

Additív hegesztéses gyártás jelene és jövője

A dinamikusan fejlődő robottechnika, a digitális megoldások és a szenzor-technika fejlődése indukálta a hagyományos gyártási folyamatok reformját. Az automatizált, gyors és költséghatékony eljárásokra való igény kombinálva az információs technológia fejlett eszközeivel lehetővé tette az additív gyártásnak mint a hagyományos felrakóhegesztés újragondolásának térhódítását a kutatási, fejlesztési és gyártószektorban. Alkalmazásával tetszőleges geometria felépíthető, aminek csupán az alkalmazott hegesztési eljárás térfogati felbontása szab határt. Napjainkban a fémporadagolásos, lézersugaras eljárás a legelterjedtebb: az autópártól kezdve a turbinagyártáson át az orvostechikáig találni alkalmazási példákat. A robotosított, védőgázos, huzalelektrodás ívhegesztés felhasználása az additív gyártási (rövidítve: AM) területen kevésbé kiforrott, de költséghatékonyasága és természeténél fogva számos alkalmazási lehetőséget nyújt.

Kutatásunkban a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékén működő Yaskawa-robotot felhasználva a technológiai korlátokat vizsgáltuk, valamint kovácsszerszámok javító-felrakó hegesztésének előkészítését végeztük. A kísérletek hátterre a Flexman Robotics Kft. ipari partnereinél felmerült igény. A hagyományos felrakóhe-

gesztéséhez képest az additív gyártás alkalmazásával költséghatékonyabbá tehető a javítás, mivel kevesebb hegesztőanyag felhasználásával pontosabban előállítható a szerszámgeometria már a hegesztés során, így jelentősen csökkennek a hegesztőanyag és utómegmunkálások költségei.

Az additív gyártási eljárások áttekintése

Additívnak nevezzük az olyan gyártási módokat, amelyek során nem egy, a véglegesnél nagyobb méretű előgyártmányból vagy alapanyagból kiindulva, anyagleválasztás útján jutnak el a végleges geometriához, hanem a végleges geometriánál kisebb előgyártmányra, alapra viszünk fel, adunk hozzá rétegről rétegre anyagot. Az additív gyártási eljárások kezdetben csupán gyors prototípusgyártásra (RP) alkalmazták, de napjainkra már számos olyan eljárás jelent meg, amely késztermékek és/vagy előgyártmányok előállítására is kiválóan alkalmas. A kezdeti, egyszerűbb elven működő RP-berendezések elsődlegesen polimerek feldolgozására voltak alkalmasak, céljuk pedig olyan termékek készítése volt, amelyek kinézetükben vagy bizonyos funkcióikban azonosak voltak a késztermékekkel, így bizonyos tesztek (összeszerelhetőség, méret- vagy geometriapon-

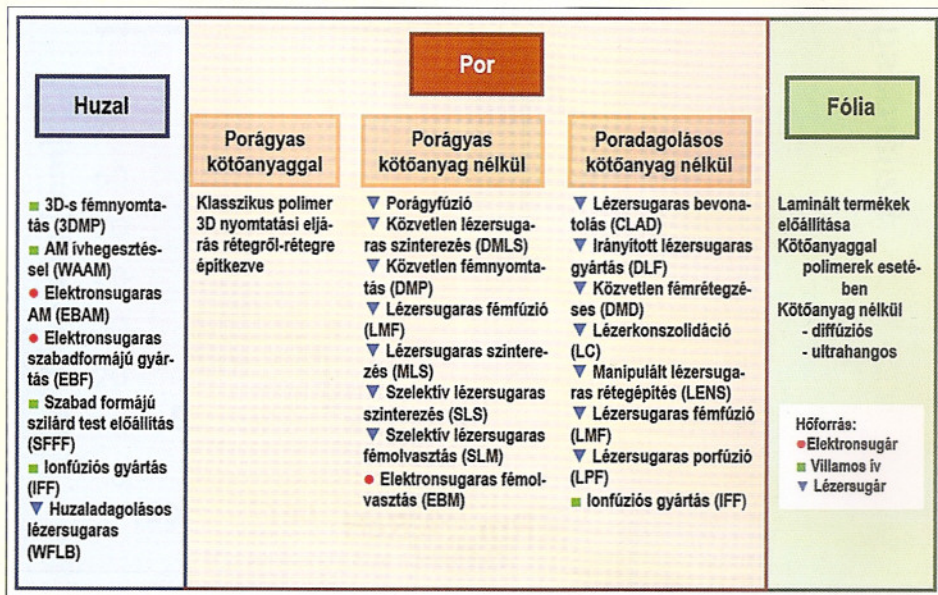
tosság stb.) kivitelezését gyorsabban és költséghatékonyabban lehetett elvégezni. A lézer- és elektornsugaras eljárások fejlődésével számos új lehetőség jelent meg a polimereken kívül fémek és kerámiák feldolgozására is, ezzel együtt pedig az egy-egy félkésztermék előállításán kívül a kisszériás sorozatgyártásban is teret hódított magának az additív gyártás [1,2].

