

Additív úton gyártott melegalakító szerszámacél fogácsolhatósági vizsgálata

Machinability study of additive manufactured hot working die tool steel

SOLTI Kálmán¹, Dr. BIRÓ István²

1: Premet Kft., 1117 Budapest, Garda utca 4. A. lház 7.em.5., +36209157528, info@premet.hu, <https://premet.hu/>
2: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem – Gyártástudomány és Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Műgyetem rkp. 3., +3614632515, +3614633176, biro.istvan@gpk.bme.hu, <https://manuf.bme.hu/>

Abstract

The Csepel Machine Tools Ltd. and its partners designed and are currently building a manufacturing cell to implement and integrate additive manufacturing in their production. In this article, we study the machinability of AISI H13 (1.2343; EN X27CrMoV51) hot working tool steel produced by the installed manufacturing cell by means of face milling cutting tests. Our result shows, that the machining is possible on this material, but complicated, because of the inhomogeneity the material.

Keywords: additive manufacturing, machinability, laser metal deposition, H13 hot working tool steel

Kivonat

Az additív technológia nyújtotta előnyöket szeretné a Csepeli Szerszámgépgyár Kft. és partnerei kiaknázni, ezért megtervezésre került, és e cikk írásakor is telepítés alatt áll egy gyártócella, melynek egyik eleme képes additív gyártásra. Jelen cikkben ezen cella által additív úton épített AISI H13-as (1.2343; EN X27CrMoV51) melegalakító szerszámacél forgácsolhatóságának értékelése kerül bemutatásra homlok-palástmarási kísérletek segítségével. Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy az anyag a nagyfokú inhomogenitása miatt, nehezen, de forgácsolható.

Kulcsszavak: additív gyártás, forgácsolhatóság, lézersugaras bevonatolás, H13 melegalakító szerszámacél

1. BEVEZETÉS

Napjaink egyik dinamikusan fejlődő technológiája az additív gyártási technológia. [1] Ennek oka, hogy ezen technológiával olyan (szabadformájú, akár „bennszülött”) alkatrészek is költséghatékonyan gyárthatóvá válnak, melyek előállítását az eddig alkalmazott „hagyományos” anyagleválasztó technológiák nem vagy viszonylag nagy költségek árán tették lehetővé. Alkalmazásukkal korábban javíthatatlannak ítélt szerszámok, alkatrészek korrigálása válik lehetségessé.

A jelen cikkhez kapcsolódóan alkalmazott additív technológia, nevezetesen a „lézersugárral történő bevonatolás” (az angol nyelvű szakirodalomban pl. „laser metal deposition”, „laser power deposition”, „direct metal deposition”, „laser engineered net shaping”) a közvetlen energiával megszilárdító additív eljárások közé tartozik. [2] A hozadékanyag szempontjából a lézersugárral történő bevonatolásnak 3 fő fajtája különböztető meg: a porral történő adagolás, a huzaladagolás és a pasztát alkalmazó eljárás. Az ilyen módokon adagolt anyag a lézersugárból származó megfelelő mennyiségű hőnek köszönhetően képez bevonatot az alapanyag felületén. Az alaptest relatív mozgásával a por adagolása során különböző bevonatolási geometriákat lehet elérni. A bevonatoló anyag felületre történő eljuttatására különböző módszerek használnak az iparban, azonban a lézersugárhoz képesti koaxiális és laterális elrendezés a leggyakoribb. [3]

Bohlen és társai az AISI szerinti additívan gyártott H13-as szerszámacélt vizsgálták vékonyfalú és tömör/téglatest darabok előállításával. Megállapították, hogy H13-as szerszámacélból lehetséges az alkatrészgyártás kismértékű porozitással lézersugaras bevonatolással. Azonban az általuk előállított próbatestek nagyfokú inhomogenitást (rétegenként eltérő keménységet és szövetszerkezetet) mutattak. Ennek magyarázata az úgy nevezett „intrinsic” hőkezelés, ami technológiai sajátosságként a gyártási folyamat közben lép fel. Ezen hőkezelés lényege, hogy a már felvitt rétegnek nincs ideje lehűlni, mert azt a soron következő

felvitt réteg miatt újra hőhatás éri. Ez az ismétlődés folyamatos a gyártás befejezéséig. Bohlen és társai utólagos hőkezelést javasoltak az inhomogén anyagszerkezet hatásának csökkentése érdekében. [4]

