

A FOGÁSMÉLYSÉG HATÁSA A MIKROMÉRETŰ FORGÁCSLEVÁLASZTÁS DINAMIKAI SAJÁTÓSÁGAIRA

THE INFLUENCE OF DEPTH OF CUT ON THE DYNAMICS OF THE MICRO CHIP REMOVAL PROCESS

Balázs Barnabás Zoltán^{1*}, Geier Norbert¹, Poór Dániel István¹, Pereszlai Csongor¹, Takács Márton¹

¹ Gyártástudomány és -technológia Tanszék, Gépészmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2021.1.ENG.007>

Kulcsszavak:

Mikromarás
Forgácsolási erő
Frekvenciaanalízis
Edzett acél

Keywords:

Micro-milling
Cutting force
Frequency analysis
Hardened steel

Cikktörténet:

Beérkezett 2021. február 20.
Átdolgozva 2021. március 15.
Elfogadva 2021. április 5.

Összefoglalás

A kutatás fő célja a fogásmélység mikromarási folyamat dinamikájára gyakorolt hatásának a vizsgálata az erőjelek elemzésén keresztül. A kísérleteket egy mikromegmunkáló központon, 500 μm átmérőjű, kétélű keményfém maróval hajtottuk végre 50 HRC keménységű edzett acélon. A vizsgálatok nyomán feltártuk a forgácsolási paraméterek és az erők közötti kapcsolatot, valamint azonosítottuk a mikromarást jellemző domináns frekvenciákat.

Abstract

The main aim of this research was to investigate the effect of the depth of cut on the dynamics of the micro-milling through the analysis of force signals. The experiments were performed in a micromachining centre with a two fluted, 500 μm diameter carbide micro-milling tool on hardened steel with a hardness of 50 HRC. The investigations revealed the relationship between the cutting parameters and the forces, moreover, the dominant frequencies that characterise the process were identified.

1. Bevezetés

Az ipar felől egyre nagyobb igény mutatkozik a miniatűr komponensek iránt, ami komoly kihívásokat támaszt a korszerű gyártástechnológiával szemben [1, 2]. A kisméretű alkatrészek előállítására az egyik legkiemelkedőbb technológia a mikromarás, mivel alkalmas az anyagok széles körében, akár komplex 3D geometriák nagy pontosságú előállítására is, relatív nagy anyagleválasztási sebesség mellett. Mikromarással jellemzően 1 mm alatti struktúrákat állítunk elő, mely szármarás esetében az alkalmazható szerszámátmérőket is korlátok közé szorítja. Az erőteljes méretcsökkenés következtében az eljárás számos speciális sajátossággal rendelkezik a hagyományos méretű maráshoz képest, ezért az ott megszerzett tudás számos esetben nem adaptálható közvetlenül [3, 4]. A kisméretű szerszámok relatív nagy ütése és annak az erőhatások következtében történő aránylag nagymértékű deformációja sokszor nagy kihívást jelent a technológusoknak [2]. A folyamatot relatív erős rezgések, valamint sorjaképződés jellemzi [5–7]. Mikroméretekben a szerszámok viszonylag nagy éllekerekedési sugarának (r_β) köszönhetően

* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 1 463 2641
E-mail cím: balazs.barnabas.zoltan@gpk.bme.hu

előtérbe kerül a minimálisan leválasztható anyagrétegvastagság (h_{min}) problémaköre is. A tudományos publikációk alapján a kettő értéke egymással összefügg, és a kutatók a h_{min}/r_β arányt 0,22-0,48 közé helyezik el [3, 8]. A mikroméretű forgácsleválasztás tartományában a fajlagos forgácsolóerő viselkedése is jelentősen eltér a hagyományos méretekhez képest [9, 10].

Mikromarásnál a relatív erős rezgések vizsgálatának is kiemelt szerepe van, ugyanis befolyásolja a szerszáméltartamot, valamint az öngerjesztett rezgések kialakulása az előállított felületek minőségét is jelentősen befolyásolja [11, 12], továbbá instabillá teszi a forgácsleválasztási folyamatot [13].