Napjainkban számos, különböző elven működő additív gyártási eljárás létezik. Ezeket, függetlenül attól, hogy a kiindulási alapanyag fém, kerámia vagy műanyag, csoportosíthatjuk a hőforrás alapján (villamos ív, lézer- vagy elektronsugár) vagy a felvitt réteg alapanyagának fajtája szerint (por, huzal, fólia). Az 1. ábra összegezi a jelenleg alkalmazott módszereket az említett csoportosításban [3].

Poradagolásos additív gyártási eljárások

A poradagolásos eljárásváltozatok a legelterjedtebb és legtöbbet publikált additív gyártási technológiák. A porágyas eljárás elve, hogy egy munkaasztalra port terítünk, amit a lézersugár a kívánt geometria adott síkmetszetében megolvast, majd a munkaasztal lentebb mozdul, egy henger újból port terít, és a lézersugár megolvastja a következő réteget (összeolvastja az előzővel). A módszer lehetőséget biztosít különböző alapanyagú rétegek egymás utáni felvitelére, valamint fém-kerámia vegyes porok alkalmazása sem ritka. A fejlettebb rendszerekben a port speciális fúvókák segítségével közvetlenül a lézersugár által megolvastott hegfürdőbe adagolhatjuk, így a rétegek felépítése kötetlenebb a porágyas változathoz képest.

Jelentős előnye a huzal vagy fólia alapanyagok feldolgozásával szemben, hogy sokkal nagyobb felbontóképeséget biztosíthatunk, valamint a jól automatizálhatóság és könnyű programozhatóságnak köszönhetően gyors a folyamatsebesség. Az eljárás során több portartályból adagolhatunk egyszerre alapanyagot, amivel tetszőleges ötvözetek állíthatók elő. Hátránya, hogy speciális és drága felszerelést igényel, valamint a megfelelő minőségű fémporból nem áll rendelkezés-



1. ábra. Additív gyártási technológiák csoportosítása [3]

re olyan jelentős választék, mint hegesztőhuzalból, lassabb gyártást tesz lehetővé (2–10 g/min), kisebb méretű termékek gyárthatók, és a gyártmány belseje gyakran porózus marad [4].

Huzaladagolásos additív gyártási eljárások

Tömör alapanyagot használó gyártási eljárásnak tekinthető a klasszikus – a felületi tulajdonság módosítására használt – felrakóhegesztés. Végezzük azt bevont elektródás kézi ívhegesztéssel, volfrámelektródás vagy plazmaívhegesztéssel, huzal- vagy szalagelektródás ívhegesztéssel, vagy akár salakhegesztéssel. Felrakóhegesztést használnak arra is, hogy a lepoptott éleket, felületeket visszapótolják, újraépipítsék. Innen már csak egy lépés annak megfontolása, hogy az egész geometriát ilyen módon építsük fel. Additív gyártási célra a volfrámelektródás védőgázos ívhegesztés és a huzalelektródás ívhegesztés a legalkalmasabb, ezeket a nemzetközi szakirodalomban WAAM névre keresztelték, mint: „wire and arc additive manufacturing”. A fejlett robotrendszerek és áramforrások kombinációjával a huzaladagolásos additív gyártási eljárások jó alternatívát nyújtanak a nagy szériájú és/vagy nagyméretű munkadarabok területén. Az elérhető gyártási sebesség (50–130 g/min), egy nagyságrenddel nagyobb a lézeres szinterezésénél, energiafelhasználási hatásfoka elérheti a 90%-ot. A huzal tömegének körülbelül 95%-a hasznosul (tömör huzal esetén), és nincs szükség technológiai többlet anyagra [5,6].

