

KAPCSOLAT A VÍZSUGARAS ESZTERGÁLÁSSAL ÉS A VÍZSUGARAS VÁGÁSSAL VÉGZETT MEGMUNKÁLÁS ANYAGLEVÁLASZTÁSA KÖZÖTT

Kun-Bodnár Krisztina 

tanársegéd, Miskolci Egyetem, Gyártástudományi Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: krisztina.bodnar@uni-miskolc.hu

Maros Zsolt 

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gyártástudományi Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: zsolt.maros@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Az abrazív vízsugaras esztergálás egy napjainkban elterjedőben lévő, nem hagyományos technológia a nehezen megmunkálható forgástestek megmunkálására. Az eljárás során az egyik legnagyobb nehézséget a megfelelő pontosság biztosítása jelenti, ugyanis a leválasztott réteg anyagvastagsága nagyon sok tényezőtől függ, nehezen kontrollálható. Jelen cikkben összefüggést keresünk a vízsugaras vágással átvágható anyagvastagság és a vízsugaras esztergálással leválasztott anyagréteg nagysága között, annak érdekében, hogy a vízsugaras esztergálással megmunkált méretek előírt nagyságát minél inkább biztosíthassuk.

Kulcsszavak: vízsugaras esztergálás, tangenciális és radiális eljárás, leválasztott rétegvastagság

Abstract

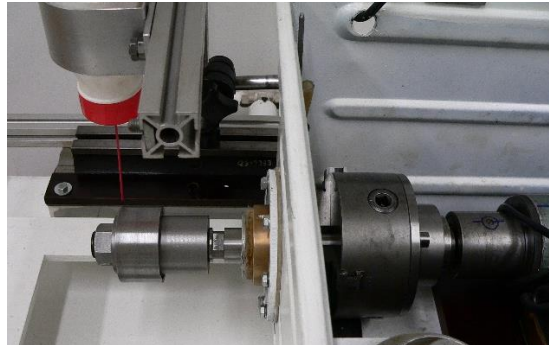
Abrasive waterjet turning is a non-traditional technology that is spreading today for the machining of hard-to-machine cylindrical parts. One of the biggest difficulties in the process is ensuring the appropriate accuracy, because the material thickness of the removed layer depends on many factors and is difficult to control. In this article, we are looking for a correlation between the material thickness that can be cut by waterjet cutting and the size of the material layer removed by waterjet turning, in order to ensure the required size of the dimensions processed by waterjet turning as much as possible.

Keywords: waterjet turning, tangential and radial method, depth of removed layer

1. Bevezetés

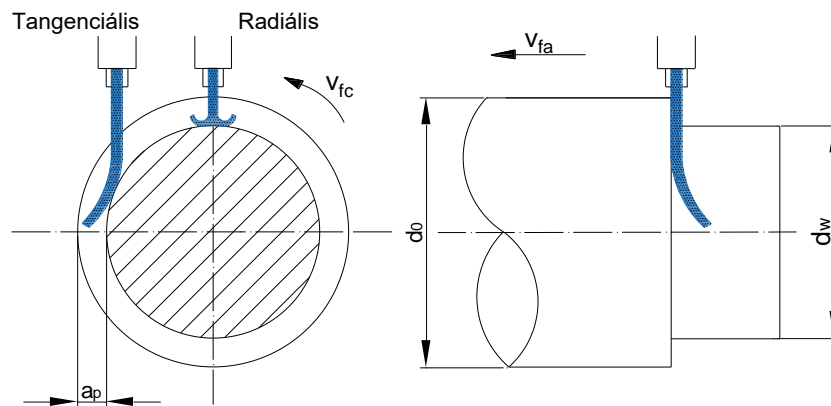
Abrazív vízsugaras esztergálás során a vágáshoz is alkalmazott vágó sugár alá egy megfelelő forgást biztosító készüléket teszünk, mely biztosítja a munkadarab forgó mozgását (1. ábra) (Kun-Bodnár és Kunderák, 2017).

