

Zentay Péter\* – Dr. Hegedűs Ernő\*\* – Végyvári Zsolt\*\*\*

# A 3D-s nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei II. rész

## 3D-s nyomtatott alkatrészek mechanikai tulajdonságainak minőségjavítási lehetőségei

**G**yors prototípusgyártó eljárások manapság gyors ütemben terjednek mind az egyedi, mind a kis sorozatú gyártás terén. A számos jó tulajdonsággal és új lehetőséggel rendelkező eljárásokkal olyan geometriájú alkatrészeket is elő lehet állítani, amelyeket más eljárásokkal nem, vagy csak nagyon körülményesen (bennszülött alkatrészek, belső bordázás, könnyítés stb.). Több olyan lehetőség létezik, amely sok előnnyel jár, azonban a késztermék mechanikai és egyéb tulajdonságai a legtöbb esetben jóval alul maradnak más, hagyományosabb technológiákkal (pl.: képlékeny alakítás, öntés, forgácsolás) gyártott alkatrészekkel szemben. A cikksorozat második részében megvizsgáljuk, hogy milyen fő problémák léphetnek fel egyes gyors prototípusgyártó technológiával előállított alkatrészeknél, és elemezzük, hogy milyen technológiai lépésekkel lehet azokat javítani.

### GYORS ELJÁRÁSOK

A gyors prototípusgyártó eljárások (rapid prototyping) és az azokból továbbfejlesztett gyors gyártási (rapid manufacturing), valamint gyors szerszámgyártási (rapid tooling) eljárásokat egyre szélesebb körben alkalmazzák a gyártási folyamatokban. A technológiák alapját az additív eljárások nyújtják, amelyeknél az alkatrészeket egymást követő rétegről rétegre építik fel különböző módszereket alkalmazva (porolvastás, por-polimerizálás, huzalszál-olvastás, direkt anyagdepozíció stb.). Elterjedésüket az eljárások széles választéka, a technológiák fejlődésével járó egyszerűbb kezelhetőség, és az eljárásokat alkalmazó berendezések árának csökkenése segítette.

Ezek a technológiák azonban általában nem olyan egyszerűek és „igénytelenek”, mint ahogyan a különböző hirdetésekben, promóciókban és reklámokban hirdetik. Számos helyen olvashatjuk, hogy egy egyszerű tervezőrendszerrel megtervezett alkatrészt, akár egy irodában elhelyezett, asztal melletti berendezéssel szinte bárki előállíthat – ipari minőségben –, egyetlen gombnyomással.

Valóban vannak olyan „háztartási” 3D-s műanyag nyomtatók, amelyekkel otthon is el tudunk készíteni egyszerűbb alkatrészeket, azonban a gyakorlatban ennél sokkal bonyolultabb a helyzet. Még ha a termék megfelelő CAD-modellje<sup>12</sup> rendelkezésre is áll, akkor is számos nehézség-

be ütközünk, ha valóban igényes, teherviselő és megfelelően működő alkatrészt kívánunk létrehozni.

Az újabb 3D-s nyomtatást segítő programok, amelyek a modell egyes rétegeihez tartozó gépi mozgáspályákat állítják elő, már nagyon sok segítséget tartalmaznak a nyomtatási eljárásokhoz. Ezzel egyszerűbb eljárásokhoz, egyszerűbb alkatrészekhez (azokban az esetekben, amikor nem támasztunk nagy igényt a termékkel szemben) olyan segítséget nyújtanak, amivel akár kezdő felhasználók is, némi próbálkozás után, akár megfelelő minőségű alkatrészeket állíthatnak elő. Azonban minél magasabb igényeket támasztunk a termékkel szemben (felületi minőség, magas mechanikai vagy hő igénybevétel, megbízhatóság, környezeti hatásokkal szembeni ellenállóképesség) annál bonyolultabb (és ezzel együtt költségesebb) eljárást kell alkalmazni, amelyekhez már jóval nagyobb szaktudás és gyakorlat szükséges. Még ha azonos eljárást is alkalmazunk, de másik anyagot használunk fel, a nyomtatás paramétereit újra be kell állítani. Általában a szoftverek adnak ajánlást az egyszerűbb anyagokhoz, azonban a drágább és igényesebb anyagoknál (pl.: szálerősített kompozit ABS<sup>13</sup>) a paramétereket próbanyomtatással ellenőrizni kell, és a tapasztalatok alapján szükséges pontosítani a paramétereket. 3D-s fémnyomtatásnál az eljárás ennél még bonyolultabb. A nyomtatás tervezésénél a hőelvezetést nagyon pontosan kell megtervezni, ügyelni kell, nehogy nyomtatás közben deformálódjon a darab, továbbá minden esetben a darab utókezelése (mosás, utólagos feszültségcsökkentés, keményítő hőkezelés) is szükséges. (Erre polimer anyagok használatakor csak néhány fajta technológia esetén van szükség). További nehézséget okoz, hogy az elkészült darab pontos eltávolítása általában huzalszakra-forgácsológép alkalmazásával történik. A porágyas technológiáknál a por kezelése nagy körültekintést igényel. A mikroszemcsés por egészségre ártalmas, egyes porok könnyen elektromosan feltöltődnek, robbanásveszélyesek. A porok nagyon higroszkopikusak, azonban a nyomtatásnál történő felhasználásuk csak teljesen száraz állapotban ajánlott. Ezért rendszeres kiszáritásuk szükséges, amelyet csak hosszú időn keresztül, és kis mennyiségben lehet elvégezni.

Az említett példákban látható, hogy az eljárások alkalmazása messze túlmutat az „otthoni” felhasználáson.

