

# Additívan gyártott 316L próbatestek elektrokémiai korróziós vizsgálata

## Electrochemical corrosion measurements of additively manufactured 316L specimens

BREZNAY Csaba<sup>1</sup>, VARBAI Balázs<sup>1</sup>

1: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3, 463-1955, [breznay.csaba@edu.bme.hu](mailto:breznay.csaba@edu.bme.hu), [varbai.balazs@gpk.bme.hu](mailto:varbai.balazs@gpk.bme.hu)

### Abstract

*In my research, I investigated the corrosion properties of 316L austenitic stainless steel specimens made by laser beam powder bed fusion. The samples were fabricated with different building orientation (0°, 45°, 90°) and layer thickness of 50 µm. Two specimens were made for each direction, one of which was subjected to stress relief heat treatment immediately after fabrication. The different building orientations showed different corrosion behaviour, with the most favourable properties being obtained for samples with 0° build orientation.*

**Keywords:** additive manufacturing, laser powder bed fusion, corrosion, stainless steel, heat treatment

### Kivonat

*Kutatásomban lézersugaras porágyolvasztással készített 316L ausztenites korrózióálló acél minták korróziós tulajdonságait vizsgáltam. A minták eltérő építési iránnyal (0°, 45°, 90°), 50 µm rétegvastagsággal készültek. Minden irányhoz két próbatest készült, amelyek közül az egyiket feszültségcsökkentő hőkezelésnek vettem alá közvetlenül a gyártást követően. Az egyes építési irányok eltérő korróziós viselkedést mutattak, a legkedvezőbb tulajdonságokkal a 0°-os építési irányú minták rendelkeztek.*

**Kulcsszavak:** additív gyártás, lézersugaras porágyolvasztás, korrózió, rozsdamentes acél, hőkezelés

## 1. BEVEZETÉS

Az EN 10088-1:2014 szabvány szerint rozsdamentes acélnak nevezzük azokat az acélokat, amelyek minimum 10,5 % krómot és legfeljebb 1,2 % szenet tartalmaznak [1]. A rozsdamentes acélokat már a huszadik század elején kifejlesztették és az iparban alkalmazhatóvá tették [2]. Jelenleg a legszélesebb körben felhasznált anyagminőség az ausztenites „Cr-Ni 18-8” 1.4301/304, amely a teljes rozsdamentes acélgyártás 50 %-át jelenti [3]. Sorban következik a ferrites 1.4512 és 1.4016, majd a nagyobb ötvözet tartalmú ausztenites 1.4404/316L melyek a korábban említett 304-es anyagminőséggel a rozsdamentes acélgyártás több, mint 80 %-át felölelik [3]. Az ausztenites rozsdamentes acélok fő ötvözői a króm és a nikkkel. A króm nagy mértékben növeli a korrózióállóságot, hatása 12 % felett ugrásszerűen megnő. A nikkkel erősen javítja a korrózióállóságot kénsavas oldatban, redukáló hatású közegekben; míg a króm oxidáló közegben csökkenti az ötvözet korróziós veszteségét. 16...18 % króm és 8...10 % nikkkel ötvözés mellett Fe-Cr-Ni ötvözetben ausztenites szövet képződik.

Az additív (építkező) gyártást napról napra hatékonyabban és kreatívabban használják a hagyományos gyártástechnológiák mellett, vagy éppen azok kiegészítésére. A technológiát leginkább az orvostechikában, autó-, lég- és űriparban alkalmazzák. Az additív gyártástechnológiák alkalmazásával lehetőségünk nyílik komplex geometriák gyártására, gyors prototípus gyártásra, csökkenthetjük a részösszeállítások számát egy darab összevont alkatrész elkészítésével. A folyamat során számítógéppel támogatott tervezéssel létrehozunk egy modellt, amelyet majd rétegenként építünk fel. Az additív gyártás szabványos meghatározása így hangzik: „kis anyagmennyiségek egymáshoz kötésén alapuló gyártási eljárás, amely egy háromdimenziós modell adataiból kiindulva rétegről-rétegre építi fel a terméket”. Ipari felhasználásban az egyik legelterjedtebb additív gyártási eljárás a lézersugaras porágyolvasztás. A lézersugaras porágyolvasztásos eljárás során a port először

a tárolóból a nyomtató tartályába juttatjuk. A porágy felületét egy ún. rétegelő „lapát” síkra húzza, a kialakuló porfelesleget egy túlfolyótartályban gyűjtjük össze későbbi felhasználás céljából. Ezt követően egy vagy több lézersugár megolvasztja a porréteget a termék geometriájának és rétegvastagságnak megfelelően. A következő rétegekhez ismét elteríti a port a rétegelő lapát és folytatódik a rétegek olvasztása a termék elkészültéig. A teljes geometria elkészültével az alkatrész körül fennmaradó por eltávolítása, majd az alkatrész alaplapról való leválasztása következik. Az alaplapról való eltávolítást követően lemunkáljuk a termékhez kapcsolódó támaszokat (ha vannak), majd célszerűen hőkezeljük a darabot. Amennyiben szükséges, a terméket utómunkáljuk.