Aszerint, hogy a sugarat a munkadarabhoz képest hova helyezzük, az irodalom (Li et al., 2013; Liu et al., 2014; Zohoor et al., 2014) tangenciális vagy radiális eljárást különböztet meg. Ily módon az 1. ábrán látható mozgásviszonyok jöhetnek létre.



1. ábra. A munkadarab forgó mozgását biztosító készülék

Vízsugaras esztergálásnál a munkadarab v_{fc} sebességgel forog, miközben a sugár tengelyirányban v_{fa} sebességgel mozog. Klasszikus forgácsolástechnológiai szempontból ez a két sebesség ún.- kör- és axiális előtoló sebességnek tekinthető. Maga a forgácsoló sebesség az a sugárban áramló részecskék sebessége, hisz ezek a részecskék (víz, levegő, abrazív szemcsék) végzik az anyag eltávolítását. Tangenciális esztergálásnál a sugár egy adott mélységben, radiális eljárásnál a munkadarab fölött, annak szimmetria tengelyében van elhelyezve (2. ábra). A kialakuló fogásmélység (a_p) mindkét esetben számtalan tényező eredményeként jön létre (Li et al., 2013; Liu et al., 2014).



2. ábra. Tangenciális és radiális abrazív vízsugaras esztergálás kinematikai vázlatja

Abrazív vízsugaras vágásnál a kialakuló makroszkopikus forgácsoló erő nagyon kicsi, ami lehetővé teszi hosszú és viszonylag kis átmérőjű alkatrészek vágását (Manu és Babu, 2009; Zohoor et al., 2014). Az eljárás alkalmas rideg és nehezen vágható anyagok, mint például üveg, kerámia, kompozitok, illetve különböző szuper- vagy titánötvözetek vágására (Axinte et al., 2009; Kovacevic et al., 1997; Mazurkiewicz, 2000).

A vízsugaras esztergálás során tehát nehezen kézben tartható a leválasztott réteg vastagsága. Ugyanakkor a lemezszerű alkatrészek vízsugaras vágásáról, az ott átvágható lemezvastagságokról már számtalan tapasztalattal rendelkezünk. Ha előre becsülni szeretnénk egy adott technológiai paraméterhalmazzal a vízsugaras esztergálás során leválasztott réteg mélységét, akkor célszerűnek látszik kapcsolatot keresni az abrazív vízsugaras vágás és esztergálás között.

Adott fúvóka viszonyok, nyomás és abrazív tömegáram nagyság mellett a leválasztott réteg nagysága a sugár és a munkadarab közötti kölcsönhatás idejétől (t_{eff}) függ. Vagyis, ha ismerjük egy adott behatási idő (t_{eff}) mellett végzett vízsugaras vágás által leválasztott réteg mélységét, akkor ebből megbecsülhetjük ugyanezen kölcsönhatási idővel végzett esztergálás leválasztott rétegének vastagságát.

2. Az abrazív vízsugár és a munkadarab közötti kölcsönhatás ideje

Az abrazív vízsugár a munkadarabhoz képest egy spirális görbe mentén mozog a munkadarab palástja körül. A behatás ideje alatt a sugár a munkadarab egy pontját támadja (3. ábra). Ha meghatározzuk a behatás idejét, akkor egy adott nyomás- és abrazív áram esetén meg lehet határozni a vízsugaras vágás várható bevágási mélységét, amelyből azután az esztergálással leválasztott réteg vastagsága becsülhető.

Számos technológiai paraméter hatással van a vízsugaras vágás hatékonyságára: a fúvóka átmérője és távolsága a munkadarabtól, az abrazív por típusa, a víz nyomása, az abrazív tömegáram stb., de általában a kutatások a következő paraméterek hatásának vizsgálatára összpontosítanak: nyomás, előtolás és abrazív tömegáram.

