

Rozsdamentes bevonat fejlesztése additív technológiával

Jelen kutatás célja a különböző fémek kohéziós kötésének fejlesztése volt saját gyártású fémpor és az additív technológia előnyeinek kombinálásával. A 3D nyomtatás segítségével ugyanis csökkenthetjük a hőhatászonát és ezáltal a rideg intermetallikus vegyületek kialakulását. Ebben a munkában megvizsgáltam az ausztenites rozsdamentes acél por (EN. 1.4301) bevonatként történő felhasználásának lehetőségét a fém 3D nyomtatás során. A rozsdamentes por gyártása egy saját építésű gázatomizációs porlasztóberendezéssel történt. A 3D nyomtatást megelőzően vizsgáltam a szemcseméreteloszlást és a szemcsék morfológiai tulajdonságait is. A szegmentált port felhordtam egy szénacél alapra ~ 100 µm vastagságban különböző nyomtatási paraméterekkel. Az így kapott mintadarakok kohéziós kötését vizsgáltam pásztázó elektronmikroszkóppal és a komputertomográffal. A bevonatolt mintán korróziós vizsgálatokat is végeztem, amely megmutatta, hogy a rozsdamentes por a 3D nyomtatást követően is megőrizte előnyös tulajdonságait a környezeti hatásokkal szemben. Az eredmények alapján elmondható, hogy saját gázatomizációs berendezéssel tudtam 3D nyomtatásra alkalmas fémport előállítani és a nyomtatás előnyeinek kiaknázásával csökkenteni tudtam a diffúziós hatást a kötési zónában.

1. BEVEZETÉS

A poralapú technológiák egyre nagyobb teret hódítanak maguknak az additív gyártástechnológiák megjelenése óta. Korábban is használták ilyen formában a különféle ötvözeteket (porkohászat, fém fröccsöntés, hideg/meleg porszórás technológiák stb.), de a fém 3D nyomtatás megjelenése emelte ezt egy új szintre.² A technológia drágaságát az egyszeri gépbeszerzésen túl a jelentős alapanyagköltség tartja jó ideje rendkívül magasnak. A piac kínálati versenyének köszönhetően az árak egyre lejjebb tolnak, az elérhető termékpaletta pedig egyre szélesebb. Kutatási szempontból azonban nincs lehetőség kis mennyiségű, egyedi porminta előállítására, reális áron.

[1] SZE Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, PhD-hallgató; SZE Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Anyagtudományi és technológiai Tanszék, egyetemi tanársegéd. Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai és optikai intézet, tudományos segédmunkatárs. Témavezetők: Dr. Zsoldos Ibolya, egyetemi tanár, Dr. Varga Lajos Károly, tudományos főmunkatárs.
[2] ISTVÁN HATOS – HAJNALKA HARGITAI – JÓZSEF GÁBOR KOVÁCS: Characterization of Internal Stresses in Hybrid Steel Structures Produced by Direct Metal Laser Sintering, in *Materials Science Forum* 885 (2017) 196–201. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.885.196>.

Jelen tanulmány másik aspektusa a különleges hegesztési kötések kialakításának lehetőségei és azok vizsgálata, minősítése. A hegesztési kötések kialakításának két fő oka lehet. Egyszerűbb az alkatrész legyártása két előgyártmány összehegesztése révén vagy két különböző anyagtypusból kell legyártani a terméket. A második esethez kapcsolódik a jelen kutatás is. A különböző anyagtypusok hegesztése nagyon sokféle alkalmazási lehetőséget rejt magában, ahol a különböző anyagok jellemző tulajdonságait optimalizálják a kívánt alkalmazáshoz, hogy költséghatékony és értéknövelő eredményt érhessenek el. A nem fúziós hegesztési módszereket szokták ilyen esetekben előnyben részesíteni szemben a fúziós eljárással.³ Ebben az esetben ugyanis nem olvad meg az alapfém, nem keletkezik rideg intermetallikus vegyület (intermetallic compounds – IMC), amely az idő előtti tönkremenetelhez vezetne. Számos hegesztési kötést befolyásoló tényező van, amelyeket figyelembe kell venni eltérő fémek hegesztése esetén és a hegesztési hézagok előállításakor. A megfelelő 3D nyomtatási paraméterekkel előkezelt felületek hegesztése esetén vélhetően csökkenthető vagy akár teljes mértékben figyelmen kívül hagyható az IMC réteg hatása. Erre a nyomtatás során jelentkező kisebb hőhatászónából lehet következtetni.⁴ Az ausztenites rozsdamentes acél és az alacsonyán ötvözött acélok hegesztése a szén diffúzió és karbidképző hajlama, valamint a nikkell és króm diffúziója miatt tekinthető problémásnak. A karbidok megjelenése a rozsdamentes acélban és a martenzites zónák megjelenése a szén-acél felületén tovább bonyolítja a határfelületi mikroszerkezetet és ezáltal a fizikai/kémiai tulajdonságok alakulását.⁵ A trendek alapján arra lehet következtetni, hogy folyamatos fejlesztésre és kutatásra van szükség, különösen a korszerű mérnöki és ipari alkalmazásokra szabott anyagok esetében.