Lizzula, Sorgato és társaik lézersugaras bevonatolással gyártott különböző hőkezelési állapotú H13-as szerszámacél próbatetek forgácsolhatóságát vizsgálták. Általánosságban megállapították, hogy a rétegek számának növelésével a forgácsoló erő, illetve az átlagos felületi érdesség (R_a) is csökkent a forgácsolt felületek esetében. Az alacsony rétegszám jobb bevonatolási minőséget eredményezett (kisebb mértékű porozitás és anyagszerkezeti hibák, illetve nagyobb keménység), azonban a forgácsolhatóság kedvezőtlenül alakult (a forgácsolási erők megnövekedtek, és a felület minősége romlott). Az általuk gyártott darabokat is nagymértékű inhomogenitás jellemezte, mely a szövetszerkezetben és a keménységértékekben mutatkozott meg. [5]

A jelen kutatás során célunk volt, hogy a Csepeli Szerszámgépgyár Kft-nél rendelkezésre álló gyártócella által additív úton előállított H13 szerszámacél forgácsolhatóságát vizsgáljuk közvetlenül, ezzel támogatva a gyártócella működésének megismerését a gyártott termék (esetünkben alapanyag) tulajdonságainak szempontjából.

2. PRÓBATESTEK ADDITÍV GYÁRTÁSA

A próbatetek additív úton történő gyártása a Csepeli Szerszámgépgyár Kft-nél rendelkezésre álló LRS EVO Diodeline hegesztő berendezéssel történt, mely egy 1070 (nm) hullámhosszú, 4500 (kW) maximális csúcsteljesítményű DL450 dióda lézerrel volt felszerelve. A próbatetek gyártásához alkalmazott, Oerlikon AM által gyártott és forgalmazott MetcoAdd H13-B melegalakító szerszámacél por szemcsemérete 45-90 (μm) volt, névleges kémiai összetétele az 1. táblázatban látható.

AISI szerinti H13-as melegalakító szerszámacél kémiai összetétele

1. táblázat

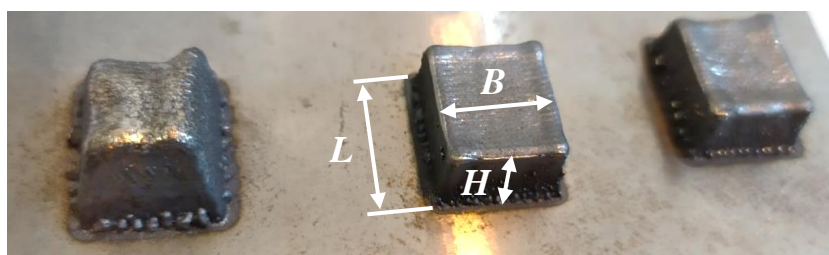
Anyag:	Fe	Cr	Mo	Si	V	C
Névleges tömegszázalék (m/m%):	91,1	5,2	1,3	1,0	1,0	0,4

A próbatetek testgyártásakor az additív technológiai paramétereket szisztematikusan változtattuk. Ennek során szemrevételezéssel megállapítottuk, hogy a lézersugár teljesítményének és az átfedési aránynak növelésével a darab magassága is növekszik, továbbá a pásztázási sebességnek, a lézersugár átmérőjének és a rétegvastagság értékének van egy kritikus értéke, mellyel alakhűség szempontjából optimális lesz a gyártás. Ez megfelel a szakirodalomnak. [4, 5] A próbatetek testgyártásakor, illetve a forgácsolási kísérletekhez használt próbatetek előállításához alkalmazott végleges paramétereket a 2. táblázat foglalja össze. Az előállított próbatetek az 1. ábrán láthatók (a méretek értelmezése az 5. táblázatban található).

Vizsgált additív technológiai paraméterek

2. táblázat

Paraméter	Lézersugár teljesítménye, P_L (W)	Pásztázási sebesség, v_L (mm/s)	Lézersugár átmérője, d_L (mm)	Rétegvastagság, LH (μm)	Átfedési arány, OL (%)
Tesztgyártáskor	225; 270; 292,5; 337,5; 360; 405	5, 10, 15	0,74; 1,04; 1,25; 1,5	100, 200, 300, 400	40; 50; 60
Végleges	382,5	5	0,74	200	60



1. ábra. A forgácsolhatósági kísérletekben alkalmazott próbatetek az additív gyártási követően (részlet)

3. FORGÁCSOLHATÓSÁGI VIZSGÁLATOK

3.1. Kísérleti terv

A homlok-palástmarási kísérleteket egy $d = 16$ (mm) átmérőjű Sumitomo WEX2016E szármáróval és 0,4 (mm) csúcsgarú AXMT123504PEER-G lapkával végeztük. Egyidejűleg csak egy lapkát helyeztünk a marószárba annak érdekében, hogy a forgácsolás során csak az egy élre ható erőket regisztráljuk. Az alkalmazott forgácsolási paramétereket a 4. táblázat foglalja össze. Minden paraméterkombinációt szisztematikusan vizsgáltunk, ezáltal 9 db egyenirányú és 9 db ellenirányú marást végeztünk.