A vágási kísérletek alapján a bevágási mélység különböző matematikai modellekkel meghatározható. A bevágási mélység meghatározására az egyik leggyakrabban alkalmazott matematikai modell Monno (Brandt et al., 2000) modellje:

$$k = A \frac{p^B m_a^C}{v_f} \quad (1)$$

ahol k : az elérhető bevágási mélység, mm
 p : nyomás, MPa
 m_a : abrazív tömegáram, g/min
 v_f : előtoló sebesség, mm/min
 A, B, C, D konstansok

Az (1) egyenlet segítségével a bevágási mélység becsülhető. Egy adott egyszerű vágásnál a sugárnak a munkadarab egy adott pontjára gyakorolt hatóideje kiszámítható a sugár átmérőjének és az előtolásnak a hányadosából.

$$t_{eff} = \frac{d_j}{v_f} \quad (2)$$

ahol t_{eff} : a hatóidő, min
 d_j : a sugár átmérője, mm
 v_f : az előtolás sebessége, mm/min

Ha a hatóidők egyenlők a különböző vágásoknál, akkor a bevágás mélységét csak a nyomás (p) és az abrazív tömegáram (m_a) határozza meg. Amennyiben a vízsugaras esztergálásnál is meg tudjuk határozni a behatás idejét, úgy a bevágási kísérletek eredményei alapján megadható az esztergálással leválasztott tényleges anyagvastagság.

A sugárnak a munkadarabhoz viszonyított mozgását szemlélteti az 3. ábra. Ez alapján az az idő, amíg a sugár egy adott ponttal érintkezik a spirálvonal mentén történő elmozdulás miatt (B pont):

$$t_r = \frac{d_j}{v_{fr}} \quad (3)$$

ahol t_r : érintkezési idő a spirálvonal mentén

d_j : a sugár átmérője, mm

v_{fr} : a sugár eredő előtoló sebessége, m/min

A sugár előtoló sebessége az axiális és körelőtolás eredőjeként számítható:

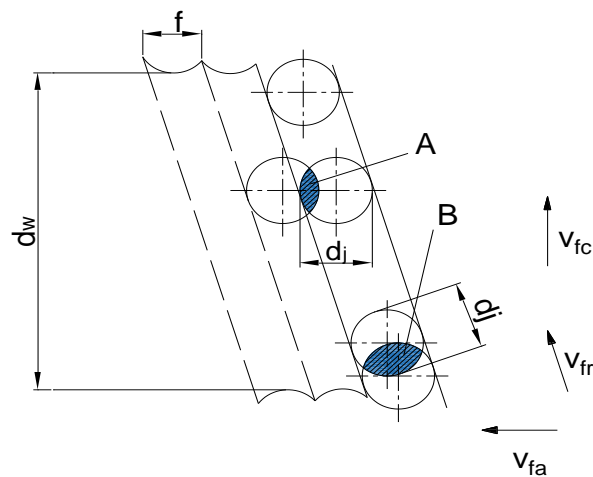
$$v_{fr} = \sqrt{v_{fa}^2 + v_{fc}^2} \quad (4)$$

ahol v_{fa} : a sugár beállított axiális előtoló sebessége, mm/min

$$v_{fc} = d_w \pi n \quad (5)$$

ahol n : a munkadarab fordulatszáma, 1/min

v_{fc} : a sugár körirányú előtoló sebessége, m/min



3. ábra. A vízsugar pályája és geometriai jellemzői vízsugaras esztergálásnál

A sugár munkadarab körüli egyszeri körülfordulásának ideje (B pont):

$$t_c = \frac{1}{n} \quad (6)$$

A sugár és a munkadarab közötti érintkezési idő a sugár axiális irányú mozgása miatt (A pont):

$$t_a = \frac{d_j}{v_{fa}} \quad (7)$$

Ez idő alatt a sugár többször visszatér a munkadarab ugyanazon pontjára. Ennek a visszatérésnek a száma az alábbi képlettel számítható:

$$N = \frac{t_a}{t_c} \quad (8)$$

Végül a sugárnak a munkadarab egy adott pontjára gyakorolt hatóideje:

$$t_{eff} = N t_r \quad (9)$$

Összefoglalva a (3)-(9) egyenleteket, a hatóidő az alábbi összefüggés segítségével határozható meg:

$$t_{eff} = \frac{d_j^2 n}{v_{fa} v_{fr}} \quad (10)$$

Amennyiben tehát adott nyomás és abrazív áram nagyság alkalmazása mellett meghatározzuk az abrazív vízsugaras vágás behatási idejét (2) és ugyanezen paraméterek mellett az esztergálás behatási idejét (10), akkor a két eljárás által leválasztott réteg vastagsága összevethető.

3. Kísérleti körülmények, vizsgálati eszközök

Az abrazív vízsugaras vágás és esztergálás leválasztott rétegvastagságának összehasonlítására kísérletsorozatot végeztünk AlMg0,7Si jelű alumíniumötvözetten. A kísérletek körülményei az alábbiak voltak.

3.1. Forgatóberendezés és megmunkáló gép

A kísérletek elvégzéséhez kifejlesztettünk egy forgatóberendezést (Kun-Bodnár et al., 2018), melyet egy CORTINA DS2600 típusú, kétkoordinátás abrazív vízsugaras vágógépre szereltünk fel. Vágási és esztergálási kísérleteket végeztünk lemez, illetve hengeres próbatesteken.

3.2. Kísérleti beállítások

A forgácsolási kísérletek elvégzése során a víznyomást minden beállításnál állandó $p=300$ MPa, az abrazív áram nagyságát $m_a=400$ g/min értéken tartottuk. Az egyszerű lemezvágási kísérletek során (bevágási kísérletek, 4. ábra) az előtolás nagyságát $v_f=100 - 800$ mm/min értékek között változtattuk. Az esztergálási kísérleteknél a munkadarab fordulatszáma $n=18; 37; 56$ 1/min az előtoló sebesség $v_{fa}=5; 10; 15$ mm/min volt.



4. ábra. Bevágási kísérlet AlMg0,7Si jelű alumíniumötvözetten

A kísérleteket a 2. ábrán látható módon radiális és tangenciális esztergálással is elvégeztük. Az esztergált próbatestekre mutat példát az 5. ábra.

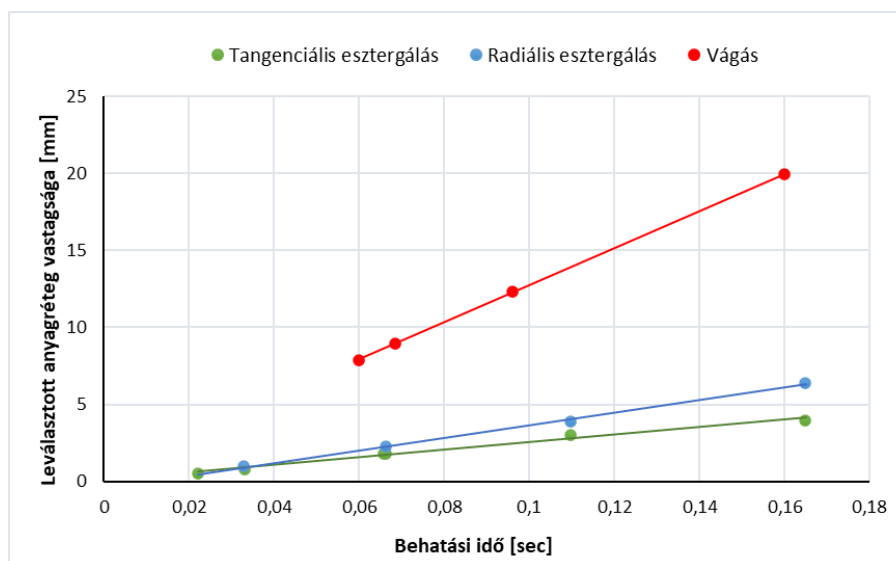
A kísérletek elvégzését követően vágási kísérleteknél mértük a bevágások mélységét (k), az esztergálási kísérleteknél pedig a ténylegesen leválasztott réteg vastagságát radiális és tangenciális esztergálásnál egyaránt (a_{pr} , a_{pt}).