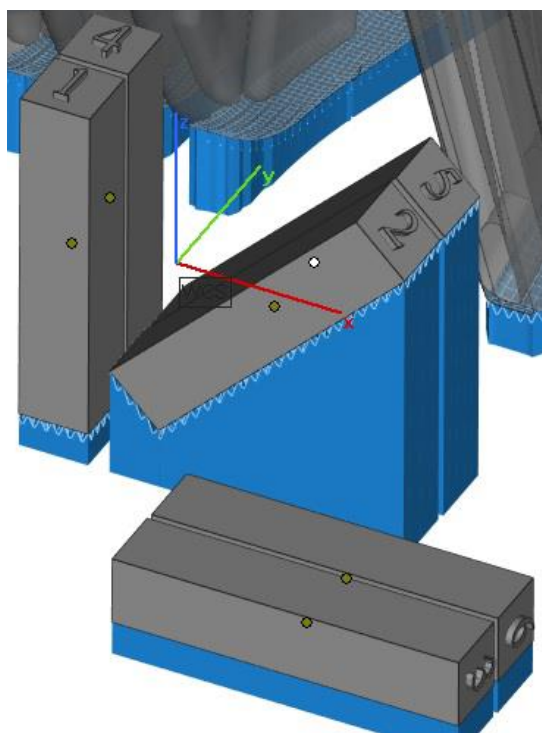
## 2. KÍSÉRLETI ANYAGOK ÉS BERENDEZÉSEK

Kutatásunkban 1.4404/316L anyagminőségű additívan gyártott (lézersugaras porágyolvasztással) próbatestek korróziós tulajdonságait vizsgáltuk. A próbatestek kémiai összetétele az 1. táblázatban látható.

1. táblázat. 1.4404/316L kémiai összetétele (optikai emissziós spektroszkópia mérései alapján, tömeg%)

Anyagminőség	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	N
1.4404/316L	0,03	0,8	0,8	0,04	0,015	10	19	2,5	0,1

A próbatestek az 1. ábrán látható módon, három különböző ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) építési iránnyal készültek [4]. Az egyes építési irányokhoz tartozó próbatest párok közül egyet hőkezelünk. A hőkezelés közvetlenül a gyártást követő  $560^\circ\text{C}$ -os feszültségcsökkentő hőkezelés volt, háromórás felfűtéssel, háromórás hőtartással és kemencében való lehűtéssel [5,6].



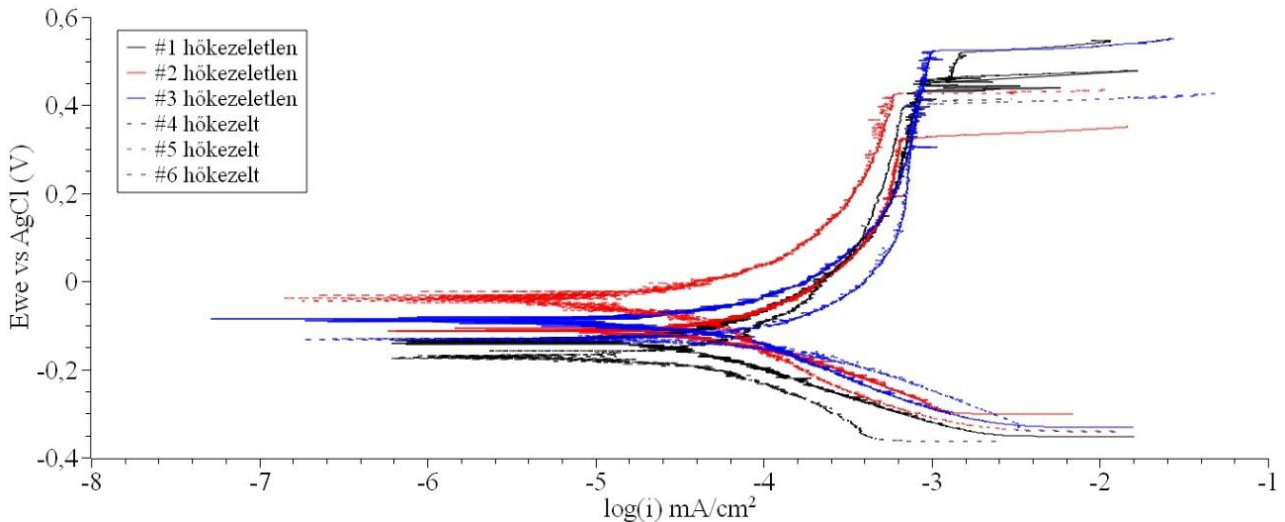
1. ábra. Az egyes építési irányokhoz tartozó próbatestek és jelölésük