Az additív gyártás alkalmazási területei

A tömeggyártásban, ahol a drága és speciális szerszámok egyszerű és olcsó anyagokat dolgoznak fel, a nagy sorozatszám miatt a nagy beruházási költségek is relatíve gyorsan megtérülnek. Itt az elsődleges szempont a termelékenység, ennek van alárendelve a minőség, a gépek, a szerszámok élettartama és sokszor még a dolgozók egészsége is. Olyan iparágakban, ahol ezek a trendek érvényesülnek, mint például az autógyártás, az additív gyártás jelenleg nem alkalmazható gazdaságosan, mivel gyártási sebessége nem összemérhető az ott szokásos technológiákéval. Azokon a területeken viszont, ahol kis sorozatszámokban készülnek termékek és ezért egy drága öntő- vagy fröccsöntőszer-

szám nem vagy csak nehezen térül meg, érdemes megfontolni az additív gyártás bevezetését. A legnagyobb előnye, hogy ugyanazzal a „szerszámmal”, ugyanaz a gép két, akár különböző anyagú és eltérő geometriájú terméket is képes gyártani. Ilyen terület lehet például a harci járművek (különösen a repülőgépek) gyártása vagy az autóipar luxus- és egyedi gépjárművekre specializálódott ágazatai [1, 7]. Fontos megjegyezni, hogy az additív gyártás a hangzatos ígéretek ellenére nem helyettesíti a klasszikus hegesztési és gyártástechnológiai megoldásokat, és számos kihívást tartogat még, mire az alkalmazása egyéb piacokon is gazdaságosan megjelenhet.

A kutatómunka célkitűzései és eredményei

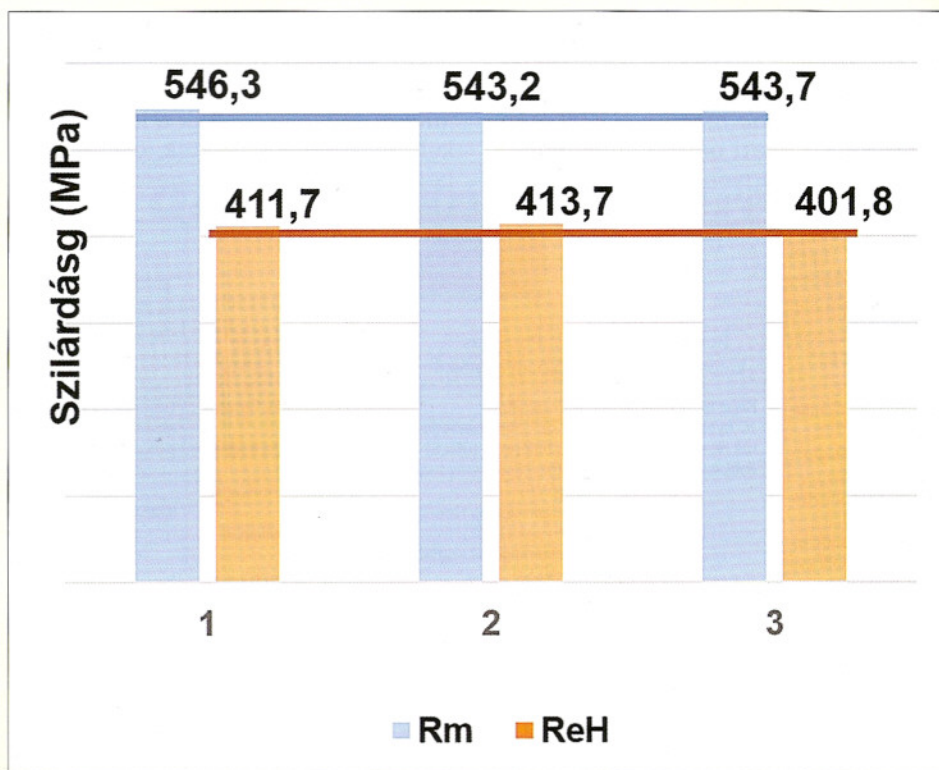
A kutatás kiindulópontja a Flexman Robotics Kft. partnereinél felmerült igény, miszerint alkalmazható-e a robotosított huzalelektródás ívhegesztési eljárás kovácsszerszámok javító-felrakó hegesztésére, vagy akár az előállításukra is. A kivitelezhetőség két alapvető szempontja, hogy egyrészt mennyire alkalmas maga a berendezés a kívánt célra programozhatóság, hatékonyság és felbontóképesség szempontjából, másrészt pedig elérhető-e az ilyen módon felújított szerszám-