[3] PAUL KAH – MADAN SHRESTHA – JUKKA MARTIKAINEN: Trends in Joining Dissimilar Metals by Welding, in: *Applied Mechanics and Materials* 440 (2013) 269–276. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.440.269>

[4] DI OUYANG – NING LI – WEI XING – JIANJI ZHANG – LIN LIU: 3D printing of crack-free high strength Zr-based bulk metallic glass composite by selective laser melting, in *Intermetallics* 90 (2017) 128–134., <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2017.07.010>.; GAOLIN YANG – XIN LIN – FENCHENG LIU – QIAO HU – LIANG MA – JINFU LI – WEIDONG HUANG: Laser solid forming Zr-based bulk metallic glass, in: *Intermetallics* 22 (2012) 110–115. <http://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.10.008>.

[5] S. M. SHUSHAN – E. A. CHARLES – J. CONGLETON: The environment assisted cracking of diffusion bonded stainless to carbon steel joints in an aqueous chloride solution, in: *Corrosion Science* 38 (1996) 673–686., [http://doi.org/10.1016/0010-938X\(96\)00158-8](http://doi.org/10.1016/0010-938X(96)00158-8).; IGOR LITOVCHENKO – SERGEY AKKUZIN – NADEZHDA POLEKHINA – KSENIYA ALMAEVA – EVGENY MOSKVICHEV: Structural transformations and mechanical properties of metastable austenitic steel under high temperature thermomechanical treatment, in: *Metals* 11 (2021/4) 645. <https://doi.org/10.3390/met11040645>

2. ANYAGOK ÉS GYÁRTÁSI MÓDSZEREK

2.1. Anyagok

A kísérletek során szénacél alapra nyomtattam rá a később ismertetett módon előállított rozsdamentes ötvözetet. A minta alapját képező anyag egy sima EN 1.0038, 5 mm vastag szénacél lemez volt, melyből az előgyártmányt vízszugaras vágással munkáltam ki. Az alapanyagválasztás során mindenféleképpen egy széles körben alkalmazott, olcsó anyagot akartam keresni, amely jól hegeszthető. A rozsdamentes por alapanyagát tekintve megfelel az EN 1.4301-es rozsdamentes acélnek. Ez egy ausztenites króm-nikkel rozsdamentes acél, amelyre egyrészt a kiemelkedő korrózióállósága, másrészt viszont a jó hegesztési tulajdonságai miatt esett a választásom.

A porlasztás során nagy tisztaságú (99,999%) argon gázt alkalmaztam nyomásnövelő közegként, desztillált vizet pedig a porlasztott por hűtése és összegyűjtése céljából.