A marási kísérletek során alkalmazott forgácsolási paraméterek

4. táblázat

Forgácsoló sebesség, v_c (m/min)	Élenkénti előtolás, f_z (mm)	Fogásmélység, a_p (mm)	Fogásszélesség, a_e (mm)	Marási irány
43; 85; 170	0,04; 0,08; 0,16	1,5	5	egyen; ellen

A próbatestek L hosszát úgy határoztuk meg, hogy legalább 40 szerszámfordulatnak megfelelő időtartamban történhessen forgácsolás. Egy-egy próbatesteken mind egyenirányú, mind ellenirányú marást végrehajtottunk, ezért a próbatestek B szélességét úgy állapítottuk meg, hogy a kétféle irányítottsággal, a_e fogásszélességgel elkészült mart felületek között egy 1 (mm) széles váll maradjon (2.a ábra). Az erőmérés során alkalmazandó f_m mintavételezési frekvenciát úgy állítottuk be, hogy névlegesen a szerszám minden $0,5^\circ$ -os elfordulását követően történjen adatrögzítés. [6] A forgácsolási kísérletek előtt a próbatestek H magasságát síkmarással állítottuk be. Az alkalmazott mintavételezési és geometriai jellemzők az 5. táblázat foglalja össze.

A marási kísérletek során alkalmazott mintavételezési és geometriai paraméterek

5. táblázat

Mintavételezési frekvencia f_m (Hz)	Próbatestek hossza L (mm)	Próbatestek magassága H (mm)	Próbatestek szélessége B (mm)
10270; 20302; 40605	13; 15; 18	5	11

A kísérleteket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Gyártástudomány és -technológia Tanszékének Kondia 640B CNC megmunkálóközpontján végeztük. A forgácsolási erő komponenseinek mérése egy Kistler 9281B típusú piezoelektromos erőmérő szenzor, egy Kistler 9863A típusú töltéserősítő és egy National Instruments USB-4431 adatgyűjtő segítségével történt LabView 2016 keretrendszerből vezérelve.

3.2. Erőmérés adatainak kiértékelése. Felületi érdesség és mikrokeménység mérése

Az erőmérés adatainak feldolgozása LabView 2016 keretrendszerben futó célspecifikus szoftverrel valósult meg. [6] Az így kapott F_c forgácsoló erő karakterisztikáját az értékekre *legkisebb négyzetek módszerével* illesztett Kienzle-Victor modellel (ld. (1) egyenlet) jellemeztük, ahol $k_{c1,1}$ az erőállandó, h az elméleti forgácsvastagság, b az elméleti forgács szélesség, továbbá x_F a h -ra vonatkozó hatványkitevő.

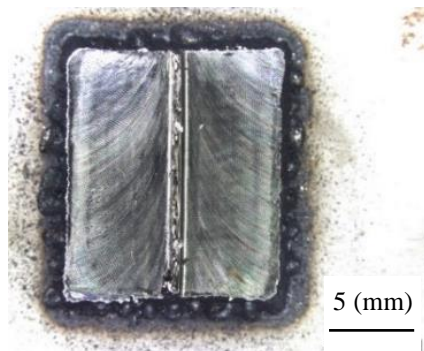
$$F_c = k_{c1,1} \cdot h^{x_F} \cdot b \quad (1)$$

A forgácsolt felületeken keménységmérést hajtottunk végre a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszéken található Buehler Indentamet 1100 mikrokeménységmérő gépen 500g-os terheléssel és 11 másodperces nyomási idővel. Egy adott forgácsolt felületen 10 pontban mértük a keménységet. Az így mért adatok nagy szórást mutattak: értékük jellemzően 500HV_{0,5} és 1000HV_{0,5} között mozgott, a forgácsolási paraméterekkel nem mutattak egyértelműen megállapítható korrelációt.

