

MARÓSZERSZÁMOK ERŐTANI ÉS TÖNKREMENTELI VIZSGÁLATA

STRENGTH AND FAILURE TESTING OF MILLING TOOLS

Horváth Richárd, Fábrián Enikő Réka, Stadler Róbert Gábor, Pinke Péter
Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
horvath.richard@uni-obuda.hu; fabian.reka@uni-obuda.hu; stadler.robert@uni-obuda.hu;
pinke.peter@uni-obuda.hu

ABSTRACT

This article deals with strength tests of milling tools and tool breakage as a form of failure. In the series of experiments performed, were systematically changed the value of the radial depth of cut in one case and the value of the feed until the break of the tool in the other case. From the obtained results it is possible to get acquainted with the change of the cutting forces as a function of the cutting parameters, as well as from the tests after the tool breakage due to the different stresses, the form of failure. Examination of the failure shape was performed with a digital stereomicroscope and fracture surfaces were analyzed with an electron microscope.

1. BEVEZETÉS

A forgácsoló szerszámok állapotfelügyelete általában közvetett adatokból valósítható meg. A késztermék minőségére a forgácsolási folyamat vagy annak változása nagy hatással van. Ezért szükséges a forgácsolási folyamat jellemzőinek minél pontosabb ismerete, mérése, vagy előzetes szimulációja. A forgácsolási folyamat egyik legkritikusabb pontja a szerszámok törése. A hibás készterméken túl a szerszámtörés kárt tehet a szerszámgép részeiben, ezért annak előrejelzése, az egyik legfontosabb igény. A tématerület kutatása több évtizedes múltra tekint vissza. Lan és Naerheim [1] már a múlt század nyolcvanas éveiben a forgácsoló erő jel adaptív feldolgozási módszerét ismertették a szerszám törésének megállapítására. Altintas és társai. [2] egy egyszerűen kezelhető és hatékony algoritmust mutattak be a marási erő jel feldolgozására, mellyel a szerszámtörés detektálható. Számos kutatás foglalkozott az előtoló hajtás jeleinek alapján a szerszám károsodás előrejelzésével. Altintas [3] egy későbbi munkájában az előtoló meghajtomotorok által felvett áram változását használta a marási folyamatok ellenőrzéséhez. Vizsgálataiban bizonyította, hogy a marószerszám esetleges hibája egy orsófordulaton belül detektálható az átlagos áramjelek szűrés utáni feldolgozásával. Hasonló eredményre jutottak Lee és társai is. [4], hogy NC marási folyamatban a forgácsoló erő jellemezhető közvetetten a hajtómű áramának mérésével, az (előtoló) motor áramának érzékenysége elegendő a szerszámtörés jellemzésére. C. Chan és Chan [5] egy új on-line

felügyeleti rendszert fejlesztettek ki marási műveleteknél a szerszámtörés előrejelzésére. Az on-line rezgésjel jellemzőit frekvenciatartományban vizsgálva, kísérleti tesztek után meghatározott küszöbértékekkel jellemezhető a szerszám állapota, annak kritikus tönkremenetele is. Jesus és társai [6] is az on-line szerszámtörés észlelést kutatták. A forgácsolóerő jeleket ők is a vezérelt tengelyek motorjainak áram változásaiból származtatják. Nagy sebességű marásnál még fontosabb és gyorsabb detektálást igényel a szerszámtörés megállapítása. Sevilla-Camacho és társai. [7] egy nagy sebességű (HSM) megmunkáláshoz adaptált szerszám állapot felügyeleti rendszert ismertettek. A munkájukban egy hatékony és gyors módszer vázolnak. A módszerük alapja ebben az esetben is a hajtó motor(ok) áramjeleinek szenzorokkal történő mérésén alapul. Szintén egy valós idejű szerszámmonitorozási módszert ismertett Čuš és Župerl [8]. Kutatásukban egy olyan, monitoring rendszert mutatnak be, amely valós időben képes észlelni az eszköz kopását és annak törését is. Az általuk kifejlesztett szerszámfelügyeleti rendszer révén a megmunkálási folyamat on-line figyelemmel kísérhető és leállítható a szerszámcsere érdekében, az előre beállított szerszámkopási határ alapján.