Az elektrokémiai korróziós méréseket egy Biologic SP-150 típusú potenciosztáttal, ASTM G5-14 szabvány szerint hajtottam végre. A mérési elrendezésben a munkaelektroda az egyes vizsgálati próbatest, az ellenelektroda platina háló, illetve a referencia elektróda egy túltelített Ag/KCl elektróda volt [7]. Az elektrolit minden esetben 3,5 % NaCl oldat volt, melyet nagy tisztaságú NaCl-ból és desztillált vízből készítettem elő. A korróziós cella összeállítását követően 45 percen keresztül, a nyíltkörű potenciál (OCP) stabilizálódásáig vártam. A feszültség pásztázási sebessége  $1\text{ mV/s}$  volt, OCP-0,2 V-tól OCP+1,5 V-ig. A lakkozáshoz cellulóz-nitrát alapú fedőlakkot használtam. A lakkozás minősége, a minták előkészítése nagyban befolyásolja a mérési eredményeket. Nem megfelelő lakkozás esetén a mért áramerősség a réskorrózió miatt megnövekedik, a lyukkorróziós potenciál értékét azonban nem befolyásolja. Ugyanezen jelenség okozza az áramsűrűség-

feszültség görbék passzív szakaszában megfigyelhető áramnövekedést. Az egyes minták lyukkorróziós potenciáljának meghatározását a mért áramerősség - feszültség görbék alapján végeztem el. Az áramerősség - feszültség görbe kezdeti és exponenciálisan növekvő szakaszához érintőt húzva a két érintő metszéspontjához tartozó feszültség érték a lyukkorróziós potenciál.

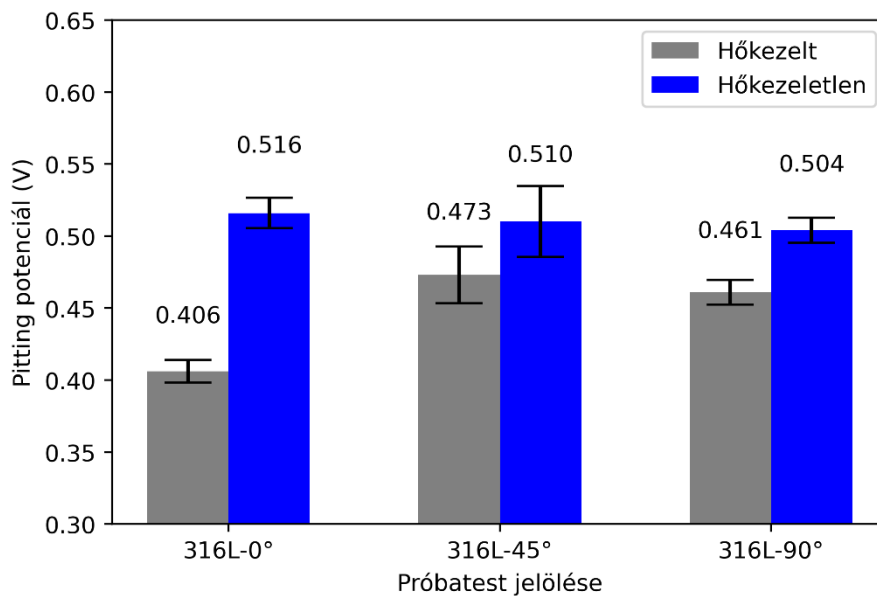
### 3. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK

A mintasorozat korróziós tulajdonságainak kiértékeléséhez, összehasonlításához a potenciodynamikus korróziós vizsgálatok áramsűrűség – feszültség és feszültség - áramerősség görbéit használtuk fel. A 2. ábrán láthatók a mérési eredmények, folytonos vonallal a hőkezeletlen, szaggatott vonallal a hőkezelt minták. Megfigyelhető, hogy a hőkezelt minták minden esetben kisebb lyukkorróziós potenciál értékkel rendelkeznek, mint a hőkezeletlen párjuk. A minták passzíválódási áramsűrűségeiben jelentős változás nem figyelhető meg.