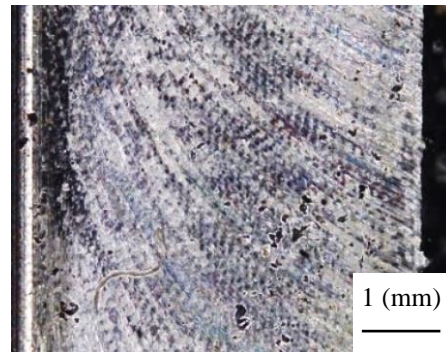
A forgácsolt felület R_a átlagos felületi érdességének és R_z egyenetlenségmagasságának mérését a BME Gyártástudomány és -technológia Tanszéken elérhető Mitutoyo SurfTest SJ-401 típusú metszettepítővel végeztük el. A forgácsolási kísérletek során nem várt intenzitású szerszámkopás következett be, így összességében nem állapítható meg bizonyossággal a forgácsolási paraméterek hatása a felületi érdességre. További megállapítás, hogy a forgácsolt felületen megjelenő pórások (1.b ábra) az anyagszerkezet releváns mértékű inhomogenitására utalnak, ami jelentősen befolyásolhatta a szerszámkopás mértékét.

A 6. táblázat foglalja össze az egyen- és ellenirányú marási folyamatot és az előállított felületek minőségét jellemző átlagos mérőmennyiségeket.

Marás irány	Erőállandók átlaga, $k_{c1,1}$ (N/mm ^{x_F+1})	Átlagos felületi érdességek átlaga, R_a (μm)	Egyenetlenségmagasságok átlaga, R_z (μm)	Mikrokeménységek átlaga, $HV_{0,5}$
Ellen	2263	0,37	2,76	693
Egyen	606	0,47	3,12	756



a) Próbatest a forgácsolást követően



b) Inhomogén szerkezetet (porozitást) mutató forgácsolt felület

1. ábra. Additív úton előállított próbatest a marási kísérleteket követően

4. KONKLÚZIÓ

Kijelenthető, hogy a lézersugaras bevonatolással gyártott H13-as melegalakító szerszámacélból készült darabok forgácsolhatóak. A vizsgált próbatestek anyagszerkezete nagyfokú inhomogenitást mutatnak a mikrokeménység-mérések alapján, ami egybevág a nemzetközi szakirodalom állításaival. [4, 5] A forgácsolt felületek porozitása arra utal, hogy az additív technológia tovább finomítandó. A forgácsoló erő Kienzle-Victor-féle $k_{c1,1}$ erőállandója nagymértékű eltérést mutat az egyen- és ellenirányú marás között, melynek oka a próbatest beedződött felületi rétegében kereshető (egyenirányú marás során lényegesen nagyobb ütést kap a szerszám éle a belépéskor, mint ellenirány esetén a kilépéskor névlegesen azonos elméleti forgácskeresztmetszet mellett). Az alapanyag szerkezeti inhomogenitása miatt a szerszám élettartama jelentősen csökkenhet. Mindezt egybevetve javasoljuk a próbatestek gyártásakor alkalmazott additív technológiával készülő darabok szerkezetépítés utáni, de még forgácsolás előtti homogénizáló hőkezelését.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző konferencia részvételét a BME Gépészmérnöki Kar NTP-HHTDK-21-0051 pályázata támogatta. A kutatás és jelen cikk az Európai Bizottság Horizon 2020 programja által támogatott EPIC projekt (azonosító: 739592), illetve az OTKA 132430 projekt támogatásával jött létre. Köszönjük a Csepeli Szerszámgyártó Kft.-nek, a Wigner Fizikai Kutatóközpontnak, a PaB Engineering Kft.-nek, a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszéknek és a BME Gyártástudomány és Technológia Tanszéknek az additív gyártás, anyagvizsgálatok és forgácsolási kísérletek megvalósításában nyújtott segítségét.

6. IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Halász G. *A fém additív gyártás - úton a digitális sorozatgyártás felé I. rész.*, Hegesztéstechnika, Observer Kft., Budapest, 2020., 31(2), 29-37.
- [2] Rasheedat Modupe M. *Laser Metal Deposition Process of Metals, Alloys, and Composite Materials*, Springer Vieweg GmbH, Johannesburg, 2019.
- [3] P. Cavaliere, A. Silvello. *Laser Cladding: Fatigue Properties.* Laser Cladding of Metals. Springer, 2021, 1(1), 191-184.
- [4] A. Bohlen, H. Freiße, M. Hunkel, F. Vollertsen. *Additive manufacturing of tool steel by laser metal deposition.* Journal of Manufacturing Science and Technology, Procedia CIRP, 2018, 74, 192-195
- [5] L. Lizzul, M. Sorgato, R. Bertolini, A. Ghiotti, S. Bruschi, F. Fabbro, S. Rech. *On the influence of laser cladding parameters and number of deposited layers on as-built and machined AISI H13 tool steel multilayered claddings.* 10th CIRP Conference on Photonic Technologies, 2021, 35, 361-370.
- [6] Biró I, Czampa M. *Marás erőmérésének statisztikai alapú kiértékelése*, laboratóriumi segédlet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gyártástudomány és -technológia Tanszék, Budapest, 2019.