A tudományos publikációk alapján viszonylag kevés kutatás foglalkozik az edzett acélok mikromarásának vizsgálatával [14], ezért – köszönhetően a jó meleg-keménységének, jó kopásállóságnak és szívósságnak [15] – az X40CrMoV5-1 anyagot választottuk a vizsgálatokhoz. Ezt az ötvözetet hagyományos méretekben fröccsöntő szerszámok alapanyagaként is alkalmazzák, mindezek miatt a mikroméretű fröccsöntő szerszámok alapanyagaként is szolgálhat, ami miatt fontos a mikromarás sajátosságai szempontjából történő tanulmányozása is. Rengeteg kutatás irányul a mikromarási folyamat dinamikai vizsgálatára, azonban a fogásmélység hatása és a jellegzetes erőfrekvencia komponensek időbeli változása keveset kutatott téma.

A kutatás fő célkitűzése a fogásmélység folyamat dinamikájára gyakorolt hatásának a vizsgálata edzett acél mikromarása során. Kis fogásmélységek esetén a szerszám sarokrádiusza jelentősen befolyásolhatja a folyamat dinamikai jellemzőit, a különböző fogásmélységek (a_p) esetén pedig a szerszám és a munkadarab nagyobb kontakthossza miatt a súrlódási viszonyok, illetve a szerszámgeometria hatása – például horonyszög – jelentősen eltérhetnek. Emellett további feladatot jelent a különböző a_p értékek esetén a jellemző rezgésfrekvenciák azonosítása, valamint azok időbeli változásainak vizsgálata is.

2. Kísérleti környezet

A mikromarási folyamat dinamikájának vizsgálata során a fogásmélység hatását tanulmányoztuk az 1. táblázatban látható szisztematikus kísérletterven keresztül, horonymarási stratégia mellett.

1. Táblázat. Kísérletterv

Faktorok	v_c (m/min)	f_z (μm)	a_p (μm)	Anyag
Értékek	90	8	25, 50, 75, 100, 125, 150	X40CrMoV5-1

A kísérleteket egy VHTC 130 típusú öttengelyes megmunkálóközponton hajtottuk végre, 500 μm átmérőjű, kétélű, AlTiN bevonatos, sarokrádiuszos (50 μm) keményfém mikromaróval. A gyártói ajánlást, a korábbi tudományos kutatómunkáinkat, valamint a gép maximális fordulatszámát figyelembe véve 90 m/min forgácsoló sebességet alkalmaztunk a vizsgálatok során [16–18]. Az élenkénti előtolást – szintén korábbi kutatásainkra alapozva – 8 μm -re választottuk [16–18], mivel ez mind a szakirodalom, mind a saját vizsgálatok alapján meghaladja a h_{min} értékét [8, 19]. A munkadarabok anyaga edzett X40CrMoV5-1 volt, ami 50 ± 1 HRC keménységűre lett hőkezelve. A metallográfiai vizsgálatok alapján az anyag homogén struktúrával rendelkezik, amiben egyenletes eloszlású 1 μm körüli karbidszemcsék helyezkednek el. Továbbá, a méréseink alapján a munkadarab mikro-keménysége a keresztmetszet és a hossz mentén is egységes.

A vizsgálatok során rögzítettük az erőket, melyhez egy Kistler 9257A háromkomponensű erőmérőt, egy Kistler 5080A töltéserősítőt, valamint egy NI USB-4431 adatgyűjtőt és egy LabVIEW szoftverkörnyezetben készült programot alkalmaztunk.

