

A forgácsolási hőmérséklet mérése és adaptív szabályozása marás során

Monitoring and Adaptive Control of Tool Temperature in End Milling

SZABÓ Eszter¹, Dr. JACSÓ Ádám².

^{1,2}BME, Gépészmérnöki Kar, Gyártástudomány és -technológia Tanszék,
cím: H-1111, Budapest, Műgyetem rakpart 3.,
tel.: +36 1 463 1875,
e-mail: ¹eszter.szabo.1@edu.bme.hu, ²jacso.adam@gpk.bme.hu
honlap: www.manuf.bme.hu

Abstract

Controlling the cutting temperature is crucial to ensure the efficiency of cutting processes. The aim of this study was the experimental investigation of tool temperature in milling. Another aim was to study the possibilities of adaptive temperature control. Based on the experimental results, the radial depth of cut has the most significant effect regarding the cutting temperature, and interrupted milling enables the adequate control of tool temperature.

Keywords: cutting temperature, milling, temperature control, interrupted milling, termography

Kivonat

A forgácsolási hőmérséklet kontrollálásának fontos szerepe van a megmunkálási folyamatok hatékonyságának biztosításában. A kutatás célja a szerszámhőmérséklet kísérleti úton történő vizsgálata volt marás során. További cél volt a megmunkálási folyamat során történő adaptív hőmérsékletszabályozás lehetőségeinek megismerése. A kísérleti eredmények alapján a szerszám radiális bemerülésének hatása a legjelentősebb a forgácsolási hőmérséklet szempontjából, a megszakításos megmunkálás pedig megfelelően alkalmazható a szerszámhőmérséklet korlátozására.

Kulcsszavak: forgácsolási hőmérséklet, marás, hőmérséklet szabályozás, megszakításos megmunkálás, termográfia

1. BEVEZETÉS

A forgácsolási folyamatok során jelentős hőfejlődés tapasztalható [1]. A hatékony és stabil anyagleválasztási folyamat biztosítása érdekében számos kutatás témáját képezte a forgácsolási hőmérséklet mérése. A forgácsolási hőmérséklet meghatározza a forgácsképződés [2] és a szerszámkopás módját, az éltartamot [3], illetve a munkadarab felületi minőségét és mechanikai tulajdonságait [4]. A magas hőmérséklet hatására módosul a munkadarab anyagának szerkezete [5], valamint a hőhatások negatívan befolyásolják a munkadarab felületi struktúráját és érdességét [6]. A felületi profil völgyeinek feszültséggyűjtő hatása miatt kialakuló repedések fáradásos tönkremenetelhez vezethetnek [7]. A magas hőmérséklet hatására végbemenő deformáció okozta maradó feszültség [8] további repedésterjedés idézhet elő, rontva a munkadarab kifáradási szilárdságát [9]. A marási folyamatot jellemző szabálytalan, ciklikus hőmérséklet terhelés kritikus lehet alumínium ötvözetek esetében, mivel a mátrix lágyulását okozva csökkentheti az anyag szilárdságát [10]. Az alumínium alacsony olvadáspontja miatt további problémát okozhat, hogy az anyag forgácsolás közbeni lágyulása, így a maradó alakváltozás a forgácsolási erők jelentős megnövekedéséhez [11], akár szerszámtöréshez is vezethet. Továbbá fém munkadarabok esetében általános probléma, hogy a hőmérsékletváltozás okozta hőtágulás ronthatja a méretpontosságot [10]. Nemfém anyagok esetén is körültekintést igényel a forgácsolás során fellépő hőmérséklet növekedés. Polimer kompozitok megmunkálása során például a túl magas forgácsolási hőmérséklet a mátrix degradálódását [12], fa esetén pedig az anyag részleges elszénesedését okozhatja [13].