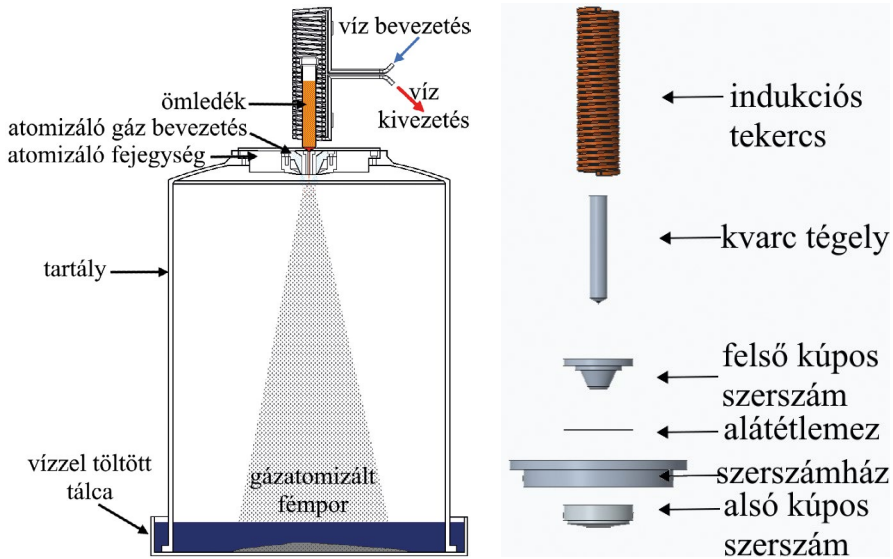
2.2. Gázatomizáció

A gázatomizáló berendezés 3 fő részre osztható. Az első egység az indukciós-tekercs és a benne elhelyezett kvarccső az alapanyaggal. A második rész a porlasztófej, a harmadik pedig a harang alakú rozsdamentes kamra. A harang egy vízzel teli tálcában helyezkedik el, melynek szerepe a porszemcsék összegyűjtése, lehűtése és a porlasztásból származó argon túlnyomás szabályozása.

Az induktortekercs 6 mm-es szögletes rézcsőből készült, 26 menettel, 34 mm-es belső átmérővel és 95 mm-es magassággal. Ez lehetővé teszi egy 30 mm átmérőjű kvarccső és a tekercset a hőszigetelésétől védő üvegszál paplan behelyezését az induktorba. A kvarccső egyik végén egy fúvóka lett kialakítva, melynek átmérőjét precíziós eljárással alakítottam ki, mivel ez egy fontos paraméter a megfelelő porlasztás érdekében. Az átmérőt dugós idomszerrel ellenőriztem, hogy elérjem a kívánt 0,9 mm-es fúvókaméretet. A kísérleti tapasztalatok alapján a beállított porlasztási paraméterek függvényében 0,7–1,2 mm között érdemes változtatni ezt az átmérőt.

Az alapanyag a kvarccső belsejében helyezkedik el. Ügyelni kell, hogy megfelelő méretű és geometriájú legyen az alapanyag, nehogy a hőtágulás hatására széttörje a kvarccövet. Egy szilikon csövet csatlakoztattam a kvarccső másik végére, amely az ömledék feletti pozitív argonnyomás felépülését és az ömledék oxidációval szembeni védelmét biztosította. Az alkalmazott nyomás 15 mbar volt. A gázatomizáló berendezés sematikus képét az 1. ábra szemlélteti.

1. ábra: A gáztomizáló berendezés sematikus ábrája (bal) és a porlasztószerszám robbantott modellje (jobb)

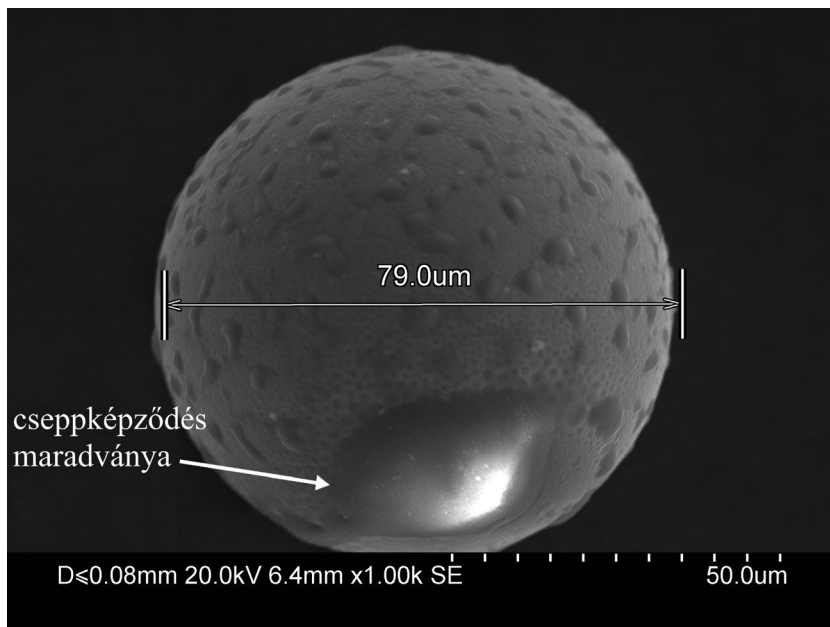


A porlasztószerszámban két illeszkedő kúpos felület és egy hézagoló gyűrű segítségével egy kör alakú rés hozható létre. Ez a rés felelős a porlasztó gázkúp kialakításáért. Ezt egy másik argon palackra kötöttem, amelyen 15 bar-os nyomást állítottam be. A gázkúppal kellően lehűtött szemcséket desztillált vízzel töltött tálcába gyűjtöttem, amelyből a teljesen lehűlt részecskéket egy mágnessel eltávolítottam. Az így előállított port azután egy ACS DY110 (T) kompakt klíma teszt-kamrában kiszáritottam 80° C-on 40%-os páratartalom mellett 4 órán át, majd 1 napig állni hagytam. A port ezután egy szitasor segítségével frakcionáltam.