3. Eredmények

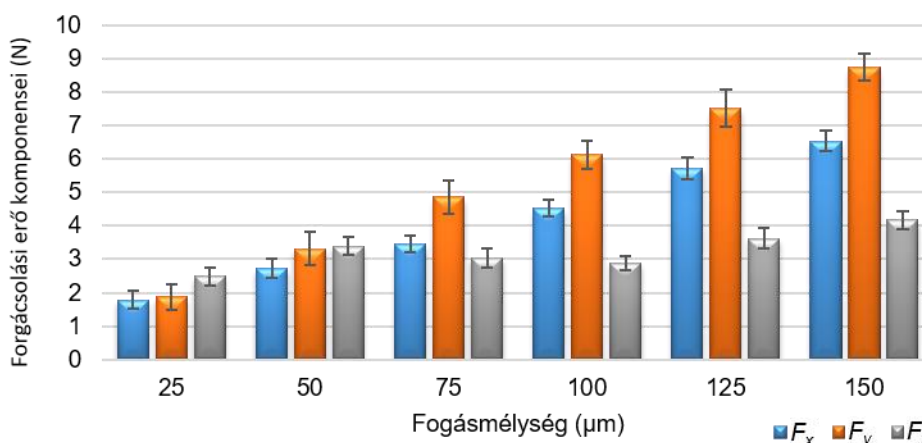
3.1. Erők elemzése

Az erők elemzése kiemelt fontosságú a mikromarás esetében, mivel az abszolút értékekben kis erők is már relatív nagymértékű szerszámdeformációt okozhatnak a kis merevségű mikromarók esetében. Emellett a domináns anyagdeformációs mechanizmusokkal – nyírás, vasalás – is kapcsolatban állnak. Az elemzések során az erőmérőcella koordinátarendszernek megfelelően x, y

és z irányú erőkomponenseket elemeztünk. Ebből az F_y az előtolás irányú erő, az F_x az erre, valamint a szerszám tengelyére merőleges irányú erőt, az F_z pedig a szerszám tengelyével párhuzamos irányú erőkomponenst jelenti. Az értékeléshez LabVIEW szoftverkörnyezetben készült saját fejlesztésű programot alkalmaztunk. Az adatok az állandósult forgácsleválasztás szakaszából származnak, ahol 100 egymást követő fordulat erőmaximumainak az átlagai kerültek elemzésre (lásd Egyenlet (1)).

$$F_{x,y,z} = \frac{\sum_{i=1}^{100} F_i}{100} \text{ (N)} \quad (1)$$

A kísérletek eredményeit az 1. ábra mutatja be. Jól látható, hogy az F_x erőkomponens növekszik a fogásmélység növelésével, köszönhetően a növekvő forgácskeresztmetszeteknek. Az F_y változása ugyanezen okok miatt hasonló, azonban nagyobb mértékű. Az axiális erő esetében viszont nincsenek ilyen jelentős változások a növekvő fogásmélység következtében. Megfigyelhető, hogy az $a_p=25 \mu\text{m}$ és az $a_p=50 \mu\text{m}$ esetében az F_z komponens a legnagyobb a három közül. Ez azzal magyarázható, hogy a szerszámon lévő kisméretű sarokrádiusz mikroméreteknél nem elhanyagolható, mivel arányaiban a fogásmélység nagyságrendjébe esik. Az említett két esetben az effektív főélelhelyezési szög drasztikusan lecsökken, ami aránylag nagyobb tengelyirányú erőt eredményez. A többi esetben viszont már nem az F_z a domináns erőkomponens, mivel a nagyobb fogásmélységeknél a sarokrádiusz hatása kevésbé jelentős, valamint a szerszám horonyszögének a hatása is jobban érvényesül, ami az ellenkező irányba „húzza” az anyagot.



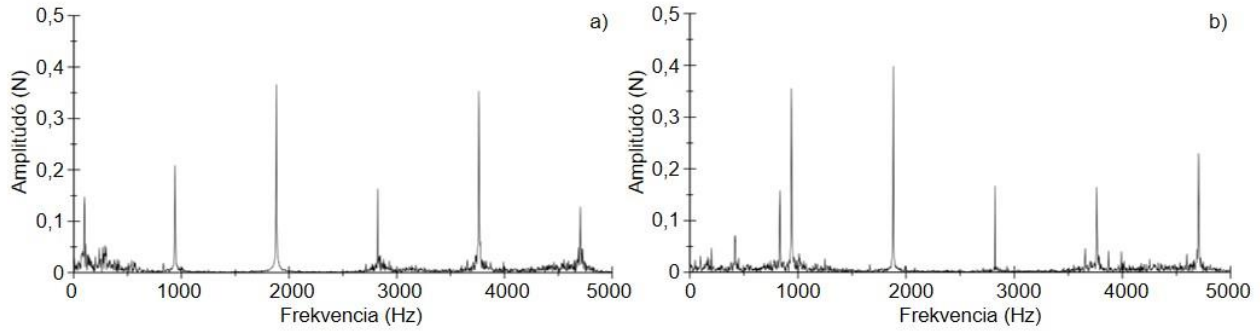
1. ábra. Az erőkomponensek alakulása a különböző fogásmélységek esetén