A tanulmányban a szerzők megvizsgálták néhány ismert problémát, amelyek a bevezetőben említetteknek messze

\* Egyetemi docens, NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, BME Gyártástudomány és Technológia Tanszék. ORCID: 0000-0002-3161-8829

\*\* Mk. alezredes, PhD, NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Haditechnikai Tanszék, adjunktus ORCID: 0000-0001-8457-5044

\*\*\* Mk. alezredes, NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Haditechnikai Tanszék, tanársegéd. ORCID: 0000-0003-2543-6049



túlmutatnak, és olyan esetekben fontosak, amikor nagy teherbírású alkatrészeket kell előállítani. A cikkben említett problémák közül számosak más technológiák esetén is megjelennek (pl.: porozítás öntött vagy porkohászattal készült alkatrészeknél, maradandó feszültségek stb.), azonban ott nem olyan mértékben, mint a fémmnyomatott alkatrészek esetén. Szerencsére a hagyományos technológiáknál már többnyire kidolgozták a gyártási problémák javítását, illetve kiküszöbölését, tehát ezek a módszerek sok esetben felhasználhatók fémmnyomatott alkatrészeknél is. Azonban előfordulhatnak olyan hibák, amelyek a technológia specialitásából adódóan, kizárólag 3D-s nyomtatott alkatrészeknél jelentkeznek, és vannak olyan módszerek, amelyek hatékonyak a hagyományos technológiák hibáinak kiküszöbölése során, de nem alkalmazhatók egyes nyomtatott alkatrészeknél.

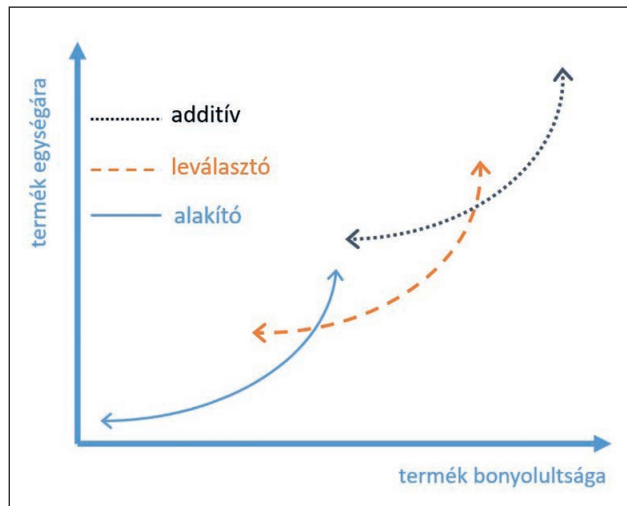
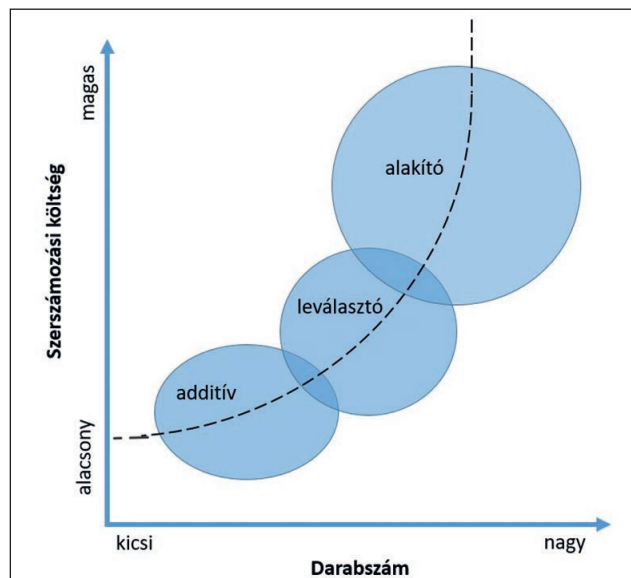
E tanulmányban a fegyveralkatrészeket tekintjük példának, amelyek nagy, impulzusszerű és ciklikus fárasztó igénybevételeknek vannak kitéve. Az alkatrészek méretkorlátait figyelembe véve, hadi lövészfegyver-alkatrészekre korlátozzuk a téma tárgyalását. A fegyverek tulajdonságait a harcászati-műszaki követelmények rögzítik, a megfelelő működést és a megbízhatóságot a szigorú gyártási és ellenőrzési előírások garantálják.

A szigorú előírások teljesítésének szempontjából az alábbi elvárások kiemelten fontosak:

- az alkatrészek legyártása a megadott pontossággal történjen,
- a ciklikus, impulzusszerű igénybevétel miatt lényeges az alkatrészek megfelelő felületi minősége,
- a homogén alkatrészek nagy tömörsége (a porózus szerkezet kimondottan hátrányos), nagy szívóssága és megfelelő keménysége, kopásállósága,
- maradandó feszültségek ne legyenek az alkatrészekben,
- a fegyveralkatrészek megfelelő korrózióállósággal rendelkezzenek.

A felsorolt követelmények közül sok egymásnak is ellentmond, azonban ezeken a feltételeken keresztül vizsgálhatjuk az egyes 3D-s nyomtatáskor fellépő nehézségeket. A fegyvereken találunk kisebb igénybevételnek kitétt

**9. ábra. A gyártási folyamatok sorozata sematikusán, a szerszámköltség és a gyártási sebesség alapján** (A szerzők szerkesztése [15] alapján)

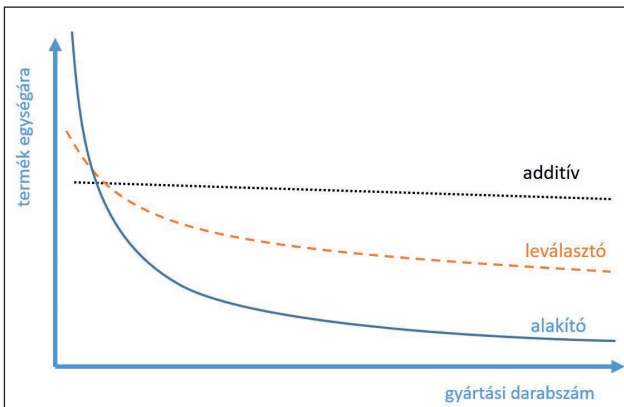


**10. ábra. Az egységköltségek és az elérhető gyártási összetettség sematikus ábrázolása** (A szerzők szerkesztése [15] alapján)

