

Zentay Péter* – Dr. Hegedűs Ernő** – Végvári Zsolt***

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

A gyártási hibák hatásának mérséklése, hibakiküszöbölési megoldások

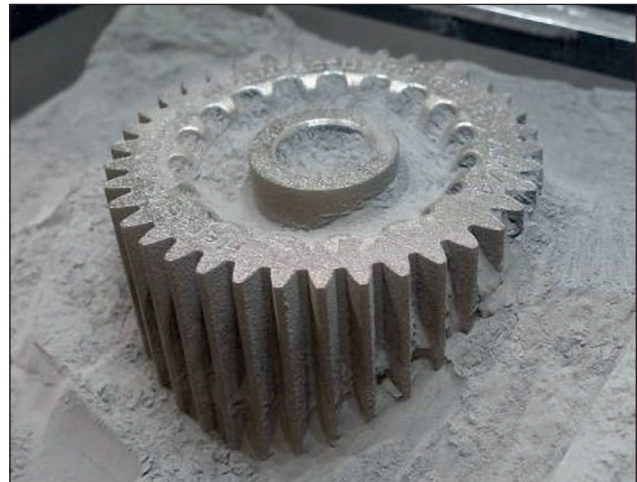
A háromrészes tanulmány a 3D-s nyomtatás – mint additív gyártástechnológia – alkalmazási lehetőségeit mutatja be, különös tekintettel a fémnyomtatásra és a szálerősítéssel műanyag nyomtatására. A sorozat második részében a szerzők megvizsgálták, hogy milyen fő problémák léphetnek fel egyes gyors prototípusgyártó technológiával előállított alkatrészek készítése közben, és elemezték a javítást célzó technológiai lépéseket. A záró, harmadik rész az utómunkálatokat (poreltávolítás, mechanikus, lézeres és hibrid eljárással történő felületi utómunkálás, hőkezelés stb.) mutatja be.

3D-S FÉMNYOMTATOTT ALKATRÉSZEK UTÓMUNKÁLATAI, AZ ELJÁRÁS ELŐKÉSZÍTÉSE

Az első nyomtatáskor a fém alkatrészek általában még nem állnak készen a végső felhasználásra, és valamilyen utófeldolgozásban kell részesülniük, például por- és támasztékeltávolításban, hőkezelésben és felületkezelésben.

Poreltávolítás esetén fokozottan fontos a munkavédelmi szabályok betartása, mivel a finom por egészségkárosító hatása rendkívül jelentős, így a művelethez teljes védőöltözet (szem-, orr-, fülvédelemmel kiegészítve) használata szükséges. A por nemcsak a tüdőbe jutva okoz maradandó egészségkárosodást, hanem a nagyon finom porszemcsék a bőrön át is felszívódhatnak. (Egy porágys technológiával készült munkadarabot mutat a 19. ábra). A poreltávolításhoz megfelelően zárt, szigetelt és robbanásbiztos porszívó szükséges, mivel egyes finom fémporok a levegő oxigéntartalmával együtt fokozottan robbanásveszélyesek, amennyiben az elektrosztatikus hatás vagy elektromos ív is jelen van. A porágys eljárások során a nyomtatott rész közé a meg nem olvasztott por bezáródhat, illetve a fel nem használt porba megolvastott részek is kerülhetnek, amelyeket a nyomtatási folyamat befejezése után el kell távolítani. A meg nem olvasztott, felesleges por manuálisan vagy automatizáltan, speciális berendezések segítségével (porszívó, nagynyomású fúvóka stb.) eltávolítható, majd későbbi felhasználásra újra felhasználható.

Az alkatrész belsejében rekedt, fel nem olvadt fémpor eltávolításának igényét már a tervezésnél figyelembe kell venni. A konstrukción ezért legalább két eltávolító furatot kell elhelyezni a külső felületbe, ezzel hozzuk létre a por eltávolításának lehetőségét a nyomtatás után.



19. ábra. Az elkészült porágys 3D-s fémmnyomtatott alkatrészről el kell távolítani a port [24]

A darabok eltávolítása is jelentős nehézséget okoz. A nyomtatott darabot legtöbbször olyan vastagságú alaplapra kell nyomtatni, amelynek anyagminősége azonos (fizikai/kémiai paraméterei nagyon hasonlóak) a nyomtatott alkatrészével. Ennek fő oka a megfelelő hővezetés, adhézió biztosítása, valamint a repedések/vetemedések hajlamanak csökkentése. A kemény anyagok használata, és a nagy adhézió a legtöbb esetben azonban számos problémát okoz a darab eltávolításakor, ugyanis ezt a műveletet általában valamilyen forgácsoló eljárással kell végezni (lásd 20. ábra). A megfelelő vágási vékonyság, és minimális vágási hőbevitel biztosítására a legalkalmasabb technológia a huzalszakra forgácsológép alkalmazása, de hátrányt jelent a nagy beszerzési költség, a költséges üzemeltetés és a megfelelő gépkezelő szakember biztosítása. Az optimális körülmények biztosításával a fémmnyomtatott alkatrészek előállításának költsége jelentősen emelkedik. Az alkatrészek természetesen más módszerekkel is eltávolíthatók, azonban ezek az eljárások nem biztos, hogy általánosan alkalmazhatók, vagy megfelelő vágási minőséget biztosítanak. Az alkatrészek szalagfűrészsel történő levágása egy másik, lényegesen gyorsabb módszer. Az eljárásból azonban hiányzik a huzalos szikraforgácsolás pontossága. Ha egy alkatrészben azonban utólagos CNC-megmunkálást

* 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, tanársegéd ORCID: 0000-0003-2543-6049





20. ábra. Az alkatrészeket általában huzalszikkra forgácsológéppel ajánlott eltávolítani az alaplapról [24]

tervezünk, ez a pontosság feláldozható a gyorsabb utófeldolgozási idő érdekében.