2.3. Kísérleti módszerek

A porminta szemcseméretének és morfológiájának ellenőrzése céljából pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatokat végeztem egy HITACHI 3400 berendezésen. Összességében elmondható, hogy közel tökéletes gömb alakú részecskéket kaptam, amelyeken rendre megfigyelhető a cseppképződés mechanizmusa következtében kialakuló anyag többlet. A 2. ábra szemlélteti egy ilyen szemcse pásztázó elektronmikroszkópos felvételét.

2. ábra: Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel egy közel gömbszerű gázatomizált porszemcseről



A 3D nyomtatási kísérletekhez készítettem egy szénacél alaplapot, amelyet egy FLOW IFB 4800 típusú vízsugaras vágógéppel munkáltam ki. A megfelelően előkészített, felpolírozott, letisztított alaplapot ezt követően egy EOSINT M270-es lézerszinterező berendezésben pozicionáltam és megfelelően rögzítettem a 3D nyomtatási kísérletekhez. Az alkalmazott nyomtatási paraméterek előzetes becslésére a térfogati energiasűrűség (VED) képletét alkalmaztam,

$$E_d = P / (v \cdot h \cdot d),$$

ahol P – az alkalmazott lézerteljesítmény, v – a lézer pásztázási sebessége, h – a sraffozás szélessége, d – pedig a rétegvastagság.⁶ Az alkalmazott nyomtatási paramétereket az 1. táblázatban foglaltam össze.

[6] PAOLO FERRO – ROBERTO MENEGHELLO – GIANPAOLO SAVIO – FILIPPO BERTO: A modified volumetric energy density-based approach for porosity assessment in additive manufacturing process design, in: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 110 (2020) 1911–1921, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05949-9>.

1. táblázat: Változó és konstans 3D nyomtatási paraméterek

Minta sorszáma	Lézer- teljesítmény [W]	Pásztázási sebesség [mm/s]	VED [J/mm ³]	Konstans paraméterek	Érték
1	185	1000	1,85	Alaplap hőmérséklete	40 °C
2	185	900	2,05	Védőgáz típusa	N
3	185	800	2,31	Pásztázási stratégia	hatching, rot. 60°
4	185	700	2,64	Átlapolás	0,01
5	185	600	3,08	Rétegvastagság	20 μm
6	160	1000	1,6		
7	135	1000	1,35		

A nyomtatás során csak a $d \leq 0,06$ mm szemcseméretű port használtam fel és 6 réteg rozsdamentes port hordtam fel az alaplapra. Jelen kutatásban a záróréteg és az alsóbb nyomtatási rétegek pásztázási stratégiái megegyeznek.

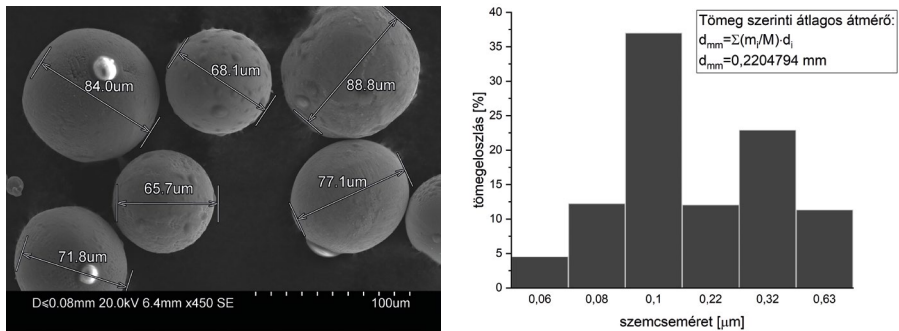
A korróziós vizsgálatot egy ASCOTT CC 1000ip ciklikus sópermet kamrában végeztem. A minták 48 órát töltöttek el az 5%-os koncentrációjú sós korrodáló környezetben 35°C-on. A vizsgálatot követően szemrevételezéssel és pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltam a határfelületen kialakuló korrózió nyoma-
it. A minták digitalizálását egy komputertomográf (CT) berendezéssel végez-
tem el, amely egy 225 kV mikrofókuszú röntgensóvel és flat-panel detektorral (Y.XRD1260) volt felszerelve. Vizsgáltam a felület menti adhéziós kapcsolatot, a porozitást az anyagpár között, valamint a záróréteg felületi érdességét is. A fel-
vételek során a csőfeszültség és a csőáram 190 kV és 0,12 mA volt. A CT vizsgálat
eredménye egy 10243 méretű voxel adat, amelyet VGStudio MAX 3.2 szoftverrel
dolgoztam fel és rekonstruáltam. A felvétel szűrkeségi árnyalatai alapján szeg-
mentáltam a levegő alacsony értékű és az anyag magas értékű voxeleit. A szeg-
mentálási lépéssel a minta felülete meghatározható. A minta hosszanti oldala
mentén 10 metszetben mentettem ki felvételeket. Ezeket egy képszerkesztő soft-
verrel készítettem elő a felületi érdességméréshez. A digitális érdességméréshez
egy saját fejlesztésű szoftvert használtam.