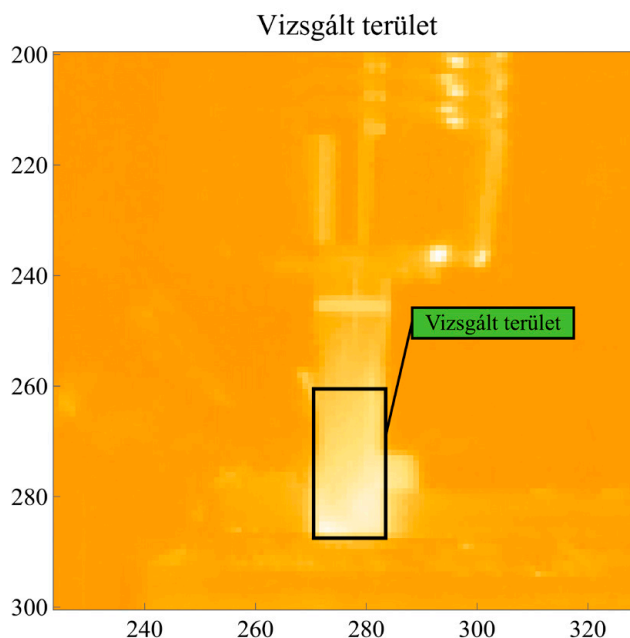
Számos kutatás témáját képezte a forgácsolási paraméterek hőmérsékletre való hatásának vizsgálata. Gyakran vizsgált paraméterek a forgácsolási sebesség, előtolási sebesség, élenkénti előtolás, illetve a radiális és axiális fogásmélység. A vizsgált paraméterek valamint tartományok eltérő megválasztásából adódóan azonban az eredmények nehezen összehasonlíthatók, illetve esetenként ellentmondanak egymásnak [14],[15].

A forgácsolási hőmérséklet szabályozásával növelhető a szerszám éltartama, valamint kedvezőbb felületi minőség biztosítható, azonban csekély számban állnak rendelkezésre eredmények ezen a területen. Ennek oka lehet, hogy a hőmérséklet felfutása meredeken történik, így a beavatkozásra rendelkezésre álló idő rövid. A legelterjedtebb hőmérséklet mérési módszer, a termoelem esetében a hosszú reakcióidő nem teszi lehetővé a kellő gyorsaságú beavatkozást. Jaeschke és társai már 1967-ben foglalkoztak automatikus forgácsolási hőmérséklet szabályozási rendszer megvalósításával [16]. A hőmérséklet mérése szerszám-munkadarab termoelem segítségével történt, a szabályozott paraméter pedig a forgácsolási sebesség volt. Az észlelt jel zajos természetéből következően azonban stabilitási problémák léptek fel. A további kutatások elsősorban megfelelő forgácsolási paraméterek előzetes megválasztásán keresztül tettek kísérletet a hőmérséklet korlátozására [16], [17]. Az irodalom alapján tehát az adaptív hőmérsékletszabályozás területén még számos feltárássra váró lehetőség van.

A kutatás célja a forgácsolási hőmérséklet paraméterfüggésének feltárása volt. Vizsgálatra került továbbá az adaptív hőmérsékletszabályozás megvalósításának lehetősége is.

2. A FORGÁCSOLÁSI HŐMÉRSÉKLET MÉRÉSE

A forgácsolási kísérletek egy Kondia B640 háromtengelyes megmunkálóközponton kerültek elvégzésre, egy iTendo² intelligens rezgésmérő szerszámtartóba befogott Horex DIN3565 kétélű keményfém szármaró alkalmazásával. A rezgésmérés biztosította a forgácsolási folyamat során fellépő transziensek érzékelését. A forgácsolási erők mérése egy Kistler 9257B piezoelektromos erőmérő szenzor segítségével történt. A megmunkálás során a szerszámhőmérséklet egy Jenoptik VarioCam HD infravörös termokamera segítségével került rögzítésre. A vizsgált hőmérséklet értékek az IRBIS3 szoftverrel kerültek rögzítésre. A mérési eredmények kiértékelése a termogram azon pixeljei alapján történt, amelyek a szerszám fogásban lévő része köré írt téglalaphoz tartoztak (1. ábra), így a termogramon megjelenő további tárgyakról visszaverődő fény hatása nem befolyásolta a mérési eredményeket.