3.2. A jellemző erőfrekvenciák elemzése

A mikromarás folyamatát erőteljes rezgések jellemzik, ezért fontos nagy hangsúlyt fektetni ezek vizsgálatára, mivel az eredmények közvetetten hozzájárulnak a rezgések csökkentési lehetőségeinek kidolgozásához is. A rögzített erőjelek lehetőséget adnak a folyamatot jellemző frekvenciák vizsgálatára is.

Az erőjeleket gyors Fourier transzformáció (FFT) segítségével elemeztük. A 2. ábra FFT diagramok formájában mutatja be reprezentatív mintaként az F_x és az F_z jelekből a rezgéseket $a_p=75 \mu\text{m}$ fogásmélység mellett.

A diagramok alapján jól látható, hogy a fordulatszámhoz tartozó frekvencia (~940 Hz), a kétélű szerszám esetén jellemző élbélépés frekvenciája (~1880 Hz), illetve ezek felharmonikusai jelennek meg főként a kiugró csúcsok között. Emellett összegyűjtöttük beállításonként az 5 legnagyobb amplitúdójú frekvenciát is mindhárom erőkomponens esetében, amiket a 2. táblázat mutat be a konkrét frekvenciaértékekkel együtt.



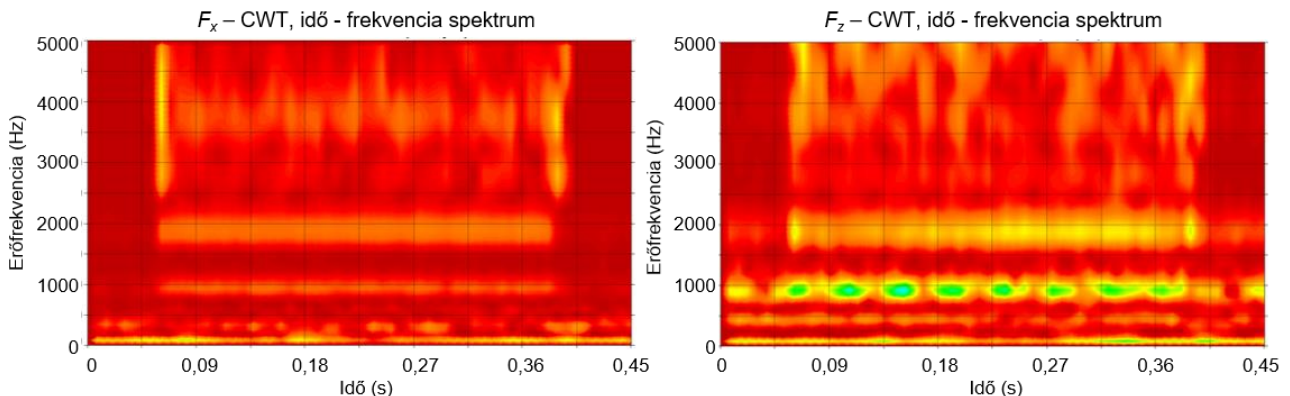
2. ábra FFT diagramok a) F_x és b) F_y erőkomponens esetében ($a_p=75 \mu\text{m}$)

A táblázatban bemutatott értékek nagy része – kékkel jelölve – a folyamat kinematikájához köthető. Az egyéb értékek a megmunkálási környezet sajátosságaiból (pl.: 415 és 830 Hz), az elektromos transzformáció miatti rezgésekből (pl.: 100 Hz), illetve a gép szabályozási rendszeréből adódhatnak. A vizsgálatok alapján nem látható számottevő eltérés a különböző fogásmélységek esetén.