moknál is olyan anyagminőség, ami eleget tesz a kovácsszerszámokkal szemben támasztott elvárásoknak. A kutatásunk célja, hogy a fenti kérdésekre minél pontosabb választ adjunk, valamint a technológiai korlátok feltárásával az additív gyártás alkalmazási területeit is pontosítani tudjuk.

A technológiai korlátok és lehetőségek feltárása

Az additív gyártás MAG-hegesztéssel történő változatának vizsgálatához egy költséghatékony megoldást választottunk. Az előzetes kísérletek során ötvözetlen acél hegesztőhuzalal és 82Ar-18CO₂ gázkeverékkel dolgoztunk. A kísérletekhez a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékén található Motoman EA1400 típusú, hattengelyes hegesztőrobotot használtuk. A robotra szerelt SKS hegesztő-áramforrás a feladatra technikailag alapvetően alkalmas. A hegesztőcella additív gyártásra való alkalmasságának felméréséhez 100 mm magas, 25 mm széles és 100 mm hosszú „téglatestet” hegesztettünk fel egy 25 mm-es lemezre. A mintadarab méretének meghatározásakor az elsődleges szempont az volt, hogy elegendő mennyiségű próbatestet tudjunk kimunkálni a metallográfiai, szakitó- és keménységvizsgálatokhoz.

Az első kihívást a robotpálya-generálás jelentette. Ha huzalelektródás



2. ábra. A három próbatesten mért szilárdsági értékek, valamint a hegesztőanyag gyártói adatai

védőgázos ívhegesztéssel szeretnénk felépíteni egy terméket, alaposan meg kell ismerni a hegesztés technológiai változóinak az ömledékre és a kialakult varratgeometriára gyakorolt hatásait, hogy megfelelő hegesztési pályát generálhassunk. Az, hogy a termék rétegeit alkotó varratsorokat milyen séma szerint tervezzük meg, alapvetően meghatározza a termék minőségét és a gyártási sebességet.

Az első kísérleti daraboknál a hagyományos pályagenerálási logikákat próbáltuk követni, de bebizonyosodott, hogy a feladat komplexitása újszerű megközelítést igényel, ezért egy továbbfejlesztett, hibrid pályát hoztunk létre, amely során a rövid ívvel készülő kontúr közötti teret egy nagy árammal és lengetéssel hegesztett sor tölti fel. A tervezett méretű munkarab végül 37 hegesztett rétegből, 114 sorból állt. Ahhoz, hogy az egymásra hegesztett rétegek ne olvasszák át egymást túlságosan, azaz ne folyjon le a hegfürdő a munkadarab oldalán, és a fröcskölés is elfogadható tartományon belül maradjon, 5–6 hegesztési sor előállítás után rövid szüneteket iktattunk be.

A próbatést keresztirányú makrosziszolátán kötéshiba vagy zárvány nem látható, a varratfelépítés megfelelő. A mikroszerkezeti felvételeken már több helyen salak- és gázzárványokat figyeltünk meg, amelyek elsősorban a rétegek közé, valamint a kontúr- és töltősorok határára összpontosulnak. A szakítóvizsgálatok eredményei a 2. ábrán láthatóak. A huzal folyáshatára 410 MPa (bordó vonal), szakítószilárd-

sága 540 MPa (kék vonal), feszültségmenetesítő hőkezelés utáni állapotban.