1. ábra. Termogram a feldolgozásnál figyelembe vett területet jelölve.

A hőkamera megfelelő működésének biztosítása érdekében a megmunkálás hűtő-kenő folyadék alkalmazása nélkül történt. A vizsgált forgácsolási paraméterek a forgácsolási sebesség (v_c), az élenkénti előtolás (f_z), az axiális fogásmélység (a_p) és a kontaktszög (θ) voltak (1. Táblázat). A paraméterek hatásának vizsgálata faktoronként történt.

v_c [m/min]	f_z [mm]	a_p [mm]	θ [°]
60	0,01	2	15
80	0,02	4	30
100 (referencia)	0,03 (referencia)	6 (referencia)	45
120	0,04	8	60 (referencia)
140	0,05	10	75
			90

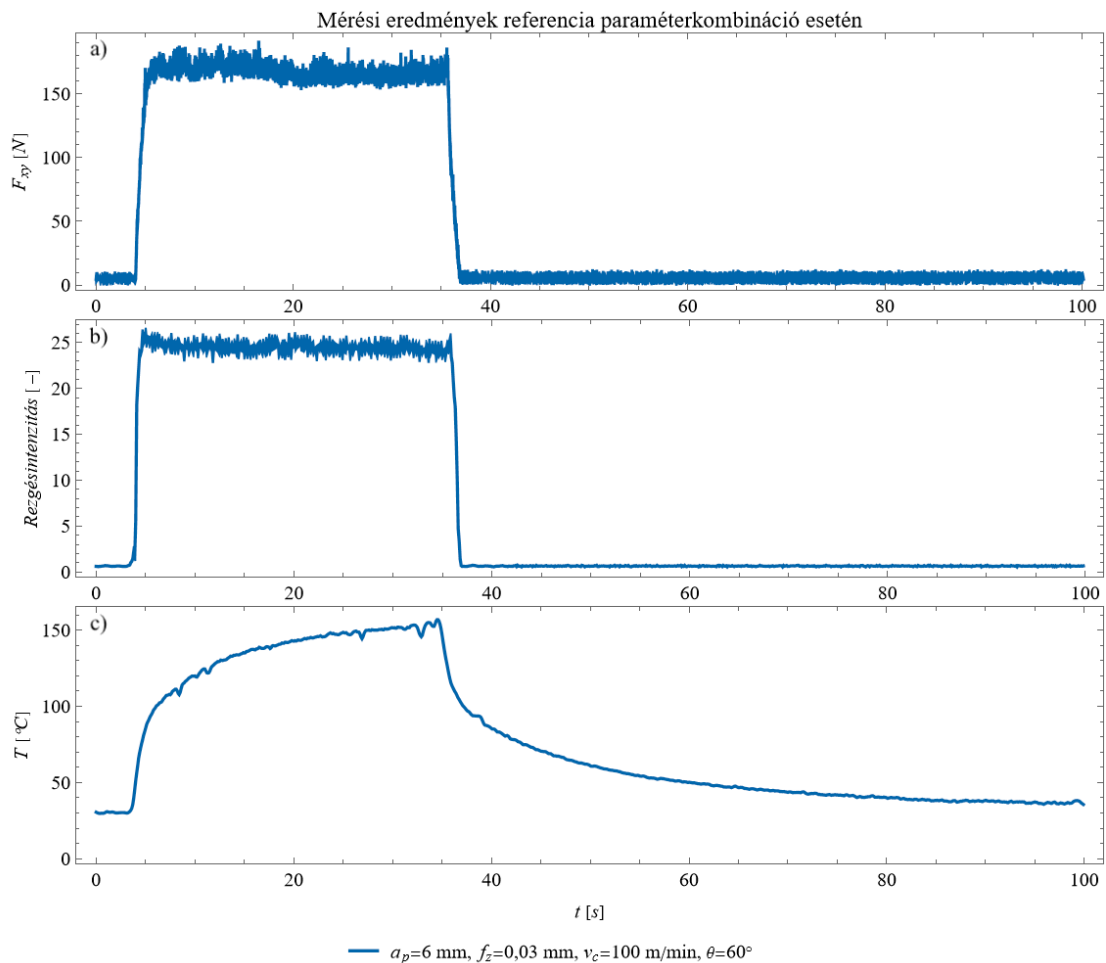
A paraméter-szignifikancia vizsgálat standardizált β -együtthatók segítségével történt. Ez a statisztikai módszer lehetővé teszi az eltérő dimenzióval rendelkező prediktor változók szignifikanciájának összehasonlítását. Az együtthatók kiszámítása a mintán lineáris regressziót végezve kapott együtthatókat ((1)-es egyenlet) beszorozva a független változók, valamint a függő változó mintájának szórásainak hányadosával történhet a (2)-es egyenlet szerint [18]:

$$\beta_1 x_{p,1} + \beta_2 x_{p,2} + \dots + \beta_n x_{p,n} + \psi = v \quad (1)$$

$$\beta_{s,i} = \frac{s_p}{s_s} \cdot \beta_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

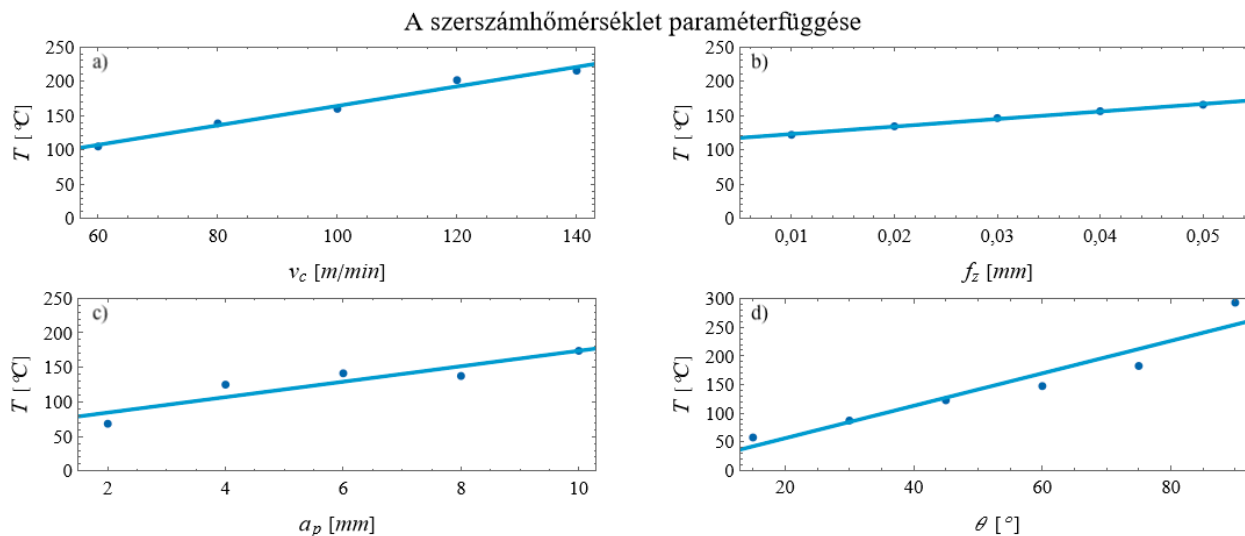
$\beta_{s,i}$ a standardizált, β_i az eredeti regressziós együttható, ψ regressziós konstans, s_p a prediktor változó szórása, s_s a minta szórása, v pedig a minta, mint függő változó adott paraméterekhez tartozó értéke.

A referencia paraméterek esetén a forgácsolási erők és rezgések, valamint a szerszámhőmérséklet értékek az 2. ábra szerint alakultak. A mérések feldolgozása során a tranziensek, mint az élrátét képződés, a rezgésintenzitás változásának vizsgálatával kiszűrhetőek voltak. A mérések alapján a hőmérséklet gyors felfutást követően stabilizálódik, a forgácsolás leállítását követően pedig gyors visszahűlés tapasztalható.