2. Táblázat. A különböző fogásmélységek esetén a jellemző frekvenciaértékek erőkomponensenként

a_p (μm)	Erőfrekvencia, X irány (Hz)	Erőfrekvencia, Y irány (Hz)	Erőfrekvencia, Z irány (Hz)
25	415 940 2820 3763 4703	66 80 100 940 1880	415 940 1880 2820 4703
50	940 1880 2820 3760 4700	70 80 940 1880 3760	830 940 1880 2820 4700
75	100 940 1883 2823 3763	60 76 940 1883 3763	834 940 1883 3763 4703
100	100 282 940 1880 3760	76 940 1880 2820 3760	415 940 1880 3760 4700
125	100 940 1880 3760 4700	63 80 940 1880 3760	415 940 1880 3760 4700
150	940 1883 2823 3763 4703	76 940 1883 2823 3763	834 1883 2823 3763 4707

A jellemző frekvenciákon túl pedig a folyamat időbeni változásai is a vizsgálataink tárgyát képezte, melyhez folytonos Wavelet transzformáción alapuló idő - frekvencia diagramokat készítettünk. Itt szintén az $a_p=75 \mu\text{m}$ fogásmélységet emeltük ki reprezentatív mintaként. A 3. ábrán pedig az F_x és F_z erőkomponensből származó eredmények láthatóak.



3. ábra Idő – erőfrekvencia diagramok az F_x és F_z erőkomponenshez $a_p=75 \mu\text{m}$ esetén

A diagramok elején és végén (~0,05 másodperc) forgácsleválasztás nélküli állapot látható, ami ezáltal a megmunkálási környezet alprezgéseit tartalmazza. Az F_x -nél a forgácsleválasztás szakaszában a be- és kilépésnél látható erőteljesebb rezgés, ami között kvázi állandósult állapot látható. Ezzel szemben az F_z erőkomponens esetében az alprezgések a nagyobb frekvenciákon is

megjelennek (főrsó fordulatszám, illetve annak az első harmonikusa). Ebben az esetben a be- és kilépésnél nem látható jelentős különbség, viszont kismértékű változások megfigyelhetők a fordulatszám frekvenciája közelében, illetve a nagyobb összetevők esetén is.

Összefoglalás

A vizsgálatok során a mikromarás dinamikai sajátosságait tanulmányoztuk edzett acél, 500 μm átmérőjű szerszámmal történő megmunkálása esetén, ahol különböző fogásmélységeknél elemeztük a forgácsolási erő komponenseit, a folyamatot jellemző erőfrekvenciákat, illetve azok időbeli változásait.

- Az kísérleti eredmények alapján megállapítható, hogy a növekvő fogásmélységeknél, a növekvő forgácskeresztmetszetnek köszönhetően az F_x és F_y erőkomponensek növekednek.
- Az F_z erőkomponens a legjelentősebb a sarokrádiusz értékéig terjedő fogásmélységeknél ($a_p=25\text{--}50\ \mu\text{m}$), aminek oka a lokálisan lecsökkent effektív főélelhelyezési szögben rejlik.
- Az erőjelek frekvenciaanalízise alapján az 5 legnagyobb amplitúdójú frekvencia többnyire a technológia kinematikájához tartozik, azonban a megmunkálási környezet sajátosságai is megjelennek az elemzett jelekben.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást részben a K 132430 (Tranziens deformációs, termikus és tribológiai folyamatok kemény fémfelületek finomforgácsolásánál) számú kutatási projekt finanszírozta. A kutatás részben az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-3 és ÚNKP-20-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti kutatási, fejlesztési és innovációs alapról finanszírozott támogatásával készült. A szerzők köszönik Jacsó Ádámnak a kísérletek során nyújtott segítségét, valamint a Fraisa és Böhler cégeknek a támogatást.