5. ábra. Radiális (bal) és tangenciális (jobb) vízsugaras esztergálással megmunkált felületek (előtoló sebesség 2 mm/min, fordulatszám 300 1/min)

4. Kísérleti eredmények és kiértékelésük

A forgácsolási kísérleteket követően a (2) és (10) összefüggésekkel, az egyes vágási és esztergálási beállításokhoz, meghatároztuk a behatás idejét (t_{eff}), vagyis annak az időnek a nagyságát, amíg a megmunkáló sugár érintkezésben van a munkadarab egy pontjával. Ezen idő függvényében ábrázoltuk a leválasztott réteg vastagságát a vágási és esztergálási kísérletekre egyaránt (6. ábra).



6. ábra. Leválasztott anyagréteg vastagsága vízsugaras vágásnál, illetve radiális és tangenciális vízsugaras esztergálásnál a behatási idő függvényében

A 6. ábrából megállapítható, hogy a radiális esztergálással valamennyi esetben vastagabb anyagréteg távolítható el ugyanolyan technológiai paraméterek esetén, vagyis anyagleválasztás szempontjából hatékonyabb. Ez részben abból is következik, hogy tangenciális esztergálásnál nem biztosítható a fúvóka

magasságának ideális (~2mm) nagyságának biztosítása. A sima vágási kísérletekkel ugyanazon behatási idő alatt, mindig nagyobb leválasztott anyagréteg vastagságot értünk el.

A 6. ábra mérési eredményei meglepően jó közelítéssel lineárisan változnak a behatási idő (t_{eff}) függvényében. A mérési pontokra egyenest illesztve az alábbi összefüggéseket kapjuk (t_{eff} , sec-ban; k , a_{pr} , a_{pt} mm-ben).

Abrazív vízsugaras vágásra a leválasztott réteg vastagsága:

$$k = 120,56 t_{eff} + 0,676 \quad (11)$$

Radiális abrazív vízsugaras esztergálásra a leválasztott réteg vastagsága:

$$a_{pr} = 4,79 t_{eff} + 0,997 \quad (12)$$

Tangenciális abrazív vízsugaras esztergálásra a leválasztott réteg vastagsága:

$$a_{pt} = 24,44 t_{eff} + 0,107 \quad (13)$$

A közelítés jóságára jellemző, hogy a regressziós együttható mindhárom esetben nagyobb mint 0,98 értéket vett fel.

A (11) – (13) egyenleteket felhasználva kapcsolatot teremthetünk a sima vágással elérhető anyagleválasztás és az esztergálással elérhető leválasztott réteg nagysága között. azaz

Radiális vízsugaras esztergálásnál:

$$a_{pr} = 0,338 k + 0,769 \quad (14)$$

$$a_{pt} = 0,202 k - 0,03 \quad (15)$$

Az így előállított összefüggések segítségével az abrazív vízsugaras esztergálás során várható anyagleválasztás mértéke, a sima vízsugaras vágással elérhető leválasztott rétegvastagság ismeretében, előre becsülhető. Mivel a vízsugaras vágás várható átvágható anyagvastagságáról számtalan eredmény ismert már a szakirodalomban így az esztergálás során elérhető méret megfelelő beállításokkal biztosítható.