Az utófeldolgozás során további problémákkal is találkozhatunk. Több esetben a geometriából adódóan, illetve a megfelelő hőelvezetés biztosítása miatt, különféle támasztékokat, valamint tartó/hőelvezető szerkezeteket kell kialakítanunk (az alkatrészsel együtt nyomtatnunk) a gyártmány megfelelő elkészítése érdekében. Ezek az eszközök általában bonyolult geometriával rendelkeznek, és eltávolításuk nehézkes. A támasztékok eltávolításának egyik lehetséges módszere a CNC-megmunkálás. Érdemes lehet legkevesebb támasztékot tervezni a darabhoz. A gyakorlatban sokszor kézi szerszámokkal (turbómaróval, köszörűvel stb.) történik az alkatrész eltávolítása, amelyet a legtöbb esetben nem, vagy csak nagyon körülményesen lehet automatizálni (pl. 6 szabadságfokú robotos megmunkálással, de ez csak nagyobb darabszámok esetén válik költséghatékonyá).

ADDITÍV TECHNOLÓGIÁKKAL KÉSZÍTETT ALKATRÉSZEK MINŐSÉGVÁLTÁSI ELJÁRÁSAI

Az additív gyártás költségeinek jelentős része a gyártás előtti és utómunkálatokhoz köthető, és nem magához a nyomtatási költséghez. Ez a magyarázata annak, hogy a műszaki szakemberek egyre nagyobb figyelmet fordítanak a hatékony utókezelések fejlesztésére. Az utókezelésekkel a 3D-s nyomtatott alkatrészek következő jellemzői javíthatók, mérsékelhetők: a szabálytalan felületi morfológia, a mikroszerkezeti irányultság, a nem kívánt maradandó feszültségek és a térfogati porozitás. A nyomtatott fém alkatrészeket gyakran nagy felületi érdesség, szabálytalan felületi morfológia és véletlenszerűen elhelyezkedő, nemkívánatos felületi részek jellemzik.

A főbb okok, amelyek hozzájárulnak ehhez a topográfia-hoz: a lépcsőzetes felület, amely a rétegenkénti anyagfelvitel következménye, a csak részben megolvadt porszemcsék, a fröccsenések, a gömbölyű kiválások, a helytelen alátámasztás-eltávolítás, és az olvadáskemence instabilitása.

A gyártás alatti alátámasztott terület nagysága és a támasztékeltávolítási folyamat pontossága lokálisan is befolyásolhatja a gyártott alkatrész felületének minőségét.

FELÜLETI UTÓMEGMUNKÁLÁS

A csúcscategóriás alkalmazásokhoz történő additív gyártású alkatrészek átlagos felületi érdességet igényelnek, de a 3D-s nyomtatott alkatrészeket gyakran érdes felülettel állítják elő, és további utófeldolgozást igényelnek. A fém alkatrészek sima felületének eléréséhez számos általános felületkezelési technika létezik, mint a forgácsoló megmunkálás, a csiszolás, a koptató szemcseszórás (pl.: homokfúvás), a söréztetés és a mechanikus/kémiai, illetve az elektrokémiai polírozás. Mivel a felületi érdesség közvetlenül összefügg a rétegvastagsággal, a jelenség vékonyabb rétegekkel történő nyomtatással mérsékelhető. Az alkatrész

finomabb rétegekkel történő előállítására azonban jelentősen megnövelheti az építési időt. A por nem megfelelő olvasztása is érdes felületet eredményezhet. Ez akkor fordul elő, ha nincs elegendő energia a fém teljes megolvadásához. Ebben az esetben a felületi érdesség csökkenthető a lézer teljesítményének növelésével [25].

A FELÜLETI ÉRDESSÉG JAVÍTÁSA

A felületi minőség számos eljárással javítható, amelyek a technológiából következő felületi hibákat és egyenlőtlenségeket képesek csökkenteni.

Az egyik ilyen eljárás a felületi maratás korrozív folyadékkal, amelynek során az elkészült alkatrész egy korrozív folyadékba meghatározott ideig merítjük. A folyadék „simítja” a felületet, továbbá képes a belső üregekbe is behatolni, így ezzel a maratási eljárással olyan felületeket is lehet kezelni, amelyek más, mechanikus eljárásokkal nem hozzáférhetők.

Jól alkalmazható a felületi erózió helyi villamoskísülésmegmunkálással (anódos vagy elektrokémiai polírozás), ahol a folyadék elektrolit, amely lehetővé teszi az anódos alkatrész erózióját. Ez az erózió elsősorban a felszíni csúcsokon és völgyekben fog erősen érvényesülni, ezáltal lokális felületi simítást képes végezni.

A tömeges polírozás, kisebb alkatrészek tömeges mozgó (általában rezgő) tégelybe történő helyezése nedves vagy száraz csiszolómedium alkalmazásával. Ez az eljárás gazdaságilag is rentábilis, mivel a berendezés költsége alacsony, és nagy termelékenységű gyártás érhető el a minőség romlása nélkül. Felhasználása azonban korlátozott, általában kisebb és egyszerűbb daraboknál alkalmazható. Komplex, érzékeny, törékeny daraboknál, belső geometriával rendelkező, valamint nagyon pontos geometriájú eszközök esetén az alkalmazás korlátozott, vagy egyáltalán nem használható.