Irodalomjegyzék

- [1] Kuzin, V. V., Fedorov, S. Yu., Szalay, T., Farkas, B.: Micromachining of a High-Density Current-Conducting Ceramic With the Use of Electrical-Discharge Machining. Part 1, Refract Ind Ceram, 2016, vol. 57, no. 2, pp. 164–169, DOI:10.1007/s11148-016-9948-z
- [2] Jing, X., Lv, R., Chen, Y., Tian, Y., Li, H.: Modelling and experimental analysis of the effects of run out, minimum chip thickness and elastic recovery on the cutting force in micro-end-milling, International Journal of Mechanical Sciences, 2020, vol. 176, p. 105540, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105540
- [3] de Oliveira, F. B., Rodrigues, A. R., Coelho, R. T., de Souza A. F.: Size effect and minimum chip thickness in micromilling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, vol. 89, pp. 39–54, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2014.11.001
- [4] Aramcharoen, A., Mativenga, P. T.: Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel, Precision Engineering, 2009, vol. 33, no. 4, pp. 402–407, DOI:10.1016/j.precisioneng.2008.11.002
- [5] Balázs, B. Z., Szalay, T., Takács, M.: Investigation of micro milled surface characteristics, Proceedings of International Conference on Innovative Technologies, 2017, pp. 161–164
- [6] Kumar, P., Kumar, M., Bajpai, V., Singh, N. K.: Recent advances in characterization, modeling and control of burr formation in micro-milling, Manufacturing Letters, 2017, vol. 13, no. Supplement C, pp. 1–5, DOI:10.1016/j.mfglet.2017.04.002
- [7] Ma, L., Howard, I., Pang, M., Wang, Z., Su, J.: Experimental Investigation of Cutting Vibration during Micro-End-Milling of the Straight Groove, Micromachines, 2020, vol. 11, no. 5, Art. no. 5, DOI:10.3390/mi11050494
- [8] Wojciechowski, S., Matuszak, M., Powalka, B., Madajewski, M., Maruda, R. W., Królczyk, G. M.: Prediction of cutting forces during micro end milling considering chip thickness accumulation, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, vol. 147, p. 103466, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2019.103466
- [9] Biró, I., Szalay, T.: Extension of empirical specific cutting force model for the process of fine chip-removing milling, Int J Adv Manuf Technol, 2017, vol. 88, no. 9–12, pp. 2735–2743, DOI:10.1007/s00170-016-8957-x
- [10] Biró, I., Szalay, T., Geier, N.: Effect of cutting parameters on section borders of the empirical specific cutting force model for cutting with micro-sized uncut chip thickness, Procedia CIRP, 2018, vol. 77, pp. 279–282, DOI:10.1016/j.procir.2018.09.015
- [11] Takács, M., Balázs, B. Z., Jáuregui, J. C.: Dynamical aspects of micro milling process, Proceedings of International Conference on Innovative Technologies, 2017, pp. 181–184

- [12] Singh, K. K., Kartik, V., Singh R.: Modeling dynamic stability in high-speed micromilling of Ti-6Al-4V via velocity and chip load dependent cutting coefficients, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, vol. 96, pp. 56–66, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2015.06.002
- [13] Mittal, R. K., Kulkarni, S. S., Singh R. K.: Effect of lubrication on machining response and dynamic instability in high-speed micromilling of Ti-6Al-4V, *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 28, pp. 413–421, DOI:10.1016/j.jmapro.2017.04.007
- [14] Câmara, M. A., Rubio, J. C. C., Abrão, A. M., Davim J. P.: State of the Art on Micromilling of Materials, a Review, *Journal of Materials Science & Technology*, 2012, vol. 28, no. 8, pp. 673–685, DOI:10.1016/S1005-0302(12)60115-7
- [15] <https://www.bohler-edelstahl.com/en/product-category/hot-work-tool-steels/> (accessed May 14, 2020).
- [16] Balázs, B. Z., Jacsó, Á., Takács, M.: Micromachining of hardened hot-work tool steel: effects of milling strategies, *Int J Adv Manuf Technol*, Jun. 2020, vol. 108, pp. 2839–2854, DOI:10.1007/s00170-020-05561-x
- [17] Balázs, B. Z., Takács M.: Experimental investigation and optimisation of the micro milling process of hardened hot-work tool steel, *Int J Adv Manuf Technol*, 2020, vol. 106, pp. 5289–5305, DOI:10.1007/s00170-020-04991-x
- [18] Balázs, B. Z., Takács M.: A comparative analysis of characteristics of cutting forces at micro-milling of hardened steels, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 903, p. 012056, DOI: 10.1088/1757-899X/903/1/012056
- [19] Balázs, B. Z., Takács M.: A minimális forgácsvastagság vizsgálata edzett melegalakító szerszámacél mikromarása esetén, *Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT*, 2020, pp. 29–32