2. ábra. Mérési eredmények referencia paraméterek esetén, a) a forgácsolási erő vetülete a megmunkálás síkjában, b) rezgések, c) maximális szerszámhőmérséklet.

A mérési eredmények alapján a paramétereiktől egyenként közel lineárisan függ a szerszámhőmérséklet a vizsgált tartományon (3. ábra).



3. ábra. A szerszámhőmérséklet alakulása, a) a forgácsolási sebesség, b) az élenkénti előtolás, c) az axiális fogásmélység, d) a kontaktszög függvényében.

A statisztikai elemzés szerint a szerszámhőmérséklet alakulása szempontjából a kontaktszög a legszignifikánsabb paraméter, míg az élenkénti előtolás befolyásolja legkevésbé a hőmérséklet alakulását a vizsgált tartományon (2. Táblázat).

A forgácsolási paraméterek szignifikanciája

2. Táblázat

Paraméter	v_c	f_z	a_p	θ
β_s - együttható	0,338	0,149	0,304	0,735

3. A FORGÁCSOLÁSI HŐMÉRSÉKLET SZABÁLYOZÁSA

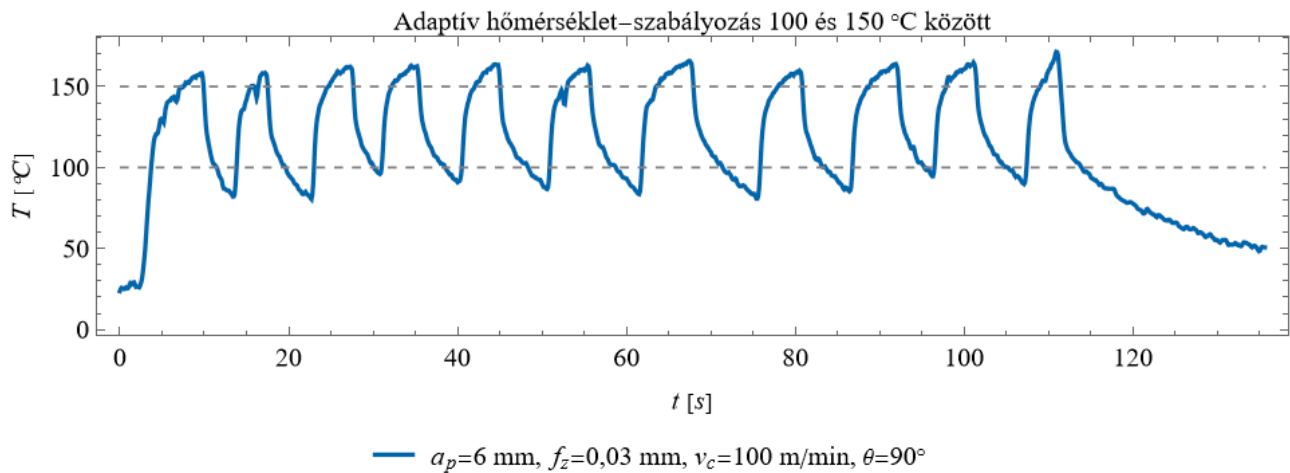
A mérési adatok alapján ugyan meg lehet adni megfelelő paramétereket a forgácsolási hőmérséklet korlátozásához, azonban a környezeti körülmények, illetve a szerszám állapotának megváltozásából adódó bizonytalanság adaptív szabályozással küszöbölhető ki.

3.1. A hőmérséklet-szabályozási rendszer

A valós idejű hőmérséklet szabályozás megvalósítása a hőkamera szoftverében, a szerszám forgásban lévő részén felvett téglalap alakú mérési területen, mintavételezési időpillanatonként kijelzett maximális hőmérséklet értékek alapján történt. A szerszámgép vezérlése egy elágazásokat tartalmazó paraméteres programot hajtott végre. A kísérlet előtt előzetesen meghatározásra került egy minimális és maximális szerszámhőmérséklet érték, így nem csak a szerszámhőmérséklet felső értéke, hanem a hőmérséklet ingadozása is korlátozható volt. A felső hőmérsékletkorlát túllépésekor a vezérlés feltételes mondatkihagyással reagált, amely a szerszám kiemelését és az előtolás leállítását vonta maga után. Az alsó korlát elérése után a forgácsolási folyamat úraindult.