2. ábra. A potenciodynamikus elektrokémiai korróziós mérések eredményei

A hőkezelt és hőkezeletlen, egyes építési irányokhoz tartozó minták lyukkorróziós potenciáljai a 3. ábrán láthatók. A görbén a munkalektroda potenciálját ábrázoltuk az áramsűrűség logaritmusának függvényében.



3. ábra. Az egyes építési irányokhoz tartozó minták lyukkorróziós potenciál értékei

A hőkezeletlen minták lyukkorróziós potenciálja közel azonos minden építési irányban, a mért maximális érték 0,516 V a 0°-os építési irányban. A hőkezelt minták lyukkorróziós potenciálja minden esetben elmarad a

hőkezeletlen minták lyukkorróziós potenciál értékeitől. Ez a megfigyelés korrelál Bedmar és kutatótársai [5] eredményeivel. A legnagyobb eltérés a 0 °-os építési irányban készült minta mutatja, 0,11 V-al kisebb a lyukkorróziós potenciál értéke a hőkezeletlen párához képest.

2. táblázat. A vizsgált minták nyíltkörű potenciáljai a különböző építési irányokban

	0°	45°	90°
Hőkezeletlen	-0,152±0,02 V	-0,101±0,01 V	-0,131±0,01 V
Hőkezelt	-0,164±0,02 V	-0,139±0,01 V	-0,141±0,01 V

A korróziós potenciál értékeit a 2. táblázat tartalmazza. A pozitívabb nyíltkörű potenciál nemesebb viselkedést jelent, ebből a szempontból a 45 °-os építési irányú próbatetest mutatta a legjobb értékeket.

#### 4. KONKLÚZIÓK

A mérési eredmények alapján kijelenthető, hogy a próbatetest építési iránya a lyukkorróziós potenciál értékére hőkezeletlen állapotban nincs hatással. Az egyes építési irányok közötti különbség mérési hibán belüli. 560 °-os feszültségcsökkentő hőkezelést követően minden próbatetest lyukkorróziós potenciálja csökkent, legnagyobb mértékben a 0 °-os építési irányhoz tartozó minta esetében. A feszültségcsökkentő hőkezelés hatására a nyíltkörű potenciál minden esetben negatív irányban tolódott el. Ezen eredmények alapján kijelenthető, hogy a háromórás 560 °C-os feszültségcsökkentő hőkezelés nem javítja a lézersugaras porágyolvasztással gyártott 316L anyagminőségű próbatestek korróziós tulajdonságait, hanem kis mértékbe rontja.

#### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A projekt a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával – NKFIH, valósult meg (OTKA PD 138729). A próbatestek gyártását külön köszönöm a FLONO Kereskedelmi és Szolgáltató Kft. ügyvezetőjének, Varga Gábornak.

#### IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] MSZ EN: Korrózióálló acélok. 1. rész: A korrózióálló acélok jegyzéke. 2015.
- [2] Dr. Bődök Károly: Az ötvözetlen, gyengén és erősen ötvözött szerkezeti acélok korrózióállósága, különös tekintettel azok hegeszthetőségére. CORWELD, 1997
- [3] Outokumpu: Handbook of Stainless Steel. 2014.
- [4] Cuiling Zhao – Yuchao Bai – Yu Zhang – Xiaopeng Wang – Jun Min Xue – Hao Wang: Influence of scanning strategy and building direction on microstructure and corrosion behaviour of selective laser melted 316L stainless steel. *Materials Design*, 209. évf. (2021. november), 109999. p. URL <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109999>.
- [5] J. Bedmar – S. García-Rodríguez – M. Roldán – B. Torres – J. Rams: Effects of the heat treatment on the microstructure and corrosion behavior of 316 l stainless steel manufactured by laser powder bed fusion. *Corrosion Science*, 209. évf. (2022. december), 110777. p. ISSN 0010-938X. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110777>.
- [6] Ke Wang, Qi Chao, Murugesan Annasamy, Peter D. Hodgson, Sebastian Thomas, Nick Birbilis, Daniel Fabijanic, On the pitting behaviour of laser powder bed fusion prepared 316L stainless steel upon post-processing heat treatments, *Corrosion Science*, Volume 197, 2022, 110060, ISSN 0010-938X, URL <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.110060>.
- [7] Clara Nyby – Xiaolei Guo – James E. Saal – Szu-Chia Chien – Angela Y. Gerard – Huibin Ke – Tianshu Li – Pin Lu – Christian Oberdorfer – Sarita Sahu – Sirui Li – Christopher D. Taylor – Wolfgang Windl – John R. Scully – Gerald S. Frankel: Electrochemical metrics for corrosion resistant alloys. *Scientific Data*, 8. évf. (2021. február) 1. sz. ISSN 2052-4463. URL <http://dx.doi.org/10.1038/s41597-021-00840-y>.