. Tervezési irányelvek

Egyszerű darabok esetében a lézeres szinterezés a hagyományos forgácsoló megmunkálásokhoz képest egy költséges eljárás (1.3.2. ábra). Ahhoz, hogy költséghatékonyan tudjuk alkalmazni a technológia által kínált gyártási szabadságot, a szerszámbetéteket a DMLS gyártástechnológia ismeretében kell megtervezni. A legáltalánosabb alapelv, amit hagyományos forgácsolással könnyen meg tudunk munkálni, azt forgácsolással készítjük el. A rétegről-rétegre építő eljárások gyártási költségét a tervező az anyagköltség és a várható gyártási idő minimalizálásával tudja csökkenteni.

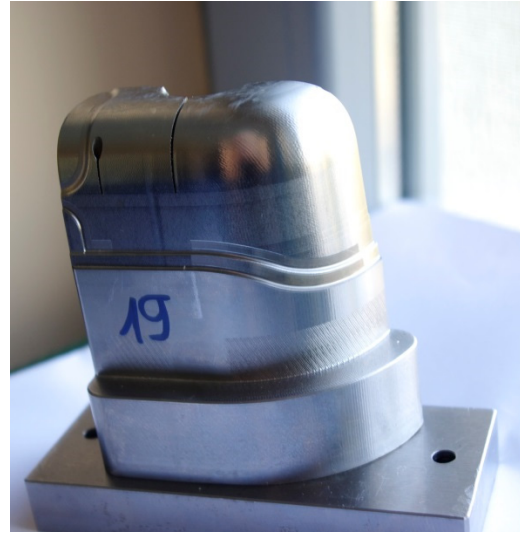
Az anyagköltséget első sorban az építési térfogat befolyásolja. Az építési idő két tényezőre bontható, az olvasztás és a porterítés idejére. Az olvasztás idejét döntően az építési térfogat befolyásolja. A porterítés ideje egyedül a munkadarab építés irányú kiterjedésétől (magasságától) függ. Tehát valószínűsíthető, hogy egy kisebb térfogatú kis magasságú darab költséghatékonyan gyártható.

Amikor a szerszámtervezők egy korábban használt szerszámbetétet átterveznek DMLS eljárással gyárthatóvá, a technológia újszerűsége miatt nem mindig veszik figyelembe a gazdaságos gyárthatóság szempontjait. Amennyiben a betét teljes magasságában nem tartalmaz hagyományos úton nem gyártható belső üregeket, sok esetben célszerű megosztani a betétet, egy forgácsolt és egy felépített részre (1.3.32. ábra).



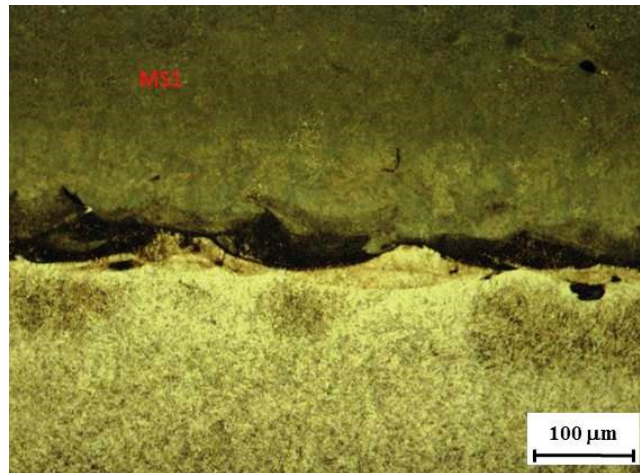
1.3.32. ábra: Szerszámbetét megosztása forgácsolt és felépített részre

Ebben az esetben a forgácsolással elkészített alsó félre közvetlenül ráépítjük a speciális hűtőköröket tartalmazó felső részt (*hybrid mold*), így két különböző alapanyagból egy, mechanikus kötések nélküli közös darabot kapunk (1.3.33. ábra).



1.3.33. ábra: Előgyártmányra szinterezett szerszámbetét (*hybrid mold*), megmunkálás előtt és után [46]

Az alsó forgácsolt rész anyagát a szerszámmal szemben támasztott elvárások és a szinterezést követő hőkezelések vagy felületi bevonatolás figyelembe vételével kell megválasztani. Ráépített szerszámbetét átmeneti részéből kimunkált keresztmetszeti csiszolat mikroszkópi felvételén a lézerpáztázás jól látható (1.3.34. ábra).