3.2. Validációs kísérlet

A szabályozási rendszer validálásához végzett kísérlet során a forgácsolási sebesség 100 m/min , az élenkénti előtolás $0,03 \text{ mm}$, a fogásmélység 6 mm , a kontaktszög pedig 90° volt. A módszer tesztelése 100 , illetve $150 \text{ }^\circ\text{C}$ fokos alsó- és felső hőmérséklet-korlátok mellett történt. A kísérletek során a hőkamerával mért hőmérséklet a korlátok között ingadozott, kis mértékben átlépve a megengedett maximális és minimális értékeket a hullámhegyeknél és hullámvölgyeknél (4. Ábra). A korlátok rövid átlépése a szabályozási rendszerekre jellemző, azonban a rendszert terhelő késleltetések csökkentésével, a rendszer automatizálásával a hiba mértéke csökkenthető. A kísérleti eredmények alapján kijelenthető, hogy a forgácsolás közben történő beavatkozás megfelelően alkalmazható a gyakorlatban.



4. ábra. Hőmérséklet-szabályozás 100 és 150 °C között.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során vizsgálatra került a forgácsolási hőmérséklet alakulása a forgácsolási paraméterek függvényében, valamint bemutatásra került egy adaptív hőmérséklet-szabályozási rendszer. Az erők, rezgések és hőmérséklet mérésére alkalmas mérési elrendezés megfelelő pontossággal tette lehetővé a forgácsolási folyamat vizsgálatát, a tranziens jelenségek észlelését és kiszűrését. A kísérletek alapján a forgácsolási hőmérsékletet elsősorban a szerszám radiális bemerülése határozza meg, az élenkénti előtolás hatása pedig nem jelentős. A forgácsolási hőmérséklet szempontjából tehát érdemes kis kontaktszög mellett nagy élenkénti előtolást alkalmazni a megfelelő termelékenység biztosítása érdekében. A bemutatott szabályozási rendszer a kísérletek eredményei alapján megfelelően működik a gyakorlatban a forgácsolási hőmérséklet maximális értékének, valamint a hőmérséklet ingadozásának korlátozására.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal 2021-1.2.4-TÉT-2021-00054 azonosítójú, „Mikromegmunkálás gépi tanulással támogatott folyamatfelügyelete az Ipar 4.0 keretén belül” című projektjének és az MTA Bolyai János Kutatói Ösztöndíj (BO/00841/24/6) támogatásával valósulhatott meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] T. Junge, T. Mehner, A. Nestler, A. Schubert, és T. Lampke, „Surface properties in turning of aluminum alloys applying different cooling strategies”, *Procedia CIRP*, köt. 108, o. 246–251, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.03.043.
- [2] M. Bacci Da Silva és J. Wallbank, „Cutting temperature: prediction and measurement methods—a review”, *J. Mater. Process. Technol.*, köt. 88, sz. 1–3, o. 195–202, ápr. 1999, doi: 10.1016/S0924-0136(98)00395-1.
- [3] M. J. Bermingham, S. Palanisamy, és M. S. Dargusch, „Understanding the tool wear mechanism during thermally assisted machining Ti-6Al-4V”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, köt. 62, o. 76–87, nov. 2012, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2012.07.001.
- [4] A. M. Khorasani, M. R. S. Yazdi, és M. S. Safizadeh, „Analysis of machining parameters effects on surface roughness: a review”, *Int. J. Comput. Mater. Sci. Surf. Eng.*, köt. 5, sz. 1, o. 68, 2012, doi: 10.1504/IJCMSSE.2012.049055.
- [5] A. K. Tingaev, R. G. Gubaydulín, és I. A. Ilin, „Study of the Effect of Thermal Cutting on the Microstructure and Chemical Composition of the Edges of Workpieces Made of Steel Brands S345, S390”, *Procedia Eng.*, köt. 150, o. 1783–1790, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.171.
- [6] A. K. Tingaev, R. G. Gubaydulín, és I. A. Ilin, „Study of the Effect of Thermal Cutting on the Microstructure and Chemical Composition of the Edges of Workpieces Made of Steel Brands S345, S390”, *Procedia Eng.*, köt. 150, o. 1783–1790, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.171.
- [7] T. D. Dinh, J. Vanwalleghem, H. Xiang, H. Erdelyi, T. Craeghs, és W. V. Paepegem, „A unified approach to model the effect of porosity and high surface roughness on the fatigue properties of additively manufactured Ti6-Al4-V alloys”, *Addit. Manuf.*, köt. 33, o. 101139, máj. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101139.