A felsoroltakon kívül számos további lehetőség is létezik a felületi minőség javítására, amelyekre a továbbiakban nem térünk ki.

KÉMIAI ÉS ELEKTROKÉMIAI FELÜLETI UTÓFELDOLGOZÁS

A kémiai kezelések, mint például a maratás, a kémiai polírozás, a kémiai megmunkálás, valamint az elektrokémiai polírozás, a fémnyomtatott alkatrészek felületi érdességének hatékony javítására is felhasználhatók. A legtöbb mechanikai felületkezeléssel szemben, a kémiai utófeldolgozási technikák könnyen hozzáférhetnek a belső felületekhez, ezért alkalmazásuk előnyösebb a bonyolult geometriájú részek, például a cellás és a rácsos szerkezetek, valamint a bennszülött alkatrészek felületi utókezelésében. Lehetőséget biztosítanak a teljes geometriájú kiterjedő megmunkálásra, illetve maszkolásokat alkalmazva, helyi kezelésekre is megfelelők. A technológia igen egyszerű, a fémnyomtatott alkatrészeket vegyi fürdőkbe merítik, míg a kezelést nem igénylő részeket a vegyi fürdőben lévő kémiai anyagra inert anyaggal vonják be. Az anyageltávolítás mértékét az oldat koncentrációjával, hőmérsékletével és az alkatrész benne eltöltött idejével szabályozzák.

Az anyageltávolításban alkalmazott kémiai és elektrokémiai módszerek – bár igen hatékonyak, mégis – túl hosszú expozíciós időt igényelnek, amelyet a felület kezdeti állapota jelentősen befolyásol. A hosszadalmas folyamatok nehézséget jelenthetnek az alkatrész lokális méreteinek szabályozásában, ezért a folyamatparaméterek optimalizálásával biztosítani kell az állandó anyagleválasztási sebességet. Ennek kivitelezése azonban összetett, bonyolult feladat.

Porágyas technológiával gyártott alkatrészek esetén, a felületek kémiai utófeldolgozásának egy másik módszere,

amikor a külső felületeken adott mintázatokat alakítunk ki, amelyek specifikus felületi funkciókat látnak el (pl.: kenőanyag-tapadás), amellet, hogy csak a felületérdességet csökkentenék. A felületi mintázat és a szabályozott felületi morfológia kialakítása nagymértékben meghatározhatja az alkatrész kopással szembeni ellenállását.

FELÜLETBEVONATOLÁS

A felületi utófeldolgozáshoz tartoznak a fémnyomatott anyagokra felvitt felületi bevonatok, amelyek specifikus felületi funkciókat látnak el, illetve szabályozott felületi morfológiákat alkotnak, és nem csupán a felületi érdességet javítják. A fémnyomatásnál használt alapanyagok felületi javításához különféle funkcionális bevonatok alkalmazhatók, amelyek többek között a tribológiai tulajdonságokat, a korrózióállóságot, a kifáradást, a repedések terjedésével szembeni ellenállását, valamint a biológiai alkalmazást javítják.

FESTÉS

Az alkatrészek felületének kialakításában az érdesség és a felület passziválása mellett, a megjelenés is fontos lehet. Katonai eszközök esetén a csillogás nem megengedhető, illetve az álcázhatóságot is figyelembe kell venni. Ezért sok esetben az alkatrészek külső felületét festeni, illetve lakkozni kell. Általában ez az alkatrészen elvégzendő utolsó művelet. Műanyag alkatrészek esetén a nyomtató anyag megfelelő színének megválasztásával, az alkatrész már anyagában is színezhető. Léteznek több színben nyomtató műanyag nyomtatók, amelyeknél az alkatrészeket (vagy csak azok felületeit) már anyagában is akár terepszínnel is el lehet látni. A fémnyomatott alkatrészeknél szinte minden olyan festék és lakk alkalmazható, amely egyéb más technológiával gyártott fém alkatrésznél bevált.

MECHANIKUS FELÜLETI UTÓFELDOLGOZÁS

Az additív technológiákkal gyártott alkatrészek felületeinek utómegmunkálására a mechanikai felületkezelések számos módszere alkalmazható. A felületi egyenetlenségek forgácsoló-/csiszológépekkel történő eltávolítására alkalmazott hagyományos technikák közé tartoznak a forgácsleválasztás: a marás, a köszörülés és a polírozás munkafolyamatai. Ezek az utómegmunkálások a felső felületből vékony réteget választanak le a geometriai hibák eltávolítására. Az említett alkalmazások ipari méretekben is jól használhatók a fémnyomatott alkatrészek felületi érdességének javítására, azonban a költségeket jelentősen megnövelik, és csak olyan felületeken alkalmazhatók, amelyek forgácsolással egyébként is előállíthatók. Az alábbiakban egy forgácsolással egybekötött eljárást ismertetünk, amellyel olyan felület is megmunkálható, amely hagyományos szerszámgepeken nem kivitelezhető.