A próbatesteken mért értékek ezzel közel azonosak, ami magyarázható azzal, hogy a rétegek egymásra hegesztésével az alsóbb sorok már a gyártás során utólagos hőkezelésen estek át. Ugyanez a jelenség figyelhető meg a keménységmérési eredményeknél is. Kötőhegesztések esetén az MSZ EN ISO 15614-1 az 1-es anyagcsoportra 320 HV 10 határértéket ad meg hőkezelt állapotban, ezért megállapíthatjuk, hogy a keménységértékek alapján is megfelelő a munkadarab. A keménység (3. ábra) a munkadarab tejénél megnő, ami szintén arra utal, hogy az alsóbb sorokat a rájuk hegesztettek hőhatása megeresztéshez hasonlóan hőkezelték.

Az additív gyártás térbeli felbontása úgy írható le, mint a felhegeszthető legkisebb réteg vastagsága, azaz a legkisebb hozzáadható anyag mennyisége, a határfok pedig a hasznos (az anyagfelesleg eltávolítása utáni) és a teljes keresztmetszet hányadosa. Az alkalmazott módszer körülbelül 1 mm-es felbontású, és a határfoka pedig átlagosan 94%.

Kovácsszerszám előállítása MAG-hegesztéses additív gyártással

A kísérletek alapján kijelenthető, hogy egy hegesztőrobot, huzalelektrodás ívhegesztésre felszerelve, tökéletesen alkalmas additív megmunkálásra. Azt, hogy a kopott szerszámok javító-felrakó hegesztésére is alkalmas-e, a legegyszerűbben úgy elle-

nőrizhettük, hogy készítettünk egy kísérleti szerszámot, amely reprezentálja a későbbiekben javítani kívántat. A geometria kialakításához végelemes szimulációkat is használtunk. Ezzel megállapítottunk, hogy megfelelő lesz-e az üregkitöltés, mely pontok lesznek kritikusak kopási szempontból, és hol számíthatunk a legnagyobb feszültségekre.

A hegesztéshez 1,6 mm átmérőjű, fémportöltetű, nikkelbázisú huzalt használtunk. Próbahegesztések során meghatároztuk a varratsorok szükséges átlapolását, az előmelegítési hőmérsékletet és a hegesztési sebességet. A hegesztési áramerősséget és feszültséget a gyártó által megadott értékekre állítottuk be.

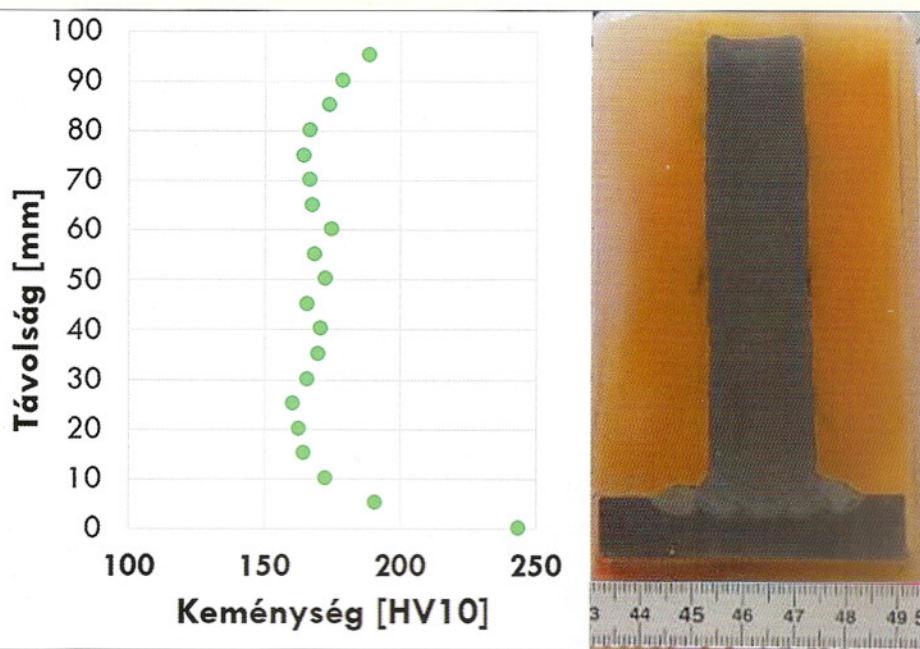
A kísérleti szerszámokat egyaránt elkészítettük C60-as és a későbbiekben javítani kívánt anyagminőségéből is. A munkadarab előkészítése során egy olyan zsebet kellett a tömbi anyagba munkálni, ami a hegesztőpisztollyal megközelíthető, nem tartalmaz éles sarkokat, és a lehető legkevesebb anyag hozzáadásával a névleges geometria fölé lehet hegeszteni. Ez a szerzőgyártás előgyártása.