3. EREDMÉNYEK

3.1. Porgyártás

A gázatomizációs kísérlet eredményei ellentmondásosnak mondhatók. Egyrészt a morfológiát illetően kiváló minőségű, a 3D nyomtatással történő feldolgozáshoz nagyon ideális, gömbszerű szemcséket kaptam. A cseppképződés jól működött, az argon védőgáz, vízzáró szigeteléssel pedig kiválóan megóvta a keletkező szemcséket az oxidációtól. Másrészt viszont a szemcseméreteloszlás tekintetében további optimalizációra szorul a gyártás. A tömeg szerinti átlagos átmérő 0.22 mm-re adódott, amely meglehetősen távol van az ideálisnak mondható 0.05–0.06 mm-től. A szemcsékről készült SEM felvételt és az eloszlást a 3. ábra szemlélteti.

3. ábra: SEM felvétel a szemcseméret méréséről (bal) és a szemcseméret szerinti tömegeloszlásról (jobb)



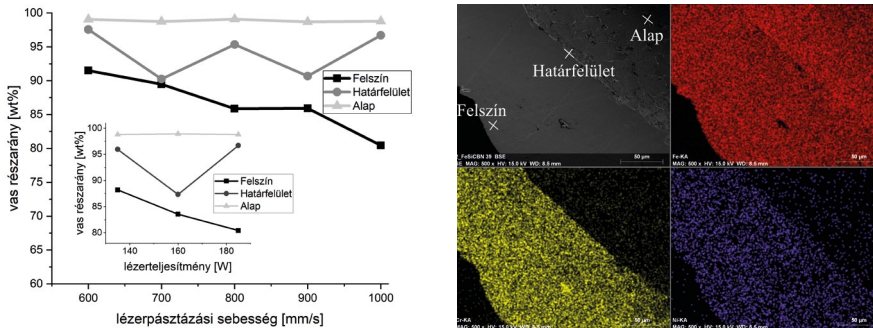
3.2. 3D nyomtatás

A 3D nyomtatási kísérletek sikeresnek mondhatók, miután alaposabban is tanulmányoztam a határfelületi adhéziós kapcsolatot és az anyagdiffúzió mértékét. Az alaptest és a bevonat integritásának ellenőrzésére SEM és CT vizsgálatot alkalmaztam. Több metszetben is ellenőriztem a két anyag közti kapcsolatot. Egy kisebb darabon CT vizsgálatot is végeztem. Összességében elmondható, hogy semmiféle jelentősebb porozitással, repedéssel nem járt a rozsdamentes por 3D nyomtatással történő felhordása a szénacél alapra. Az adhéziós kapcsolat tökéletesen kialakult, egy ~10 μm-es átmeneti réteg alakult ki esetenként a két anyag között. Az átlagos rétegvastagsága a bevonatnak 6 réteg esetén 100–120 μm körül alakult.

A lézerszinterezés során alkalmazott energiasűrűség diffúzióra gyakorolt hatását foglalja össze a 4. ábra. Az adatokat a SEM vizsgálatok során végzett mik-

roszondás pontelemzések szolgáltatták. Vizsgáltam a vas, króm és nikkel anyagok mennyiségét a bevonat szélén, a két anyag határfelületén és a szénacél alaplap belsejében, távol a szinterezett felülettől. Vizsgáltam továbbá elemtérkép segítségével a króm-nikkel dúsulást a felületi rétegben, predesztinálva ezzel a rozsdamentes bevonat 3D nyomtatást követő korrózióállóságának meglétét is.