LÉZERES UTÓMEGMUNKÁLÁSOK

A lézeres megmunkálások mind a felületi minőség javítása, mind a porozitás csökkentése érdekében alkalmazhatók. A lézeres felületkezelési eljárásokat már különböző alkalmazásoknál használták a porágyas fémnyomatott alkatrészek felületi minőségének javítása érdekében. A femtoszekundumos lézeres mikromegmunkálás hatékonyan alkalmazható többek között a Ti-6Al-4V alapanyagú alkatrészek felületi érdességének csökkentésére. A lézeres

polírozás egy másik ígéretes technológia, amely fókuszált, ultrarövid lézerimpulzusokkal, nagy teljesítménysűrűséggel mikroméretű olvadást idéz elő lokálisan a felületen, ezzel hatékonyan javítva az alkatrészek felületi minőségét. A lézer a felületen megolvasztja a legmagasabb csúcsokat, és kihasználva a kapillaris nyomást, valamint a felületi feszültséget az olvadékmedencében, a domborulatok melletti völgyeket kitölti az olvadékkal. Ezzel elvileg a felület érdességét anyagvesztés nélkül képes kisimítani.

A lézeres újraolvasztás – akár az egyes rétegek felhordása után, akár az alkatrészkontúr utolsó lépéseként alkalmazva is – hatékony módszer az anyag porozitása, valamint a felületi érdesség csökkentése érdekében. Alumínium ötvözeteknél (pl.: AlSi10Mg) az egyes rétegekben belül az első pásztázási sávhoz képest azonos és ellentétes irányban végzett irányított újraolvasztás jelentős érdességcsökkenést eredményezhet a felső felületen. Figyelembe véve a felületi állapot és a poruseloslás sajátosságait a széleknél, illetve a belső területeken, az irányított újraolvasztás a külső felületek közelében általában hatékonyabb. A megfelelően optimalizált újraolvasztással a CNC-megmunkálással összehasonlítható minőségű felületi érdesség érhető el. A porozitás a porágyas fémnyomatásos technológiáknál is csökkenthető a lézer által alkalmazott „szigetpásztázó” minta használatával. A technológia egy saktáblaszerű mintát alkalmaz, amelyben a pásztázás váltakozó irányban javítja a kitöltést, csökkenti a hőmérsékleti gradienseket a hő jobb elosztásával. A hegedés jobb arányú lesz, így kisebb porozitású lesz az alkatrész. Ez egy jól használható módszer, a nyomtatási időt és költségeket azonban jelentősen megnöveli. Az SLM-technológia alkalmazásakor a pásztázó lézersugár alakja a folyamat közben módosítható, ezzel a felületen létrejövő fröccsenést csökkenteni lehet. Impulzus-energiabevitelrel az alapanyagot fokozatosan előmelegíthetjük. Az EBM (electron beam melting) esetben az elektromos töltés hatására porszemcsék lökődhetnek ki a porágyából, és ezzel egyes olvadékdarabok nem kívánt helyre kerülhetnek, és oda is hegednek. Ez a jelenség csökkenthető a nyomtatóágy ambiens előmelegítésével, valamint az elektronsugár gyors előpásztázásával, amely a port az olvasztás előtt lokálisan előmelegíti, majd közvetlenül a fősugár előtt előolvasztja.

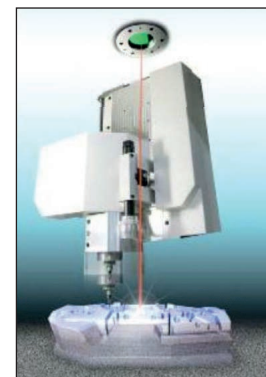
FELÜLETI MINŐSÉG JAVÍTÁSA HIBRID GÉPEL

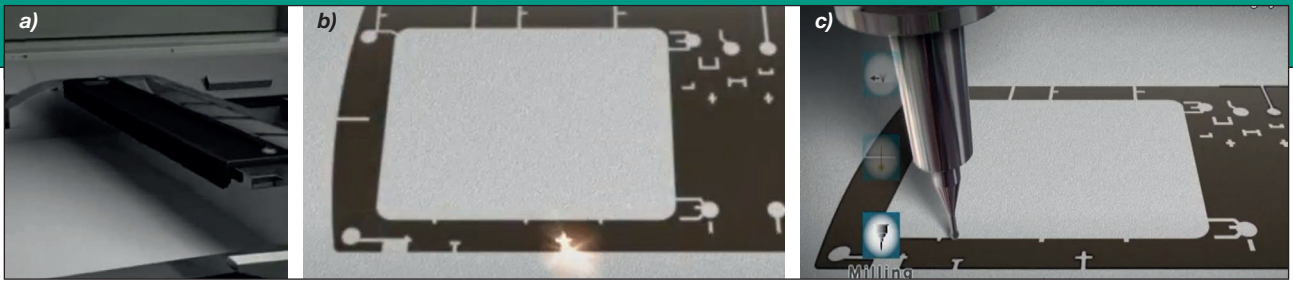
A hibrid gépek olyan berendezések, amelyek két különböző gyártási eljárást ötvöznek egyetlen gépben. Ilyen lehet többek között a forgácsolási eljárás ötvözése additív eljárással, vagy egy additív eljárással épített alkatrész forgácsolással történő felületi minőségének javítása.

Ilyen hibrid gép pl.: a Matsuura Lumex, amely egyetlen felfogásban képes porágyas 3D-s fémnyomatást és marást elvégezni a darabon (21. ábra).