1.3.34. ábra: Hibrid felépítés átmeneti zónája [46]

### 1.3.9. Összegzés

A 3D nyomtatás, mint technológia, már széles körben ismert. A fém „nyomtatás” ismertsége és piaci szerepe az egész iparágon belül még kicsi. Otthoni felhasználásra szánt fém 3D nyomtatók megjelenése a közeljövőben nem várható. Az ipari fejlesztések a gyorsabb gyártás és új anyagok irányába mutatnak. Az újabb géptípusok lézerteljesítménye 2-5-szörösére nőtt pár év alatt, megjelentek a több lézerral együttesen dolgozó rendszerek is. Ez a teljesítmény növekedés a gyártási/gépi idők csökkenését eredményezi. Ugyanakkor várható, hogy a jövőben megjelennek a több különböző porból építő eljárások, amelyek még jobban ki tudják majd elégíteni az egy terméken belül megjelenő hőtani, mechanikai és egyéb követelményeket.

## Irodalom

1. Wang Y, Yu K.-M, Wang C. C. L: Spiral and conformal cooling in plastic injection moulding, *Computer-Aided Design* 63 (2015) 1-11
2. Zink B, Szabó F, Hatos I, Hargitai H, Kovács J. G: DMLS szerszámbetétek szimulációs vizsgálata, *Műanyag-és Gumiipari Évkönyv* 12 (2014) 49-56
3. Ruffner T: Success with Conformal Cooling Using Direct Metal Laser Sintering, *MoldMaking Technology*, 2012
4. Hassan H, Regnier N, Pujos C, Arquis E, Defaye G: Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding, *Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 1547-1557
5. Hassan H, Regnier N, Bot C. L, Pujos C, Defaye G: Effect of cooling system on the polymer temperature and solidification during injection molding, *Appl. Therm. Eng.* 29 (2009) 1786-1791
6. Hassan H, Regnier N, Bot C. L, Defaye G: 3D study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding, *International Journal of Thermal Science* 49 (2010) 161-169
7. Au K. M, Yu K. M, Chiu W. K: Visibility-based conformal cooling channel generation for rapid tooling, *Computer-Aided Design*, 43/4 (2011) 356-373
8. Nickels L: Channelling quality for moulded parts using fast manufacturing, *Metal Powder Report*, 64/8 (2009) 8-12
9. Kumar S: Selective Laser Sintering/Melting, In *Comprehensive Materials Processing*, Hashmi S., Batalha G. F, Van Tyne C. J, Yilbas B. (eds), Elsevier, Oxford, ISBN 9780080965338 (2014) pp 93-134
10. Conformal Cooling Using DMLS, Whitepaper (2012) <http://gpiprototype.com/>
11. Dewidar M. M, Lim J-K, Dalgarno K. W: A Comparison between Direct and Indirect Laser Sintering of Metals, *Journal of Materials Science and Technology*, 24/2 (2008) 227-232
12. Ma M, Wang Z, Gao M, Zeng X: Layer thickness dependence of performance in high-power selective laser melting of 1Cr18Ni9Ti stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology* 215 (2015) 142-150
13. Santos E. C, Shiomi M, Osakada K, Laoui T: Rapid manufacturing of metal components by laser forming, *Internal Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 1459-1468
14. Wang Y: Mechanical properties and microstructure of laser sintered and starch consolidated iron-based powders, Dissertation, Karlsruhe University, Karlsruhe, 2008
15. Shellabear M, Nyrhilä O: DMLS – Development history and state of the art, LANE 2004 Conference, Erlangen, Germany, Sept. 21-24, 2004
16. Terry Wohlers report, Additive manufacturing and 3D printing state of the industry, 2013
17. EOS GmbH: EOSINT M Technology for Direct Metal Laser-Sintering (DMLS), Application Notes, Design Rules for DMLS, EOS Whitepaper, [www.eos.info](http://www.eos.info), 2007