alkatrészeket is (pl.: markolat, ergonómiai borítás, szerelécsín stb.), amelyek más szempontok szerint készülnek, pl.: kis tömeg, jó ergonómia stb., de természetesen ezeknek az alkatrészeknek is megfelelő élettartammal és szilárdsággal kell rendelkezniük a fegyver alkalmazása tekintetében. A modern fegyverek általában fémtövezetből és polimer (illetve szálerősítéssel polimer kompozit) anyagokból készülnek, amelyeket gyors prototípus eljárásokkal is elő lehet állítani. Az új gyártási módszerek alkalmazhatóságát számos tényező befolyásolja, de elsősorban gazdasági megfontolások, és a produktivitás kérdései a meghatározóak. Az 9. ábra a darabszám és a szerszámköltségek kapcsolatát szemlélteti különböző gyártási módszerek esetén. Jól látható, hogy gyakran változó geometriánál, kis darabszámnál a gyártás előkészítésének költsége gyors prototípusgyártó eljárásoknál a legkisebb. A 10. ábra a három gyártási eljárás költségeit szemlélteti a gyártandó darabszám függvényében. Szembetűnő, hogy a képlékeny alakító technológiák az egyszerű geometriánál a legköltséghatékonyabb eljárások, míg a nagyon bonyolult geometriánál az additív eljárások alkalmazhatók.

A 11. ábra a három különböző gyártási stratégia esetén mutatja a darabok egységárát az elkészítendő darabszámok függvényében. Az ábra alapján megállapítható, hogy az additív gyártásnál a darabszámtól nem függ jelentősen a termék egységára, míg a forgácsoló vagy a képlékeny alakító eljárások költségei nagyban függenek tőle. Az ábrából az is leolvasható, hogy nagy darabszámok esetén az alakító eljárások a legelőnyösebbek. Az alkalmazott gyártástechnológia kiválasztását a sorozatgyártás nagysága is egyértelműen meghatározza. A fegyveralkatrészek legtöbb esetben tömeggyártással készülnek, amely produktivitását a 3D-s nyomtatás még megközelíteni sem képes, de speciális esetekben mégis érdemes megfontolni az alkalmazását. Ilyen esetek lehetnek:

- a fejlesztések,
- kísérleti darabok előállítása,
- más technológiával nem legyártható alkatrészek (belsőlyöntött vagy belső bordázott alkatrészek),
- nem beszerezhető alkatrészek utángyártása,
- pótalkatrész igénye (pl.: ellátási lánc problémája háborús övezetben),
- a raktárkészlet minimalizálása.



11. ábra. Termékek költsége a gyártási darabszám függvényében, különböző gyártási technológiák esetén (A szerzők szerkesztése [14] alapján)

A technológia alkalmazásának alapfeltétele, hogy az elkészült alkatrész tulajdonságai elérjék a szükséges minőséget.

### FŐBB FELMERÜLŐ PROBLÉMÁK A 3D-S NYOMTATÓ Gyártási ELJÁRÁSOKNÁL

Ebben a fejezetben felvázolunk néhány additív technológiáknál jelentkező problémát, amelyek a legyártott alkatrész minőségét, azok szerkezetének gyengítése miatt rontják. Az előnytelen tulajdonságok sok esetben csökkenthetők, vagy meg is szüntethetők megfelelő utókezeléssel. Ezeket a módszereket a tanulmány második részében ismertetjük. A gyors prototípusgyártó eljárások esetében adódó minőségromlást okozó problémák jelentős része más gyártási eljárásoknál is jelentkezett, és már létezik rájuk megoldás. Ezek a megoldások a nyomtatott alkatrészek minőségének javítására alkalmasak, így olcsóbb, hagyományos technológiákat tudunk alkalmazni.

### A NYOMTATÁS ELŐKÉSZÍTÉSE KIEMELTEN FONTOS

A nyomtatógépek előkészítése rögzített előírások alapján történik, amelyeket minden esetben nagyon pontosan követni kell. Az elkészült darab tulajdonságai jelentősen romolhatnak, ha csak a legkisebb hibát is elkövetjük az előkészítésnél. A legfontosabb mozzanatok a következők:

- A gép nyomtatókamrájának teljesen mentesnek kell lennie az előző nyomtatásból maradt anyagoktól, mivel az idegen porszemcsék gyártmányba történő bekerülése helyi hibát okoz.
- A kamrának inert atmoszférával való feltöltésének (illetve vákuum alá helyezésének) is tisztított gázokkal kell történnie.
- A poranyagoknak lehetőleg újaknak kell lenniük. Kiseb minőségigényű esetekben újrahasonított porokat is felhasználhatunk, azonban ezeknél a tisztítást és a szemcseméret-ellenőrzést gondosan el kell végezni, és hosszú szárítási folyamattal a teljes nedvességet el kell távolítani belőlük.
- A közvetlen szátelelvastási eljárásoknál az alapanyagot légmentesen kell tárolni, és csak felhasználás előtt szabad a gépbe helyezni. A nyomtatási alaplapot (amelyre majd az alkatrész felépül) megfelelően elő kell készíteni (a nyomtatási felületnek jó minőségűnek és teljesen tisztának kell lennie), ügyelni kell arra, hogy

lehetőleg azonos anyagból legyen, mint a nyomtatandó gyártmány.

- Az alaplapot a megfelelő hőmérsékletre fel kell melegíteni (a hőmérséklet a technológia, és az alapanyag függvénye). A gép indítása előtt meg kell várni, amíg a nyomtatókamra hőmérséklete és atmoszférája eléri a kívánt értéket, és csak azután indíthatjuk a folyamatot. Ez a rövid leírás már jól mutatja, hogy milyen nehézségeket jelent már a nyomtatás előkészítése is.

### A 3D-S NYOMTATÁSNÁL FELMERÜLŐ PROBLÉMÁK

A következő fejezetben megvizsgáljuk a gyors prototípusgyártó, fém alapanyagot alkalmazó eljárásoknál felmerülő problémákat. A hibák nagy része más eljárásoknál is felmerül, ezért nem szükséges kitérni minden egyes hibalehetőségre, azonban ki kell emelni azokat, amelyek jelenléte fokozottan befolyásolja a fegyveralkatrészek minőségét.