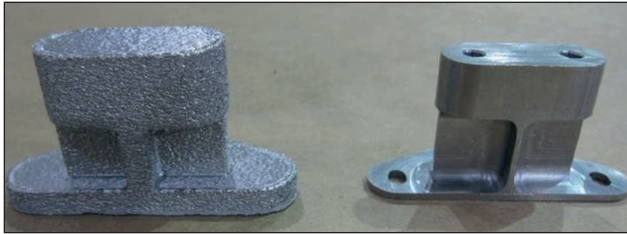
A gép először porágyas nyomtatást végez egy alaplemezen. Porágyat terít, majd lézersugárral összeolvasztja adott pályán a port. Ezt tíz rétegben végzi el, majd az elkészült geometriáról, egy kis porszívó berende-

21. ábra. A Matsuura Lumex hibrid gép felépítése. Lézersugár végzi a por olvasztását, utána a marógép része simítja a nyomtatott felületet [26]





22. ábra. A hibrid gép munkafolyamatai: a) porterítés, b) lézeres olvasztás [27], c) rétegek marása [28]



23. ábra. Nyomatott, és a nyomtatás után megmunkált alkatrész [29]

zéssel eltávolítja a port. Utána mikromarókkal (általában több lépésben) a kontúrt körbe marja. A következő fázisban a port visszateríti az ágyra, és további 10 réteget nyomtat. Ez a folyamat ismétlődik, amíg a teljes munkadarab el nem készül. A folyamatot a 22. ábra szemlélteti. Eredményül egy fémmnyomatott alkatrészt kapunk, finommart minőségű felületekkel. Az eljárás nagy előnye, hogy mivel nyomtatási folyamatok közben történik a marás, mind a belső, mind a külső felületen (még bennszülött alkatrészekben is) egyaránt elérhető sima finommart felület, olyan felület, amely semmilyen más hagyományos eljárással sem kivitelezhető. Szinte minden geometria legyártható ezzel az eljárással jó felületi minőséggel.

Természetesen ennek az eljárásnak is léteznek korlátai. Mivel a marószerszámok nem lehetnek tetszőlegesen vékonyak (az alkalmazásnál 0,6 mm átmérő az ajánlott), ezért szorosan illesztett alkatrészek illesztési felületei között nem alkalmazható. Itt ugyanis az illesztési méret 1-2 nagyságrenddel kisebb lehet, mint a szerszám átmérője. Ezért pl.: az illesztett csapot, az összeszerelt fogaskereket stb., nem lehet ezzel az eljárással sima, mart felülettel gyártani. A megfelelő felületi érdesség eléréséhez, a marás feltétel nélkül szükséges (23. ábra).

A MARADANDÓ FESZÜLTSEGEK CSÖKKENTÉSE A TERVEZÉS IDŐSZAKÁBAN

A maradandó feszültségek döntően befolyásolhatják a 3D-s nyomatott alkatrész élettartamát, ezért ezt a problémát különös gonddal kell kezelni. Ehhez számos módszert dolgoztak ki:

- A prediktív modellezéssel a maradandó feszültségek alacsonyabb szinten tarthatók. Szimuláció során meghatározhatók a megfelelő nyomtatási paraméterek, mint például a hőbevitel, az optimális pásztázópálya és a rétegvastagság annak érdekében, hogy a folyamat során minél kevesebb többlethőt vigyünk be a rendszerbe.
- A megfelelő tartó- és irányvezető szerkezetek kialakítása, és az alkatrészorientáció optimalizálása szintén minimalizálhatja a maradandó feszültségek mértékét.
- A nyomtatóalappal és az alapanyag előmelegítése a nyomtatás megkezdése előtt csökkenti a hőmérsékleti gradienseket, amelyek gyakran a maradandó feszültség fő forrásai. Azonban ez a módszer nem mindegyik fémmnyomatásos technológiánál alkalmazható egyenlő hatásossággal. Mivel az additív gyártás elektronsugara (EBM) alacsonyabb hőmérsékleten működik, ezért az előmelegítési technika sikeresebb az EBM-nél, mint a nagyobb hőmérsékleten működő irányított energia

depozíciós (DED) vagy szelektív lézerolvasztásos (SLM), illetve a szelektív lézer szinterelési (SLS) technológiáknál. [25] A porágyas fúziós folyamatoknál a területi (vagy más néven „sziget”) pásztázási stratégia segíthet a maradandó feszültségek koncentrációjának mérséklésében. Ennek a stratégiának lényege, hogy az expozíciós területet kisebb részekre osztjuk, amelyeket „szigeteknek” nevezünk, ezzel rövidítjük a pásztázási hosszúságokat. [25]

A maradandó feszültségek hatékony csökkentése a hőkezelés. Ezt az eljárást önálló bekezdésben tárgyaljuk.

A 3D-S NYOMATOTT FÉM ALKATRÉSZEK POROZITÁSÁNAK ÉS SŰRŰSÉGÉNEK JAVÍTÁSA

Sok esetben az alapanyag összetétele, minősége, a szemcse alakja (a gömb alakú szemcsék például nagyobb sűrűséget eredményezhetnek) és mérete lehet a nagy porozitás és alacsony sűrűség forrása, amikor egyes szemcsék nem megfelelően hegednek össze a folyamat során [25]. Ezért minden esetben csak a dokumentációban előírt összetételű és szemcseméretű, meghatározott beszállítótól beszerezett alapanyagokat szabad felhasználni. Beszállítási bizonytalanság esetén ügyelni kell arra, hogy egy adott időszakra (katonai felhasználás esetén a hadműveleti időszakra) megfelelő mennyiségű és minőségű nyersanyag álljon rendelkezésre. A porok újrahasonosításakor is különös figyelemmel kell eljárni, mert a nem megfelelő tisztított poroknál a szemcsék összehegedése problémát okoz, és ez porozitáshoz, illetve sűrűségcsökkenéshez vezet. A nyomtatási folyamat során fellépő porozitás a nyomtatási paraméterek megfelelő beállításával csökkenthető. A paramétereket általában az adott anyaghoz és az adott geometriához kell optimalizálni, illetve a gépkezelőnek az adott anyaghoz, valamint a nyomtatási munkához kell hangolnia gépét. Ez sok esetben kísérletezést jelent. A gépparaméterek, mint például a lézer teljesítménye, a pásztázási sugár képe (a sugár vetített mérete és alakja), az adott anyaghoz és a nyomtatási munkához módosulnak mindaddig, amíg a porozitást minimálisra nem sikerül csökkenteni. A megfelelő paramétereket a gyártási dokumentációba kell rögzíteni. A megfelelő sűrűség utófeldolgozási módszerekkel is javítható.