4. ábra: Vaskoncentráció alakulása a minta keresztmetszete mentén (bal), SEM felvétele és EDS elemtérképe (jobb)



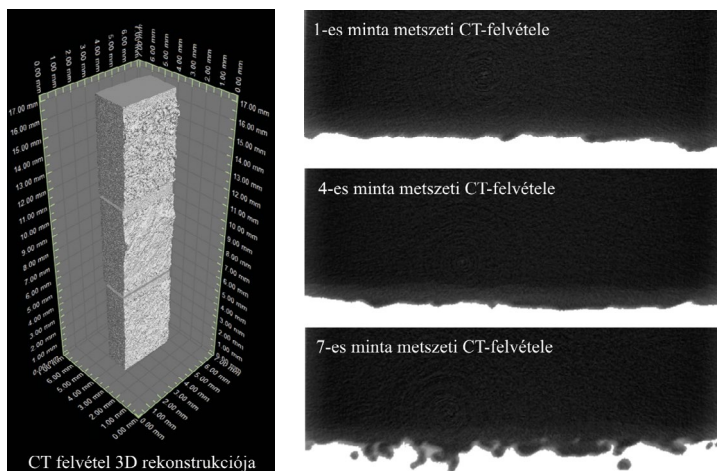
Az eredmények tükrében elmondható, hogy a növekvő energiasűrűség növeli a bevonat vas részarányát. A bevonat felszínét tekintve jól látható, hogy minél kisebb az anyaggal közölt energiasűrűség, annál alacsonyabb marad a vas részarány, kvázi több a Cr-Ni az adott felületi rétegben. A határfelületi területeken igen hektikus az összetétel, ennek az ismétlődő átolvasztás, a ciklikus energia-közlés, valamint az ötvözetlen szénacél alapban jelenlévő nagy mennyiségű vas az oka. A bevonattól távol, az alaplapon pedig tulajdonképpen konstans, 98,7–99 wt% vas koncentráció figyelhető meg. Az ötvözők koncentrációjának alakulása pont a fordítottja a vasénak. Meg kell jegyezni továbbá, hogy a csökkentett lézerteljesítménnyel készült minták felületi minősége elmaradt a 185 W-os, maximális lézerteljesítménnyel szinterezett darabokétól. A szemcsék sok esetben nem olvadtak meg teljesen, leváltak a minta előkészítése során.

3.3. CT vizsgálat és korróziós teszt

A SEM vizsgálatok során az aktuális metszet mentén tudtam vizsgálni az összetételt és az adhéziós kapcsolatot az anyagpár között. Annak érdekében, hogy egy komplett felület esetén is kijelenthessem a porozitásmentes, megfelelő kötés kialakulását, CT vizsgálatot kellett végezni néhány minta esetében. A minél jobb felbontás érdekében elvágtam az alaplapot és csak egy keskeny, 4 mm széles sávot vizsgáltam. A CT vizsgálatot és felületi érdességmérést csak az 1; 4; 7-es mintán végeztem el. Az ezt bemutató összefoglaló képsort az 5. ábra szemlélteti. Összességében elmondható, hogy a maximális lézerteljesít-

ménnyel készült darabok esetében nem találtam határfelületi porozitást, a 7-es minta esetén (P=135 W) voltak olyan helyek, ahol a zárórétegtől a határfelületig tartó nagyobb anyagihiány volt tapasztalható, de ahol sikeresen megolvastotta a lézer az anyagot, ott sem találtam a határfelületen porozitást. Ebből arra lehet következtetni, hogy a kisebb teljesítményhez kisebb szemcseméretű por és kisebb rétegvastagság alkalmazása szükséges az egybefüggő, porozitásmentes nyomtatáshoz. Azokon a helyeken, ahol a felülettől a határfelületig volt megfigyelhető az anyagihiány, ott valószínűleg az abláció jelensége léphetett fel több rétegben is. A lézerszinterezés minőségére és egyenletességére enged következtetni a záróréteg felületi érdessége. Az érdesség megállapításához a CT felvételeken az adott minta 10 jellemző szeletét vettem alapul. Ezeket a felvételeket behívva a saját fejlesztésű programba, a fekete-fehér pixelátmenetek alapján a Savitzky-Golay digitális szűrő segítségével illeszt a program egy alacsony fokú polinom görbét a zárófelületre.⁷ Az átmenetekhez tartozó pixeleket magasságértékeik alapján listázza a program és kétféle számítás alapján illeszt regressziós vonalat a felületre, amely az elméleti, nominális síkot szemlélteti. A két számítási mód közti különbség, hogy a „fit” minimalizálja a vonal alatti és feletti területeket, míg a „mean” számítás esetén mindig az exportált kép oldalával párhuzamos regressziós vonalat illeszt a felületre. Ebben az esetben a magasságértékek átlagos értékére illeszti ezt az egyenest.