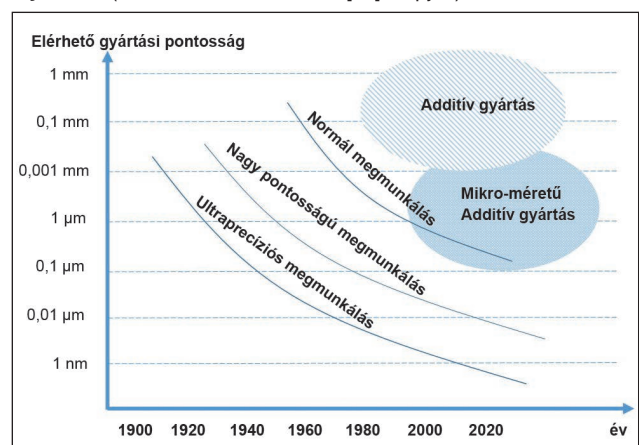
### PONTOSSÁG, RÉTEGEZETTSÉG ÉS FELÜLETI MINŐSÉG

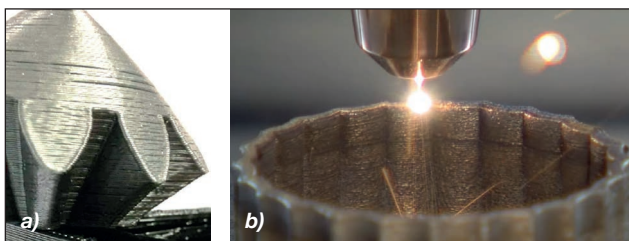
Mind a pontosság, mind a felületi minőség a munkadarab geometriai jellemzője. A pontosság alatt ebben a tanulmányban csak az alak- és a méretpontosságot vizsgáljuk. Ezek a jellemzők jelentősen függenek az alkalmazott technológiai eljárástól, a gép pontosságától, valamint a gyártási paraméterektől. Az alak- és a méretpontosság a gép alkatrészeinek pontossága és a vezérlés felbontásának függvénye, amely a gép típusának egyik jellemzője. Ez a beszerzésnél fontos szempont, ekkor kell eldönteni az alkalmazási területhez legjobban illő gép paramétereit, amelyet azonban később már nem tudunk megváltoztatni.

A pontosság itt sem növelhető tetszőlegesen a gép paramétereivel, sőt ennél jelentősen rosszabb a helyzet. A technológiai korlátok miatt olyan akadályokba ütközünk, amelyek behatárolják a gyártási képességeket. A 12. ábra mutatja az additív gyártás során elérhető pontosság fejlődését, összehasonlítva más gyártási technológiákkal.

Korlátot jelent például a fémporok szemcsemérete. A porszemek mérete közvetlenül befolyásolja a darab pontosságát és mechanikai tulajdonságát. A szemcsék méreteit bizonyos határok alá már technológiai okokból nem lehet csökkenteni (ez mind a porágyas, mind az ADAM-14 eljárásoknál korlátot jelent). Az itt felmerülő problémát

12. ábra. A gyártási pontosság és a gyártási módszerek fejlődése (A szerzők szerkesztése [15] alapján)





13. ábra. Rétegezethez szemléltetése a) [21], és a rétegezethez létrejött b) közvetlen szálleolvastási (DED – Direct Energy Deposition) technológiánál [17]

megfelelő porválasztással lehet optimalizálni, de az a beavatkozás a pontosságot és a felületi minőséget befolyásolja, korlátozza. Közvetlen szálleolvastásos eljárásoknál ez a korlát másképpen jelentkezik, ám ott is jelen van.

A másik probléma, amely a technológia következménye: a rétegezethez. Akármilyen jól választjuk is a port és a technológiai paramétereket, az eljárás miatt mindig külön rétegek fognak kialakulni a gyártási (felépítési) folyamatra merőlegesen. Ezek az alkatrész külső felületein jól érzékelhetően jelentkeznek, amely mind alak, mind méretpontosságbeli problémákat, mind felületi minőségromlást okoznak (lásd két különböző eljárásnál fellépő rétegezethez 13.a) és b) ábra). A nyomtatási paraméterek megfelelő beállításával és porválasztással ezek csökkenthetők, de teljesen el nem tüntethetők. A minőség és a pontosság javítása érdekében pl. finomabb szemcsés port alkalmazhatunk és vékonyabb nyomtatási rétegeket állíthatunk be (adott lehetőségekhez mérten), ezek a mozzanatok a gyártási időt és a költségeket jelentősen megnövelik.

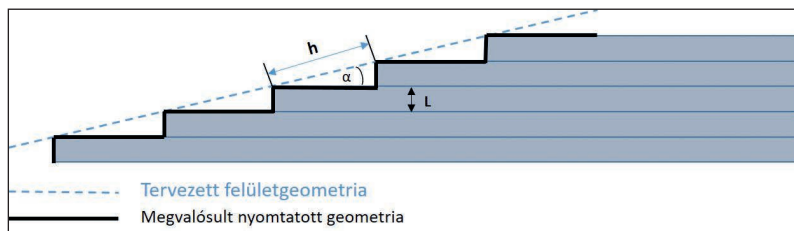
### FELÜLETI ÉRDESSÉG

A fémmenyomatott alkatrészeknél keletkező felületi érdesség sokszor jóval nagyobb lehet, mint a hagyományos gyártási eljárásokkal készült daraboknál, és a darab oldalának dőlésszögétől, továbbá a gyártási folyamat egyéb helyi körülményeitől függően erősen változhat. A felületi érdesség az alábbiak tekintetében fontos:

- a faszasztó igénybevételnek kitétt alkatrészek kifáradási tulajdonsága szempontjából,
- jelentős hatással van a nagy, dinamikus terhelést szenvedő alkatrészek állapotára, kopására,
- a koptatásnak kitétt alkatrészek élettartamára,
- a siklásnak kitétt alkatrészek mozgására, kopására, berágódására.

Továbbá fontos szempont a szép megjelenés, a külső felületen történő hőleadás minősége, valamint a felületről kiinduló korrózió-hajlamosság. Legtöbb esetben a jó felületi minőség kis felületi érdességet jelent, amelyet célszerű elérni fegyveralkatrészek gyártásánál. A felületi érdesség mikrogeometriai

14. ábra. Az idealizált megszilárdult rétegek és a hozzájuk tartozó éltávolság:  $h$ , a becsült érdesség sematikus ábrázolása adott rétegvastagság:  $L$ , valamint  $\alpha$  dőlésszög esetén (A szerzők szerkesztése [15] alapján)



jellemző, ezért nem tartozik ide a felületen tervezett bordázás, rovátkolás, a szándékos érdesítés stb. [15].