18. Kleszczynski S, Jacobsmühlen J, Sehr J. T, Witt G: Error Detection in Laser Beam Melting Systems by High Resolution Imaging, Proceedings of the Twenty Third Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2012
19. Hatos I, Zsoldos I: Checking the geometry of parts made by DMLS, Factory Automation (2012) 42-45
20. Manfredi D, Calignano F, Krishnan M, Canali R, Ambrosio E. P, Atzeni E: From Powders to Dense Metal Parts: Characterization of a Commercial AlSiMg Alloy Processed through Direct Metal Laser Sintering, Materials 6 (2013) 856-869
21. Thijs L, Van Humbeeck J, Kempen K, Yasa E, Kruth J. P, Rombouts M: Investigation on the Inclusions in Maraging Steel Produced by Selective Laser Melting, Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping, Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 28 September - 1 October, 2011, (2012) 297-304
22. Carter L. N, Martin C, Withers P. J, Attallah M. M: The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy, Journal of Alloys and Compounds 615 (2014) 338-347
23. Bineli A. R. R, Peres A. P. G, Jardini A. L, Filho R. M: Direct Metal Laser Sintering (DMLS): Technology for design and construction of microreactors: 6<sup>th</sup> Brazilian Conference on Manufacturing Engineering, Caxias do Sul, Brasil, 11-15 April, 2011
24. Pohl H, Simchi A, Issa M, Dias H. C: Thermal Stresses in Direct Metal Laser Sintering, Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Austin, Univ. of Texas (2001) 366-372
25. Kruth J.-P, Badrossamay M, Yasa E, Deckers J, Thijs L, Van Humbeeck J: Part and material properties in selective laser melting of metals, 16<sup>th</sup> International Symposium on Electromachining (ISEM XVI), Shanghai, China, 19-23 April, 2010
26. Aziz M. S. A, Furumoto T, Ueda T, Abe S, Hosokawa A, Tanaka R: Study on Thermal and Strain Behavior in Selective Laser Sintering Process, Key Engineering Materials, 516 (2012) 203-208
27. Manfredi D, Calignano F, Krishnan M, Canali R, Ambrosio E. P, Biamino S, Ugues D, Pavese M, Fino P: Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs), Light Metal Alloys Applications, Edited by Waldemar A. Monteiro, Pub. InTech, ISBN 978-953-51-1588-5 (2014)
28. Mertinger V: Maraging acélok hőkezelése, Gyakorlati útmutató, Miskolci Egyetem
29. Uddeholm Impax Supreme adatlap  
([http://www.uddeholm.com/files/PB\\_impax\\_supreme\\_english.pdf](http://www.uddeholm.com/files/PB_impax_supreme_english.pdf), 2015 január 31.)
30. Uddeholm Orvar Supreme adatlap  
([http://www.uddeholm.com/files/PB\\_impax\\_supreme\\_english.pdf](http://www.uddeholm.com/files/PB_impax_supreme_english.pdf), 2015 január 31.)
31. MaragingSteel MS1 material data sheet (adatlap)
32. Bohler W722 VMR material data sheet (adatlap)
33. RPT/RT V3.3, BMGE Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 2014. február 13.



34. Wang Y, Bergström J, Burman C: Characterization of an iron-based laser sintered material, *Journal of Materials Processing Technology*, 172/1 (2006) 77-87
35. Simchi A, Pohl H: Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder, *Materials Science and Engineering: A*, 359/1–2 (2003) 119-128
36. Gu D, Shen Y: Processing conditions and microstructural features of porous 316L stainless steel components by DMLS, *Applied Surface Science*, 255 (2008) 1880-1887
37. Sateesh N.H, Mohankumar G.C, Krishna P: Effect of Process Parameters on Surface Roughness of Laser Processed Inconel Superalloy, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5 (8) 2014
38. Hatos I, Kovács J. G: Szinterezett fém alkatrészek felületi érdessége és méretpontossága a gyártási orientáció függvényében, XXI. Nemzetközi Gépészeti Találkozó - OGÉT 2013 konferencia kiadványa (2013) 146-149
39. Ayre M: Desig guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS) (<https://prezi.com/q55mkdhc7dwo/dmls-design-guide-v4/>, 2015. január 31.)
40. Simchi A: Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features, *Materials Science and Engineering: A*, 428/1-2 (2006) 148-158
41. Innovative cooling for mold and die casting ([http://www.lasergenerieren.de/upload/lbc\\_engineering\\_mould\\_and\\_diecasting\\_2013-12.pdf](http://www.lasergenerieren.de/upload/lbc_engineering_mould_and_diecasting_2013-12.pdf), 2015. január 31.)
42. Ilyas I, Taylor C, Dalgarno K, Gosden J: Design and manufacture of injection mould tool inserts produced using indirect SLS and machining processes, *Rapid prototyping Journal*, 16 (2010) 429-440
43. Agazzi A, Sobotka V, LeGoff R, Jarny Y: Optimal cooling design in injection moulding process – A new approach based on morphological surfaces, *Applied Thermal Engineering*, 52 (2013) 170-178
44. Lin J. C: Optimum cooling system design of a free-form injection mold using an abductive network, *Journal of Materials Processing Technology* 120 (2002) 226-236
45. Mayer S: Optimized mold temperature control procedure using DMLS, EOS Whitepaper
46. Hatos I, Hargitai H: Formakövető hűtéssel rendelkező szerszámbetétek gyártása lézerszinterezéssel, *A Jövő Járműve* 3-4 (2013) 95-97