HŐKEZELÉSEK

A nyomtatás utáni hőkezelések az additív technológiával készült alkatrészek anyagtulajdonságainak számos paramétereit javíthatják az alkatrész nyomatott alapállapotához képest. Az additív eljárással készült darabok mikroszerkezeti egyenletessége, az izotróp mechanikai tulajdonságok javítása, valamint a maradandó feszültségek csökkentése várható a megfelelő hőkezelés után. A gyakorlatban a fémmnyomatott anyagoknál jellemzően alkalmazott hőkezelések széles skálája létezik. Kezdetben a hagyományos technológiával előállított anyagoknál kidolgozott hőkezeléseket alkalmazták, azonban a nyomatott alkatrészek és a hagyományos technológiával gyártott anyagok között lényegiek a különbségek, amelyek szükségessé tették a speciális, nyomtatás utáni hőkezelések kifejlesztését. A hőkezelési hőmérséklet, az időtartam, a kezelési lé-

pések sorrendje és a hűtési sebesség finom változtatásai jelentősen befolyásolják a porágyas technológiával készült alkatrészek mikroszerkezeti tulajdonságait, és mechanikai viselkedését. [30] A gyártási folyamat során fellépő magas hőmérsékleti gradiensek irányított mikroszerkezeti tulajdonságokat hoznak létre az alkatrészben. Jelentős a szemcseméret-egyenletlenség az olvadékfürdővel érintkező határfelületeken. A nagy hűlési gradiens következtében az olvadékfürdő határfelületein nagyobb a szemcseméret-durulás. A nyomtatás utáni hőkezelések hatékonyan kezelik ezeket a problémákat azzal, hogy elősegítik a porágyas technológiával készült alkatrészek mechanikai viselkedésének finomhangolását és a nyomtatási anizotrópiák csökkentését. A hőkezelések a mikrostruktúrát homogenizálása, és az izotrópia biztosítása mellett a gyártási folyamat során fellépő nem kívánatos anyagfeszültségeket is képesek csökkenteni, illetve megszüntetni. [30]

FESZÜLTÉGCSÖKKENTŐ, FESZÜLTÉGMENTESÍTŐ HŐKEZELÉS

Ezt az eljárást szinte minden fém 3D-s nyomtatott alkatrésznel el kell végezni. A fém 3D-s nyomtatási folyamat során jellemző a magas hőmérséklet a lézerolvasztási helyen, és az azt követő gyors lehűlés. Ha egy fém alkatrészt szélsőséges hőmérsékletváltozásoknak tesznek ki, akkor abban nagy maradandó belső feszültségek keletkeznek.

A maradandó feszültség következtében fellépő deformációk elkerülése érdekében, a porágyas eljárással gyártott alkatrészekenél is feszültségcsökkentő hőkezeléseket kell alkalmazni. A feszültségmentesítési ciklusok száma az alkatrész gyártásához használt fémalapanyagtól vagy fém-porótvázattól, az alkatrész méretétől és alakjától is függ. Az alkatrész felületének oxidáció elleni védelme érdekében a feszültségcsökkentő hőkezelést inert (tipikusan argon) atmoszférában kell elvégezni. Az alkatrészt általában még az alaplemezhez rögzített állapotában hőkezelik.

A feszültségmentesítési hőkezelés során a darabot kemencébe helyezik, ahol 1-2 órán keresztül 550–675 °C-on tartják, majd lassan (a kemence programozott lekapcsolásával) lehűtik. Ezzel az eljárással a feszültség-korróziós repedések is hatékonyan csökkenthetők. [24]

EDZÉS, NEMESÍTÉS

Számos porótvázat a 3D-s nyomtatás után edzeni, illetve nemesíteni lehet (pl.: szerszámacél minőségű por). Itt olyan módon járunk el, mint a hagyományos anyagoknál, azonban – mivel itt kész darabokat kell hőkezelné – jóval óvatosabban dolgozzunk, nehogy deformálódjanak a nagy hőmérséklet-változás során. A melegítést lassan végezzük, és általában inert gáz atmoszférában. Az eljárást itt a már eltávolított darabon végezzük. Léteznek olyan esetek is, ahol külön felületi edzést is alkalmaznak, mint a szerszámacéloknál.

POROZITÁS CSÖKKENTÉSE HŐKEZELÉSSSEL: MAGAS HŐMÉRSÉKLETŰ IZOSZTATIKUS SAJTOLÁS

A másodlagos hőkezelés, mint a magas hőmérsékletű izosztatikus sajtolás (HIP – high temperature isostatic pressing) segít a fémrészek mikroszerkezeti és mechanikai tulajdonságainak javításában.