A 3D-s nyomtatásakor fellépő felületi érdességproblémák egyes okai lehetnek:

- A rétegenkénti gyártáshoz kapcsolódó lépcsőhatások, amelyeket közvetlenül befolyásol a rétegvastagság és az alkatrész oldalának dőlésszöge (14. ábra).
- A részecskék kilökődése az olvadékfürdőből és a közvetlen szomszédos térrészekből, amely kifröccsenést eredményez, a részecskék a már elkészült rész felső felületéhez tapadhatnak.
- Az olvadékfürdő stabilitása, és a megszilárdult lézerpályához kapcsolódó morfológia, amely egyenetlen pályageometriához vezethet.
- Az olvadékfürdő hatása, a gőznyomás, a belső konvekciós áramok és a felületi feszültség kölcsönhatásai.
- Azok a felületek, amelyek nem felfelé néznek, szorosan érintkeznek a porággal az olvadékmédenca megszilárdulása során. Ez az érintkezés maradék részecskék tapadását eredményezi, különösen a nagy oldalszögű ferde felületeken.
- A szomszédos olvasztási pályák kölcsönhatásba lépnek egymással, különösen az átfedési szektorokban, amely a szomszédos és átfedő pályák egymás utáni olvasztásának és újraolvadásának eredményeképpen jön létre.

Az érdesség-tulajdonságokat számos 3D-s nyomtatási tervezési változó befolyásolja, mint például a feldolgozás előtti paraméterek (a por szemcsemérete, a részecskeeloszlás, az alaplap előmelegítése és a nyomtató belső kamrakörnyezete), a folyamatparaméterek (a pásztázási sebesség, a lézerteljesítmény, a pásztázás távolsága, a rétegvastagság és a pásztázási stratégia) és az utófeldolgozási paraméterek, mint a hőkezelési és az anyageltávolítási folyamatok.

### FELHASZNÁLÁSKOR JELENTKEZŐ (MECHANIKAI ÉS KORRÓZIÓÁLLÓSÁGI) PROBLÉMÁK

A módszer gyártástechnológiájából következően a terméknek elkerülhetetlen az anyag inhomogenitása és anizotropiája. Az inhomogenitás főképpen a porozitásból adódik (lásd később), amikor az anyag szerkezete helyről helyre változik, kisebb-nagyobb zárványok vagy folytonossági hiányok keletkeznek a por olvasztásakor. Ha ezek a zárványok elég kicsik (a szerkezet méreteihez képest, illetve összemérhetők az alkotó por szemcseméretével), akkor kijelenthető, hogy az inhomogenitás mértéke nem jelentős.

Nagyobb gondot jelent azonban az anizotropia, amely a technológia sajátossága miatt elkerülhetetlen. A gyors prototípusgyártó eljárások, rétegek egymásra építéséből állítják elő az alkatrészeket.<sup>15</sup> Függetlenül attól, hogy milyen vékonyak ezek a rétegek, mindegyiket külön résznek kell tekinteni, amely a teherviselő képesség irányítottságát okozzák. Az anizotropia abból adódik, hogy a rétegekkel párhuzamos irányban az alkatrész teherbírása eltér a rétegekre merőleges teherbírástól. Ez legjobban a húzó igénybevételnél jelentkezik.

Az anizotropia továbbá a rétegeken belül is jelentkezhet, mivel a lézersugár csak vékony sávban olvasztja meg az anyagot, ezért a rétegeken belül is sávok alakulnak ki. A huzalleolvastásos eljárásoknál ennek a mértéke még erősebb. Így az alkatrészt felépítő rétegek magukban is anizotropok

lesznek. Pásztázásos olvasztásnál szintén nagy különbség mutatkozik a sávokkal párhuzamos, illetve a sávokra merőleges irányú terhelhetőség tekintetében, különös tekintettel a húzó igénybevételre.

### A POROK ÖSSZETÉTELE

A porok összetételének megválasztása (a porkohászati eljárásokhoz hasonlóan) nagy szabadságot ad a tervezőnek, és az intermetallikus ötvözés során nagyon jó tulajdonságú anyagokat lehet összeállítani, amelyek a hagyományos eljárások során (mint pl. öntésnél) nem megoldható, de az összes részpor jó tulajdonságait hordozó összeállítás sajnos így sem lehetséges. A nyomtatási folyamat során a fémötvözetek összetétele is megváltozhat. Egy fémötvözetben, amelyben több különböző fémet kombinálnak, a legalacsonyabb olvadáspontú komponens a folyamat során olvasztási paraméterbeállításnál akár el is párologhat. Például a Ti-6Al-4V, az űrrepülésben elterjedt ötvözetnél a titán olvadáspontja sokkal magasabb, mint az alumíniumé, így a 3D-s nyomtatás során a folyamat közbeni paraméter-változtatással az anyag összetétele is befolyásolható.

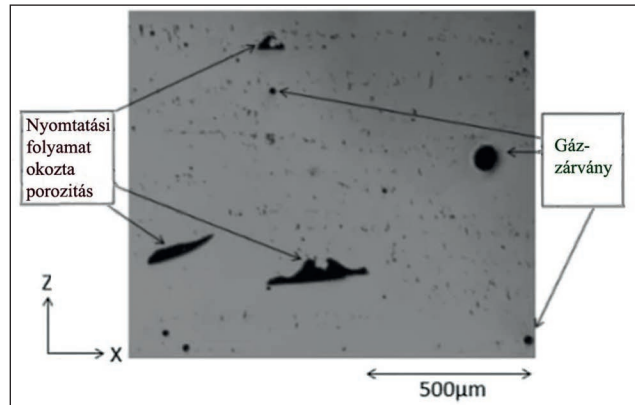
### AZ ADDITÍV TECHNOLÓGIÁVAL GYÁRTOTT ALKATRÉSZEK POROZITÁS ÉS SŰRŰSÉG PROBLÉMÁI

A porozitáson a pórusok térfogatának a teljes térfogathoz viszonyított arányát értjük. A pórusok mindig a szilárd anyagban belüli terekre vonatkoznak, amelyek a gyártási folyamat során keletkeznek (ezek keletkezhetnek más folyamatoknál is, nemcsak 3D-s nyomtatáskor).