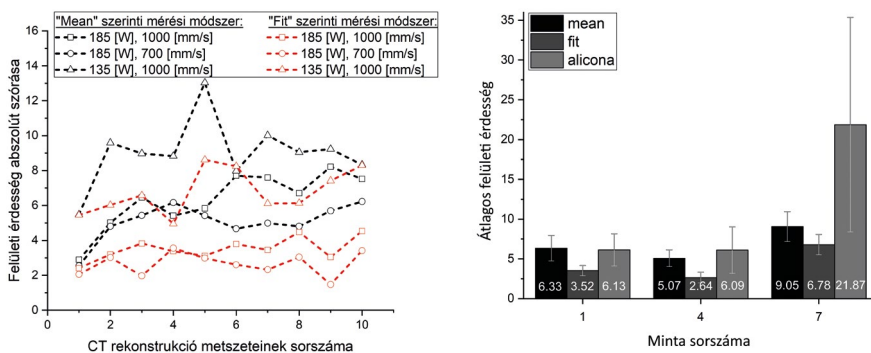
5. ábra: Rekonstruált CT felvétel az 1; 4 és 7-es mintákról (bal), metszeti CT felvételek (középső) és az érdességmérő program két számítási módszerének egy-egy jellemző esete (jobb)



[7] A. SAVITZKY – M. J. E. GOLAY: Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, in: *Analytical Chemistry* (1964) 1627–1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>.

A kétféle mérési módszerrel készült felületi érdességértékeket a 6. ábra bal oldala ábrázolja. Jól látható, hogy a fit eljárással a regressziós vonaltól való eltérések valóban minimalizálásra kerültek. Mindkét módszer esetén a legnagyobb energiasűrűséggel készült minta (#4) bizonyult a legjobbnak. Érdeemes megjegyezni, hogy a hetes minta esetében aluról sikerült csak megbecsülni a felületi érdességértéket. Ennek oka, hogy a metszeti képeken az alámetszések esetén nem képes a program egy vonal mentén két magassági értéket definiálni, így a Savitzky-Golay szűrő által generált görbe is csak közelíti azt. Ennek a hibának a minimalizálására beállítottam egy kézi korrekciót, amivel lehet javítani a görbe illeszkedésén manuálisan.

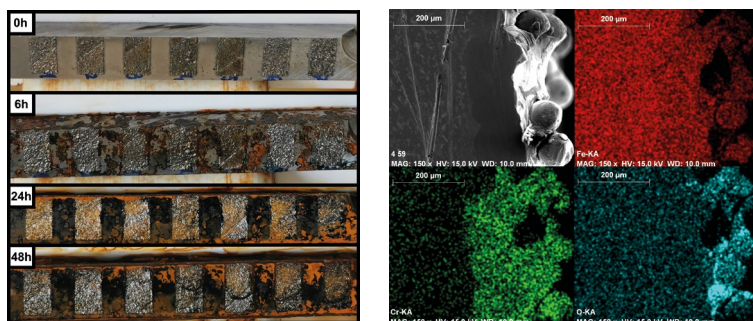
6. ábra: Felületi érdességértékek szórása 10 metszeti sík „mean” és „fit” mérési módszer alapján (bal) és az átlagos felületi érdességértékek összehasonlítása a három mérési módszer esetében (jobb)



A saját programmal kapott eredményeket hitelesítettem Alicona konfokális mikroszkóp segítségével. Meg kell jegyezni, hogy a mikroszkóp által digitalizált felületháló sok esetben lyukas volt. Ezeknek köszönhetően a mérési eredmények nagyobbra adódtak és az értékek szórása is jóval meghaladta a CT képekből kinyert adatokét. Jól látható, hogy a „mean” és az alicona értékek közel azonosak (kivétel a hetes minta értékében) és a legjobb felületi érdesség a legnagyobb energiasűrűségű, 4-es minta esetében adódott.

A korróziós vizsgálatokat a már elvágott szénacél lemezen végeztem el. Így a nyomtatott és elvágott felület korrózióval szembeni ellenállóképessége is vizsgálható volt. Az eredmények a 7. ábrán láthatók. Ezek alapján elmondható, hogy a nyomtatást követően is megőrizte korrózióállóságát az EN 1.4301-es anyag. Erre engedett következtetni a korábban ismertetett SEM anyagösszetétel elemzés is. A korróziós vizsgálat után csak a szénacél felületén tapasztaltam komolyabb korrodálódást, a rozsdamentes acél felületén egyáltalán nem. Ezt alátámasztják a SEM vizsgálatok is, amelyen nem látható komolyabb oxigéndúsulás sem a csiszolt, sem pedig a két anyag határfelületén.