Az eljárásnál magas hőmérsékletet (2200 °C-ig) és nagy izosztatikus gáznyomást (100–3100 bar, általában inert gázatmoszférát) alkalmaznak az alkatrészben a lehető legnagyobb sűrűség elérése, a porozitás csökkentése és a belső üregek megszüntetése érdekében. A fém alkatrészek magas hőmérsékletű izosztatikus sajtolásával kedvező

mechanikai tulajdonságokat érhetünk el, amelyek sok esetben összehasonlíthatók akár egy öntött, némely esetben egy kovácsolt anyaggal. Az eljárással 99% feletti sűrűség érhető el, ha megfelelő minőségi alapanyagokat és megfelelő nyomtatási paramétereket alkalmazunk. A forró izosztatikus préselés, utófolyamatként elősegítheti a maradék porozitás eltávolítását a végső alkatrészektől.

Amikor az alkatrészeket magas hőmérsékletű izosztatikus préselési eljárással kezelik – emelt hő és nyomás egyidejű alkalmazása inert gázatmoszférával – a belső üregek és mikroporozitások az anyag képlékeny deformációjának, áramlásának és diffúziós kötésének kombinációjával megszűnnek. [30] Fontos megjegyezni, hogy egy ilyen hőkezelés időtartama – amely természetes hűtés alkalmaz – akár 8–12 óra között is eltarthat. Létezik azonban gyorsítási technológiával működő HIP-rendszerek, amelyek lehetővé teszik az alkatrészek gyors hűtését, 1260 °C-ról 300 °C-ra akár 30 perc alatt [24].

A magas hőmérsékletű izosztatikus préselési eljárást különböző gyártmányok tulajdonságainak javítására használják: hagyományos öntvényekhez, porkohászati termékekhez, fém fröccsöntött alkatrészhez újabban kerámiákhoz, fémnyomtatott alkatrészhez. [30]

A magas hőmérsékletű izosztatikus préselési folyamat a következő tulajdonságokat javítja:

- a belső üregek és a mikroporozitás megszüntetése;
- a kifáradási tulajdonságok enyhítése;
- a mikrozugorodás csökkentése;
- nagyobb szakítószilárdság elérése;
- nagyobb ütési szilárdság elérése;
- csökkenti a mechanikai tulajdonságok szórását.

Az eljárás hátránya a 3D-s nyomtatott alkatrészek esetében, hogy nem alkalmazható belső, zárt üreggel rendelkező konstrukcióknál, mert a nagy nyomás hatására a belső kikönnyítés (üreg) összeroppanhat. Ha ezt az eljárást kívánjuk alkalmazni, lényeges, hogy megfelelő nyílt cellás konstrukciót tervezzünk, ahol a külső és a belső nyomás könnyen ki tud egyenlítődni.

MÁSODLAGOS ANYAG INFILTRÁCIÓJA

A porágyas fúziós alkatrészekenél az infiltráció egy másik utófeldolgozási lehetőség. Ezt a módszert a fémrészben maradt üregek kitöltésére alkalmazzák. Ennél az eljárásnál egy másik anyaggal töltjük ki a pórusokat. Az anyagválasztás nagyon lényeges, mert a kitöltőanyag tulajdonságának olyannak kell lennie, hogy ne befolyásolja negatívan a teljes test tulajdonságait, továbbá elég kicsinek kell lennie ahhoz, hogy az üregekbe be tudjon hatolni. A diffúziós anyag azonban befolyásolni fogja az alapfémek kémiáját, amelyek következtében hatással lesz az alkatrész egyéb tulajdonságaira (mechanikai, korróziós, elektromos stb.). Az eljárás alkalmazásakor mindig mérlegelni kell, hogy a porozitás mértéke vagy az egyéb befolyásoló tényezők a jelentősebbek-e az alkatrész használata során. [25]

ÖSSZEFOGLALÁS, A KUTATÁS JELENTŐSÉGE

A tanulmányban érintett témák alapján látható, hogy milyen problémákkal állunk szemben, ha gyors prototípusgyártó eljárásokkal szeretnénk nagyobb igénybevételnek kitett alkatrészeket gyártani. A 3D-s fémnyomtatással készített alkatrészekenél a legjobb eredményeket a folyamatparaméterek optimalizálásával lehet elérni. Az utófeldolgozási technikák csak később használhatók a technológiából adódó hiányosságok kompenzálására. Ezért a fokozott



funkcionalitás, és az erőforrások optimalizált felhasználása érdekében, már a tervezési szakaszában elengedhetetlen a gyártási és az utófeldolgozási paraméterek figyelembevételével. A hőkezelés utáni alakváltozások valószínűségét az alkatrész geometriája és a hőkezelési ciklus alapján kell figyelembe venni. Ezért az eredeti konstrukciónál, és a ráhagyási alakzat tervezésénél figyelembe kell venni az esetleges anyag-eltávolítás szükségességét a hőkezelés utáni geometriai beállításhoz. Nem valószínű, hogy egyetlen utófeldolgozási technika optimális megoldás lenne az összes fém 3D-s nyomtatott alkatrésze. Az utófeldolgozás megfelelő megválasztását és sikeres alkalmazását az alkatrész gyártási stratégiájának, célfelhasználásának, üzemi körülményeinek, anyagának, geometriájának, felületi és olvasztási jellemzőinek, és természetesen a költségek tükrében kell megválasztani. Ezért lényeges, hogy a megfelelő utófeldolgozási technikák meghatározásához, testre szabásához és optimalizálásához részleteiben kell ismerni az olyan kulcstényezőket szerepét és relatív fontosságát az additív technológiákkal gyártott alkatrészek viselkedésénél és teljesítőképességénél, mint a felületi érdesség, a porozitás, a maradandó feszültségek stb.