Sok esetben a „pórusok” és a „térfogati hibák” fogalmakat gyakran felcserélve használják, azonban a „hiba” kifejezésnek tágabb jelentése van. A hibák közé soroljuk a tökéletlenségek minden formáját, a pórusokon kívül a repedéseket, a mikroszerkezeti folytonossági hiányokat, a zárványokat stb. A publikációban csak a nemkívánatos pórusokkal foglalkozunk, amelyek az ideálisnak tekintett szilárd anyagban előfordulnak, és nem foglalkozunk az előre tervezett, 3D-s nyomtatással előállított sejtes pórusokkal, amelyek legtöbb esetben a kitöltési térfogatban tömegcsökkentésként jelennek meg.

A porozitási probléma nagyon lényeges, valójában az additív technológiák legérzékenyebb pontjának tekinthető, amely szinte mindegyik technológiánál előfordul, különböző méretekben, formában és eloszlásban. Jellemzően negatívan befolyásolja a gyártott alkatrészek mechanikai tulajdonságait, amely megnehezíti a folyamatok minősítését, és a megbízható alkatrésztulajdonságok elérését [15].

A porozitás a nyomtatási folyamat során lép fel, amikor kis lyukak és üregek keletkeznek az alkatrészen belül. Ezek az apró, általában mikroszkopikus pórusok alacsony sűrűséget okozhatnak – minél több a pórusok száma, annál kisebb az alkatrész sűrűsége. A belső szerkezet gyengítésével befolyásolhatják az alkatrész mechanikai tulajdonságait is, és hajlamossá teszik a repedésekre vagy más sérülésekre, különösen nagy terhelés esetén [21]. A porózus 3D-s nyomtatott fémalkatrészek porózusságának jellemzően két fő oka van: vagy a porgyártási technológiával kapcsolatos probléma, vagy maga a 3D-s nyomtatási folyamat (például a gázporlasztás alkalmazása néha pórusokat okozhat a poranyagban) (15. ábra). Az ilyen apró lyukak gyakoriságának forrása a nyomtatási folyamatban keresendő:



15. ábra. Fémnyomtatás által előidézett porozitás jelenléte porágyas technológiával készített darabon (a folyamat okozta porozitás és gázporozitás) [16]

- a lézer energiája nem elegendő, és ezért nem tudja megfelelően megolvasztani a fémet,
- a túlzott lézerenergia hatására az olvadt anyag cseppjei kifröccsennek, amely szintén pórusokat eredményezhet [21].

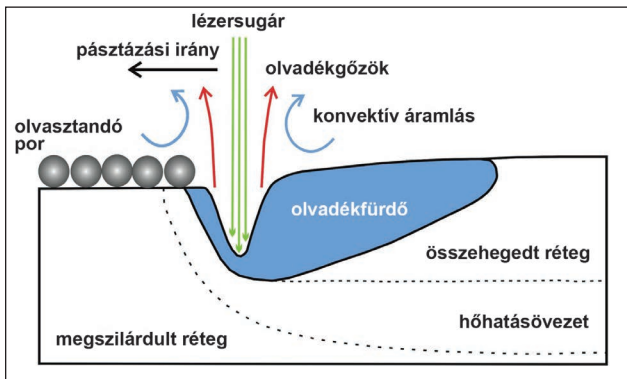
A két említett eset oka éppen ellentétes, de a végeredmény hasonló lehet.

A legtöbb esetben az alacsony porozitás még elfogadható (általában kisebb és kevésbé periodikus igénybevételnek kitett alkatrészek esetében), illetve utómunkálatokkal hatékony porozitás-csökkentést vagy póruszárást lehet elérni.

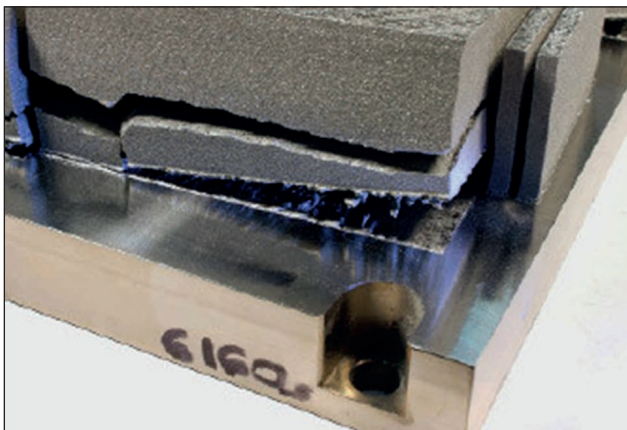
A porozitás legtöbb esetben mechanikai problémákat okoz, de egyéb más elektromos, illetve kémiai hatása is lehet. Ezek közül számunkra a korrózió a leglényegesebb. A porozitás befolyásolhatja a statikus mechanikai tulajdonságokat azáltal, hogy csökkenti a hatásos teherhordó felületet. A pórusok repedésképző helyként is működhetnek, a legnagyobb pórusok gyakran a hiba kritikus helyei. A porágyas technológiáknál a porozitás jelentősége alacsony [22], hiszen a pórusok nagy száma ellenére, azok nem befolyásolják jelentősen az alkatrészek statikus szilárdságát a porozitás akár 1%-áig. A felületi érdesség vagy a maradó feszültség – a fő befolyásoló tényezők ezekben az esetekben – természetesen szintén nagy jelentőséggel bírnak. Az anyag szívósságát azonban erősen befolyásolja a porozitás jelenléte, mégpedig a megnövekedett porozitás mértékével jelentősen csökkenti a szívósságot. A szakítóvizsgálatoknál kimutatható, hogy a kisebb pórusok egyesülnek nagyobb pórusokká, amelyek a későbbiek során az alkatrész meghibásodásához vezetnek [23].