A robotpályák ezúttal is „on-line” tanítással készültek, a korábbi kísérletek tapasztalatai alapján. Ehhez rendelkezni kellett volna az előgyártmányral, ami ebben a pillanatban még nem állt rendelkezésre. Ezért a programozást egy 3D nyomtatással előállított darabon végeztük, ami alakjában megfelelt az eredeti tervek szerinti előgyártmánynak. Ennek egyik előnye az volt, hogy az anyagra várakozás nem hátráltatta a munkát, másrészt ha a programozás közben kiderül, hogy az előgyártmány nem hozzáférhető vagy nem jól elhelyezhető a munkatérben, még könnyen módosítható.

Hegesztés után a felhegesztett darabot kész méretre forgácsoltuk, és ötven darabos kovácsolási kísérleteket végeztünk. A felső szerszámfél hegesztés utáni, még forgácsolás előtti állapota a 4. ábrán látható. A kísérleti alakítások csekély száma miatt ezekből messzemenő következtetéseket nem lehet levonni, az minden esetre egyértelműen látszik, hogy a szerszámokon semmilyen kopás, repedés, alakváltozás nem található, még az esztergálás nyomai is megmaradtak.

Összegzés

A robotosított MAG-hegesztéssel végzett additív gyártás kulcsmomentu-



3. ábra. Keménységértékek a munkadarab keresztmetszete mentén



4. ábra. A felső szerszámfél hegesztés közben

ma a robotpálya kialakítása, történjen az kézzel vagy számítógép által. A pályagenerálás során figyelembe kell venni a modern hegesztőáramforrások speciális anyagátviteli üzemmódjai által nyújtott lehetőségeket és a kézi hegesztés során már jól bevált fogásokat. A gyártóberendezés munkatere kihasználtságának optimalizálásával a technológia gazdaságosabbá tehető.

Az elvégzett kísérletek alapján nagy biztonsággal kijelenthető, hogy a robotosított MAG-hegesztéssel végzett additív megmunkálás jól alkalmazható például kovácsszerszámok javító-felrakó hegesztésére is.

Felhasznált irodalom

[1]Conner, BT. et al.: Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive

- manufacturing. *Additive Manufacturing*. Elsevier, 2014., pp. 1-4.
- [2] Wohlers, T., Caffrey, T.: Wohlers Report 2014 – 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Assoc., 2014
- [3] Matthens, S. et al.: Additive Manufacturing – Recent Development in Manufacturing of metallic components. YPIC 2017 3rd Young Welding Professionals International Conference Conference Book, Halle Germany, 2017. pp. 55-59.
- [4] Murr, LE. et al.: Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science. Brazilian Metallurgical, Materials and Mining Association : Elsevier, 2012. ISSN: 2238-7854
- [5] Ding, D. et al.: A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Elsevier, 2015., 31. kötet.
- [6] Xiong, J., et al.: Vision-sensing and bead width control of a single-bead multi-layer part: material. *Journal of Cleaner Production*. Elsevier, 2013., 13. kötet.
- [7] Rockstroh, T. et al.: Additive manufacturing at GE Aviation. *Industrial Laser solutions for manufacturing*. 2013., 26. kötet.

*Uzonyi Sándor,
Flexman Robotics Kft.
**Asztalos Lilla,
BME Anyagtudomány
és Technológia Tanszék
***Dr. Farkas Attila,
Flexman Robotics Kft.
****Dobránzsky János, MTA-BME
Kompozittechnológiai Kutatócsoport