Jelenleg azonban vannak olyan különlegesen nagy igénybevételnek kitett fegyveralkatrészek, amelyeket egyik additív eljárással sem lehet kellő biztonsággal katonai használatra gyártani. Ilyen pl.: a fegyvercső. Az irodalomban található nyomtatott fegyverről szóló beszámoló, azok azonban egyelőre nem alkalmasak katonai használatra. A gyártási módszerek fejlődésével nem kizárt, hogy a jövőben ezek a technológiák alkalmasak lesznek ilyen alkatrészek gyártására is.

További problémát okoz, ha ezt egy távoli helyen, vagy esetleg tábori körülmények között kívánjuk végrehajtani. Harctéri alkalmazásoknál jelentős problémát okozhat a berendezések elhelyezése, helyigénye, a helyszínre történő szállítása, energia-ellátása (porszívó, huzalszikra, utóhőkezelő kemence, mosó stb.). Már a gép- és az alapanyag-előkészítés is igen bonyolult és hosszadalmas feladat, ahol a műveletek és a gyártási környezet tisztasága kiemelten fontos tényező. Továbbá lényeges, hogy megfelelő szakembergárda álljon rendelkezésre. Nem utolsó sorban azonban a gépek és a gyártási környezet helyigénye jelenthet nehézséget a harctérközeli telepítéshez. A megfelelő 3D-s nyomtatógép mellé, sok esetben gyártmányeltávolító berendezések (huzalszikraforgácsoló vagy fűrészgép, kézi utómegmunkáló és simítószerszámok) szükségesek; hőkezelő kemencék, igényesebb alkatrészek előállításához kémiai utófeldolgozó készítő labor, festőkabin stb. Ilyen esetben érdemes mérlegelni a gyártmány bonyolultságát, eszköz- és szakemberigényét, valamint az előállítási költségét, szembeállítva a beszer-

zési és raktározási költséggel. Egyszerűbb alkatrészeknél (mint pl.: a műanyag markolat) azonban elegendő egy megfelelő polimer kompozit 3D-s nyomtató. A technológiák fejlődésével elképzelhető, hogy a közeljövőben megjelennek olyan hibrid gépek, amelyek a nyomtatás mellett képesek lesznek gyártmány-eltávolításra, illetve különféle utófeldolgozásra is. (Erre a témára korábban már utaltunk a tanulmányunkban.) Ez a lehetőség kedvező a katonai használat szempontjából, az iparban azonban nem feltétlenül ez az irány.

A pontos paraméterek beállítása és az adott alkatrész tulajdonságainak megfelelő biztosítása adott 3D-s nyomtatás alkalmazásánál nem olyan egyszerű feladat, amelyet a nem kellően képzett szakemberek meg tudnának oldani. A kritikus ellátási problémákkal küzdő helyeken (pl.: missziós feladatoknál, harctéri javító csapatoknál stb.) nem várható el, hogy 3D-s nyomtatót kezelő szakemberek dolgozzanak, illetve, hogy ezen feladatokra ilyen szakembereket képezzenek. A feladat jelentősége messze túlmutat mind a speciális képzettséget igénylő munkakörön, mind a kiképzésre reálisan számható időtartamon. Tanszékünk (NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Haditechnikai Tanszék) ezért tűzte ki azt a feladatot, hogy az adott kritikus alkatrészekhez, az adott nyomtatási technológiához kidolgozza a teljes gyártási eljárást, kiválassza a megfelelő alapanyagot és kikísérletezze a beállítandó paramétereket, valamint elkészítse az adott alkatrészhez a gyártási dokumentációt. Ezzel a javítást végző szakemberek feladata jelentősen egyszerűsödik, a tőlük elvárható szaktudás elsajátításának kiképzési ideje lecsökken. Abban az esetben, ha mégis felmerülne a helyszínen olyan probléma, amelyhez mélyebb szaktudás szükséges, azt az itthoni szakemberek távsegítségével már meg tudják oldani.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatási témát kidolgozását a TKP2021-NVA-16 azonosítószámú, „Alkalmazott katonai műszaki-, had- és társadalomtudományi kutatások a nemzetvédelem, nemzetbiztonság területén a Hadtudományi és Honvédtisztképző Karon” című pályázat segítette.

A TKP2021-NVA-16 számú projekt 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.*



HIVATKOZOTT IRODALOM

- [24] 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.);
- [25] 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.);
- [26] Hybrid Metal 3D Printer LUMEX Avance-25 & Application, Matsuura Europe GmbH Additive Manufacturing Technolog, 2015. https://teknologiategollisuus.fi/sites/default/files/file_attachments/1300_matsuura.pdf (Letöltve: 2022.10.7.);
- [27] MATSUURA-Lumex Avance 25 - Metal hybrid 3D printer https://www.maquinsier.com/en/product/lumex_avance_25/ (Letöltve: 2022.10.7.);
- [28] https://www.matsuura.co.jp/english/media_library/matsuura-lumex-avance-25-solution (Letöltve: 2022.10.7.);
- [29] 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.);
- [30] Yadroitsev, Igor - Yadroitsava, Ina - Du Plessis, Anton - MacDonald, Eric. 2021. Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals, Additive Manufacturing Materials and Technologies Elsevier, ISBN: 978-0-12-824090-8;
- [31] Hot Isostatic pressing (HIP), https://www.owl-additive-manufacturing.com/en-gb/hip?gclid=CjwKCAjwwL6aBhBIEIwADycBIBpV4xhAjlj--9B0hxrdfX7KbBMM_aRxpNjDyPOkBXgyAOJB6SvmBoCivQQA_vD_BwE.