A kifáradási tulajdonságokat azonban kifejezetten erősen befolyásolja a porozitás, és még a kis pórusok is repedések kiindulási helyei lehetnek fárasztó igénybevételnél. A porozitás alacsony kifáradási szilárdságot eredményez, és hozzájárul az alkatrész élettartamának széles szórásához. Mind a statikus, mind a kifáradási vizsgálatoknál kiderült, hogy a porozitás mértéke, elhelyezkedése és mérete nem a kizárólagosan fontos tényezők. A pórusok morfológiája is erősen befolyásolja a tulajdonságokat, mivel a szabálytalan és éles szélű pórusok sokkal jobban rontják a mechanikai tulajdonságokat, mint a lekerekített pórusok vagy a kis bezárt gázzárványok [15]. Ezért általában a porozitást legalább 1% alá kell szorítani a nagyobb, egybefüggő térfogattal rendelkező alkatrészek megfelelő statikus teherviselése érdekében. Ezt az értékhatárt keskeny szakaszokon vagy összetett részekben (pl.: rácsos szerkezetek támasztékaiban, belső sejtszerkezetekben) még tovább





16. ábra. A porágyas gyors prototípusgyártó eljárás egyszerűsített ábrája. A technológiából származó problémák jól láthatók a folyamat inhomogén hőeloszlása miatt (A szerzők szerkesztése [15] alapján)



17. ábra. Nagy maradandó feszültségek leszakították a darabot a gyártási alaplapról [16]

kell csökkenteni, ahol a pórusméret a helyi anyagvastagsághoz viszonyítva már jelentős lehet.

A másik fontos tényező, amely részben a porozitáshoz hasonló: a sűrűség. Amikor egy alkatrész működése során ciklikus, fárasztó igénybevételnek van kitéve, a sűrűsége az egyik fontos tényező, amely meghatározza, hogy az alkatrész állapot a terhelés alatt milyen mértékben romlik. Minél kisebb egy alkatrész sűrűsége, annál valószínűbb, hogy nyomás hatására megreped. A porágyas technológi-

akkal (SLM, EBM<sup>16</sup>) 98%-os, vagy annál nagyobb sűrűségű alkatrészek előállítása is lehetséges, amelyek elengedhetetlenek a nagy igénybevételű alkalmazásoknál.

A korrózióállóság számos alkalmazásnál igen fontos, amely főként az anyag metallurgiájára vezethető vissza, azonban kimutatták, hogy a porozitás jelenléte erősen befolyásolja a korrózióállóságot [15]. A magas porozitás nagyobb mértékű korrózióhoz vezet, mivel a pórusok korróziós helyként működnek. Ez a hatás a korrózió kitétt felületek közelében a legkritikusabb [15].

### MARADANDÓ FESZÜLTSEGEK

A nagy hőbevitel (a hevítés és az azt követő hűlés) a fém 3D-s nyomtatásos eljárások velejárója. A lézersugár koncentráltan, rövid időre felhevíti egy keskeny sávban a port, amely gyorsan visszahűl, és ebből következően nagy belső feszültséget okoz. (16. ábra) A maradandó feszültségek kedvezőtlenül hatnak a gyártott alkatrész minőségére, deformációkat, egyéb mechanikai problémákat és kritikus tönkremenetelt is okozhatnak. A maradandó feszültségek számos szerkezeti problémát eredményezhetnek az alkatrészben, amelyek közül a repedés és a vetemedés a leggyakoribb. Az ilyen problémák általában akkor fordulnak elő, amikor az olvadt fém a nyomtatás után lehűl. A lehűlés összehúzóerőt okoz, amelytől az alkatrész szélei felgyűrődhetnek és deformálódhatnak. Szélsőséges esetekben a feszültség meghaladhatja az alkatrész szakítószilárdságát, ez esetben az alkatrész megreped. Repedés akkor is előfordulhat, ha a poranyag nem volt megfelelően megoldva (17. ábra).

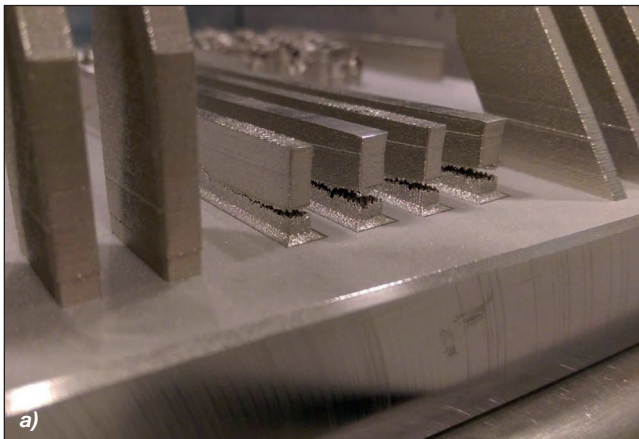
Nyomtatáskor a feszültségkoncentráció a nyomtatott rész alján, és az alaplap érintkezési felületén lép fel. Nem megfelelő eljárásnál vetemedést, repedést, a nyomtatott alkatrész leszakadását is előidézheti.

### REPEDÉSEK, DELAMINÁCIÓ, VETEMEDÉS

Repedés akkor fordul elő, amikor az olvadt fém túl gyorsan szilárdul meg, vagy egy terület újabb hőhatást kap, és ha az energiaforrás túl erős, többlet feszültség léphet fel a megszilárdulási folyamat során (18 a) ábra).