5. Összefoglalás

Elméleti és kísérleti vizsgálatainkat összegezve az alábbi megállapítások tehetők:

- Abrazív vízsugaras esztergálásnál egyértelmű nehézséget jelent, hogy a leválasztott anyagréteg vastagsága nehezen kézben tartható.
- Azonos nyomás, abrazív áram és fúvóka viszonyok mellett a leválasztott réteg vastagsága elsősorban a munkadarab és a sugár közötti kölcsönhatás idejétől (t_{eff}) függ.
- A sima vízsugaras vágás és a vízsugaras esztergálás közötti kapcsolat a behatási idő (t_{eff}) segítségével teremthető meg.
- Ez a kölcsönhatási idő, mind a vízsugaras vágásra (2), mind a radiális és tangenciális esztergálásra (10) a technológiai adatok segítségével meghatározható.
- AlMgSi0,7 anyagra vágási és esztergálási kísérleteket végezve megállapítható, hogy a radiális esztergálással mindig vastagabb anyagrétegek választhatók le, mint a tangenciális eljárással.
- Erre az anyagminőségre a (14) és (15) összefüggésekkel kapcsolatot hoztunk létre az anyagon elérhető vágási mélység (k) és az esztergálással leválasztott anyagvastagságok (a_{pr} , a_{pt}) között.

Összességében elmondható, hogy abrazív vízsugaras esztergálás során az előírt méret betartása nehezen biztosítható. Radiális abrazív vízsugaras esztergálással nagyobb anyagválasztási hatékonyság érhető el. A várható leválasztott anyagvastagság és a vágással elérhető bevágási mélység között kísérleti úton olyan kapcsolat teremthető, mely lehetővé teszi vízsugaras esztergálás során az előírt méretek betartását.

Irodalom

- [1] Kun-Bodnár, K., Kundrák, J. (2017). Az abrazív vízsugaras vágás alkalmazhatósága forgácsoló megmunkálási műveletekre. *Jelenkori társadalmi és gazdasági folyamatok*, XII(4), 61–65. <https://doi.org/10.14232/jtgf.2017.4.61-65>
- [2] Li, W., Zhu, H., Wang, J., Yasser M. Ali, Huang, C. (2013). An investigation into the radial-mode abrasive waterjet turning process on high tensile steels. *International Journal of Mechanical Sciences*, 77, 365–376. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.05.005>
- [3] Liu, D., Huang, C., Wang, J., Zhu, H., Yao, P., Liu, Z. W. (2014). Modelling and optimization of operating parameters for abrasive waterjet turning alumina ceramics using response surface methodology combined with Box–Behnken design. *Ceramics International*, 40, 7899–7908. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.12.137>
- [4] Manu, R., Babu, N. R. (2009). An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials. *Wear*, 266(11-12), 1091–1097. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.02.008>
- [5] Zohoor, M., Zohourkari, I., Cacciatore, F., Annoni, M. (2014). Influence of machining parameters on part geometrical error in abrasive waterjet offset-mode turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(12), 2125–2133. <https://doi.org/10.1177/0954405414548462>
- [6] Axinte, D. A., Stepanian, J. P., Kong, M. C., McGourlay, J. (2009). Abrasive waterjet turning—An efficient method to profile and dress grinding wheels. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49(3-4), 351–356. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.11.006>
- [7] Kovacevic, R., Hashish, M., Mohan, R., Ramulu, M., Kim, T. J., Geskin, E. S. (1997). State of the art of research and development in abrasive waterjet machining. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119, 776–785. <https://doi.org/10.1115/1.2836824>
- [8] Mazurkiewicz, M. (2000). A manufacturing tool for a new century. *Journal of Materials Processing Technology*, 106, 112–118. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00600-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00600-2)
- [9] Brandt, S., Maros, Zs., Monno, M.: *AWJ Parameters Selection - a Technical and Economical Evaluation*, 2000 15th International Conference on Jetting Technology, Ronneby, Sweden, pp. 353-366.
- [10] Kun-Bodnár, K., Kundrák, J., Maros, Z. (2018). Machining of rotationally symmetric parts with abrasive waterjet cutting. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 448, 012053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012053>