- [8] A. Mishra és T. Prasad, „Residual stresses due to a moving heat source”, *Int. J. Mech. Sci.*, köt. 27, sz. 9, o. 571–581, jan. 1985, doi: 10.1016/0020-7403(85)90073-6.
- [9] V. K. Yadav, V. Gaur, és I. V. Singh, „Combined effect of residual and mean stresses on fatigue behavior of welded aluminum 2024 alloy”, *Int. J. Fatigue*, köt. 155, o. 106565, febr. 2022, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106565.
- [10] B. Denkena, J. Brüning, D. Niederwestberg, és R. Grabowski, „Influence of Machining Parameters on Heat Generation During Milling of Aluminum Alloys”, *Procedia CIRP*, köt. 46, o. 39–42, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.03.192.
- [11] J. Kunderák, Z. Pálmai, B. Karpuschewski, C. Felhő, T. Makkai, és D. Borysenko, „Force and Temperature Conditions of Face Milling with Varying Chip Quotient as a Function of Angle of Rotation”, *Manuf. Technol.*, köt. 21, sz. 2, o. 214–222, ápr. 2021, doi: 10.21062/mft.2021.033.
- [12] J. Xu, N. Geier, J. Shen, V. Krishnaraj, és S. Samsudeensadham, „A review on CFRP drilling: fundamental mechanisms, damage issues, and approaches toward high-quality drilling”, *J. Mater. Res. Technol.*, köt. 24, o. 9677–9707, máj. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.05.023.
- [13] P. Koleda, S. Barcik, és A. Noicarova, „Effect of Technological Parameters of Machining on Energy Efficiency in Face Milling of Heat-Treated Oak Wood”, *BioResources Machining & Energy Efficiency*, sz. 13, o. 6133–6146, 2018.
- [14] H. V. Lima, A. F. V. Campidelli, A. A. T. Maia, és A. M. Abrão, „Temperature assessment when milling AISI D2 cold work die steel using tool-chip thermocouple, implanted thermocouple and finite element simulation”, *Appl. Therm. Eng.*, köt. 143, o. 532–541, okt. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.107.
- [15] M. Mia és N. R. Dhar, „Response surface and neural network based predictive models of cutting temperature in hard turning”, *J. Adv. Res.*, köt. 7, sz. 6, o. 1035–1044, nov. 2016, doi: 10.1016/j.jare.2016.05.004.
- [16] J. R. Jaeschke, R. D. Zimmerly, és S. M. Wu, „Automatic cutting tool temperature control”, *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, köt. 7, sz. 4, o. 465–475, dec. 1967, doi: 10.1016/0020-7357(67)90009-1.
- [17] P. Palanisamy, I. Rajendran, S. Shanmugasundaram, és R. Saravanan, „Prediction of cutting force and temperature rise in the end-milling operation”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, köt. 220, sz. 10, o. 1577–1587, okt. 2006, doi: 10.1243/09544054JEM542.
- [18] J. Cohen, P. Cohen, S. G. West, és L. S. Aiken, *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences*, 3rd ed. 2003.