7. ábra: Korróziós vizsgálati minta a ciklikus igénybevétel előtt (0 óra), alatt (6 és 24 óra) és után (48 óra) (bal), valamint a vizsgálatot követően, a metszetről készített SEM EDS elem térkép (bal)



4. ÖSSZEZÉS

A különböző fémek hegesztési kapcsolatának javítása céljából végzett előkísérletek során sikerrel állítottam elő kísérleti mennyiségű, 3D nyomtatásra alkalmas rozsdamentes fémport. Fontos megjegyezni azonban, hogy a gyártási folyamat további optimalizálást igényel. A gyártott port 3D nyomtatással, bevonatként alkalmaztam egy szénacél alaplapon. Az így előállított minták vizsgálatára pásztázó elektronmikroszkópos, komputertomográfias, felületi érdességmérési és korróziós tesztekkel végeztem. Ezek alapján elmondható, hogy a nyomtatás előnyeit kiaknázva sikerült lecsökkentenem a hőhatászóna és az ennek következtében kialakuló rideg intermetallikus réteg méretét és már egészen vékony, ~100 µm bevonat esetén is megszüntetni a két anyag közti diffúziós hatást. Az ilyen módon bevonatolt darabok már azonos anyagok hegesztési eljárásaival összeköthetők és így javítható a különböző fémekből készült szerkezetek mechanikai tulajdonságai.

1. A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok és a 3D nyomtatási tapasztalatok is azt bizonyítják, hogy a saját építésű gázatomizáló berendezésem képes a porágyas 3D nyomtatási technológiáknak megfelelő alapanyagot előállítani;
2. A SEM és CT-vizsgálatok alátámasztották, hogy a kiválasztott alapanyagok között megfelelő minőségű, porozitás és repedésmentes kohéziós kötés alakult ki;
3. A saját felületi érdességmérő program megfelelőnek bizonyult a 3D nyomtatott felület érdességének és ezáltal az alkalmazott gyártási paraméterek minősítésére is;
4. A pásztázó elektronmikroszkópos mérésekből kapott adatok alapján megállapítható, hogy a diffúzió hatása 3D nyomtatás esetén már ~100 µm-es rétegvastagság esetén elhanyagolható. Ezt a korróziós teszt is alátámasztotta.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen kutatás elkészítésében közreműködött: Fekete Imre, Ibriksz Tamás és Varga Lajos Károly.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- FERRO, PAOLO – MENEGHELLO, ROBERTO – SAVIO, GIANPAOLO – BERTO, FILIPPO: A modified volumetric energy density-based approach for porosity assessment in additive manufacturing process design, in *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 110 (2020) 1911–1921, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05949-9>.
- HATOS, ISTVÁN – HARGITAI, HAJNALKA – KOVÁCS, JÓZSEF GÁBOR: Characterization of Internal Stresses in Hybrid Steel Structures Produced by Direct Metal Laser Sintering, in *Materials Science Forum* 885 (2017) 196–201.
- KAH, PAUL – SHRESTHA, MADAN – MARTIKAINEN, JUUKA: Trends in Joining Dissimilar Metals by Welding, in *Applied Mechanics and Materials* 440 (2013) 269–276. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.440.269>
- LITOVCHENKO, IGOR – AKKUZIN, SERGEY – POLEKHINA, NADEZHDA – ALMAEVA, KSENIYA – MOSKVICHEV, EVGENY: Structural transformations and mechanical properties of metastable austenitic steel under high temperature thermomechanical treatment, in *Metals* 11 (2021/4) 645. <https://doi.org/10.3390/met11040645>
- OUYANG, DI – LI, NING – XING, WEI – ZHANG, JIANJI – LIU, LIN: 3D printing of crack-free high strength Zr-based bulk metallic glass composite by selective laser melting, in *Intermetallics* 90 (2017) 128–134., <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2017.07.010>.
- SAVITZKY, A. – GOLAY, M. J. E.: Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, in *Analytical Chemistry* (1964) 1627–1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>.
- SHUSHAN, S. M. – CHARLES, E. A. – CONGLETON, J.: The environment assisted cracking of diffusion bonded stainless to carbon steel joints in an aqueous chloride solution, in *Corrosion Science* 38 (1996) 673–686., [http://doi.org/10.1016/0010-938X\(96\)00158-8](http://doi.org/10.1016/0010-938X(96)00158-8).