A delamináció: a rétegek közötti repedések kialakulása (18. b) ábra), amely annak eredménye, hogy a port a túl alacsony energiájú lézersugár nem olvasztja meg kellőké-

18. ábra. Nem megfelelő nyomtatási paraméterbeállításokat alkalmazva, porágyas eljárásnál a nagy belső feszültségek okozta stressz hatására az alkatrészek megrepedtek a), illetve delamináció (rétegenkénti szétválás) keletkezhet b) [16]



pen, vagy túl nagy energiájú a sugár, ezért az olvadékfürdő alatti rétegeket újra megolvasztja. Egyes repedések utómegmunkálásokkal javíthatók, de a delamináció nem tartozik ezek közé, ehelyett a probléma megelőzése érdekében a hordozólemezt kell előmelegíteni. Annak érdekében, hogy a nyomtatási feladat megfelelően induljon el, a nyomtatási kezdeti rétegeit megfelelően össze kell olvasztani a hordozólemezzel. A gyártás során, ha az alapfelület termikus feszültsége meghaladja a hordozóanyag szilárdságát, a hordozó elkezd deformálódni, amelynek következtében maga az alkatrész megvetemedhet, amely olyan mértékű is lehet, hogy a gép porterítő alkatrészeivel is ütközhet. Ez akár a gépalkatrész tönkremeneteléhez is vezethet, ezért a vetemedés elkerülése érdekében az ideális számú tartószerkezetet a megfelelő helyre kell elhelyezni. Ezt sokszor nehéz meghatározni anélkül, hogy minden egyes új nyomtatott alkatrészt külön próbával ne ellenőriznénk. Segítségnyújtásnak a szoftveres CAD, illetve a végeselemes alapú megoldások, amelyekkel részben elvégezhető az ellenőrzés. A termikus utófeldolgozás segíthet a kisebb repedések kijavításában is, miközben a megfelelő számú tartószerkezet kialakítása elengedhetetlen a vetemedés elkerülés érdekében [21].

#### AZ ELJÁRÁS SORÁN TOVÁBBI FELMERÜLŐ PROBLÉMÁK

A fém 3D-s nyomtatási folyamata során más torzulások is előfordulhatnak, például duzzadás vagy ömledékképződés. Duzzanat akkor következik be, amikor a megszilárdult fém a por fölé emelkedik. Hasonlóképpen olvadékgolyók keletkeznek, amikor az anyag szilárd rétegek helyett gömb alakúvá szilárdul. Ezt a jelenséget az olvadékfürdővel érintkező felületi feszültséggel kapcsolatos problémák okozzák, de csökkenthető az olvadék hossz-átmérő arányának 2:1-nél kisebbre történő változtatásával.

Az oxigénnek és a nedvességnek való kitétség megváltoztathatja a fémötvözetek összetételét. Például, ahogy az oxigén növekszik a Ti-6Al-4V titánban, az alumíniumtartalom csökkenhet. Ez különösen igaz a fémpor újrahasznosításakor. Az újrahasznosítás azt is eredményezi, hogy a porszemcsék kevésbé gömbölyűek, kevésbé jól folynak és hegednek.

(Folytatjuk)

A TKP2021-NVA-16 számú project az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatással, a Tématerületi Kiválósági Program 2021 TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.



INNOVÁCIÓS ÉS  
TECHNOLÓGIAI  
MINISZTERIUM



NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI  
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL

#### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [14] Redwood, Ben, Schöffner, Filemon, Garret, Brian. 2017. „The 3D printing handbook, technologies, design and application Amsterdam: 3D Hubs B.V.”;
- [15] Yadroitsev, Igor, Yadroitsava, Ina, Du Plessis, Anton, MacDonald, Eric. 2021. „Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals, Additive Manufacturing Materials and Technologies” (Elsevier);
- [16] Molitch-Hou, Michael. 7 Issues to Look Out for in Metal 3D Printing, *ENGINEERING.com* examines seven of the challenges that occur in metal 3D printing processes, Jul 10, 2017, <https://www.engineering.com/story/7-issues-to-look-out-for-in-metal-3d-printing> (Letöltve: 2022.10.7.);
- [17] Metal 3D Printing: A Definitive Guide (2021), 26 June 2019, <https://amfg.ai/2019/06/26/metal-3d-printing-a-definitive-guide/> (Letöltve: 2022.10.7.);
- [18] MATSUURA-Lumex Avance 25 - Metal hybrid 3D printer [https://www.maqinser.com/en/product/lumex\\_avance\\_25/](https://www.maqinser.com/en/product/lumex_avance_25/) (Letöltve: 2022.10.7.);
- [19] [https://www.matsuura.co.jp/english/media\\_library/matsuura-lumex-avance-25-solution](https://www.matsuura.co.jp/english/media_library/matsuura-lumex-avance-25-solution) (Letöltve: 2022.10.7.);
- [20] Hybrid Metal 3D Printer LUMEX Avance-25 & Application, Matsuura Europe GmbH Additive Manufacturing Technolog, 2015. [https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/file\\_attachments/1300\\_matsuura.pdf](https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/file_attachments/1300_matsuura.pdf) (Letöltve: 2022.10.7.);
- [21] 5 Common Problems Faced with Metal 3D printing – And How You Can Fix Them, 2020. Június. 1. <https://facfox.com/docs/kb/5-common-problems-faced-with-metal-3d-printing-and-how-you-can-fix-them> (Letöltve: 2022.10.7.);
- [22] Du Plessis, A., Yadroitsava, I., Yadroitsev, I. 2020. Effects of defects on mechanical properties in metal additive manufacturing: A review focusing on X-ray tomography insights. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108385>. Elsevier Ltd. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519308238> (Letöltve: 2022.10.7.);
- [23] Krakhmalev, P., et al., 2016. Deformation behavior and microstructure of Ti6Al4V manufactured by SLM., *Physics Procedia* Vol. 83. pp. 778–788. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.080> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389216301870> (Letöltve: 2022.10.7.).

#### JEGYZETEK

- 12 CAD: Computer-Aided Design – számítógéppel segített tervezés.
- 13 ABS: akrilnitril-butadién-sztirol. Az amorf polimerek közé tartozó, magas felületi fényű, jó ütésálló képességgel, nagy keménységgel és szilárdsággal, jó hőállósággal és vegyszerállósággal rendelkező, hőre lágyuló műanyag. (A szerk.)
- 14 ADAM: Atomic Diffusion Additive Manufacturing – atomdiffúziós additív gyártás.
- 15 Lásd cikkünk előző részét: „A 3D-s nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei” *Haditechnika* 2022/6. 56–60. o. DOI: 10.23713/HT.56.6.09.
- 16 SLM: Selective Laser Melting – lézer használatán alapuló additív gyártási eljárás. EBM: Electron Beam Melting – elektromosság alkalmazásán alapuló additív gyártási eljárás.