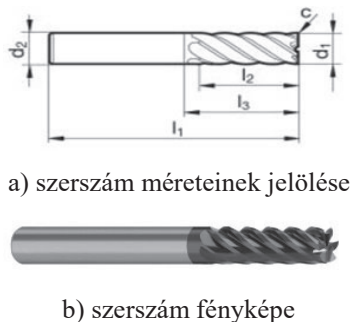
Egy másik fontos kutatási területet a szerszámkárosodás detektálására az akusztikus emisszió mérés nyújtotta lehetőségek jelentik. Tansel és társai [9] már az ezredforduló előtt foglalkoztak a szerszám kopásának becslésével és a szerszámtörés detektálásával akusztikus emissziós jelek alapján. Szintén az akusztikus emisszió jelek feldolgozásának révén egy új megközelítést ismertettek a szerszámtörés detektálására marás esetén Cao és társai [10]. Sun és társai [11] a marószerszám szerszámtörésének ellenőrzésére javasolnak egy általuk fejlesztett módszert az akusztikus emisszió jelfeldolgozásán keresztül. A javasolt módszerüket egy marógépen végzett kísérlet során alkalmazták és validálták. Másik munkájukban [12] az akusztikus emisszió nyers adatainak összetevőit elemzik, hogy megtalálják a szerszámtörés mozzanatait és kiszűrjék a megfelelő akusztikus emisszióból, a jellemző mintákat. Az általuk javasolt modell az elvégzett kísérletekben 91,18% -os pontosságot ért el a szerszámtörések kimutatásában.

A lágyszámítási módszerek előretörésével az ilyen technikák is segítséget hoztak a szerszámtörés előrejelzésében. A legújabb kutatási eredmények azt mutatják, hogy a Fuzzy logika és a Neurális hálózatok használatával nagyon hatékonyan észlelhető a forgácsolószerszámok törése a megmunkálási folyamatok során. Szintén az ezredforduló előtt már Chen és Black [13] egy Fuzzy alapú rendszert javasolnak a szerszámtörés nyomon követésére. Chen [14] későbbi munkájában egy Fuzzy tanítási eljárást dolgozott ki a szabályrendszerek felépítésére. Az általa bemutatott rendszer képes "valós időben" reagálni és alkalmazkodni a gép leállításához, ha szerszámtörés történik. Cuka és Kim [15] munkájukban egy Fuzzy alapú szerszám monitoring módszert ismertet. Bemutatják, hogy a megmunkálási folyamatban a forgácsolási sebesség szabályozásával meg lehet hosszabbítani a szerszám élettartamát, és ez elengedhetetlen annak elkerülése érdekében, hogy a megmunkálási folyamat hirtelen szerszámtöréssel vagy szerszámcsere művelettel megszakadjon. Szintén a szerszámtörés detektálás kutatását végezték el „deep learning” eszközök segítségével Li és társai. [16]. A marási folyamatban a főorsó áramának jellemzőit elemezték a szerszámkopási folyamatokon keresztül, majd a szerszámtörés lehetőségét konvolúciós neurális háló (convolutional neural network – CNN) által határolták be. Az eredmények azt mutatják, hogy módszerük 93%-os pontossággal képes észlelni a szerszámtörést. Cikkünkben marási kísérletekkel vizsgáljuk a szerszámra ható erők nagyságát, valamint a szerszám kritikus (törési) tönkremenetelét különböző forgácsolási paraméterek hatására. A törési felületeket sztereomikroszkópos és pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokkal elemezzük.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. Forgácsoló szerszám, szerszámgép, alapanyag, mérőeszközök

A forgácsoló szerszám többfogú simító maró volt, sima élkiképzéssel, normál kivitelben (szerszám kód: 5745-6.000, szerszámgyártó: Gühring, Inc.). Az 1. ábrán látható a vizsgálatba vont szerszám vázlata méretének jellemzői, valamint fényképe.



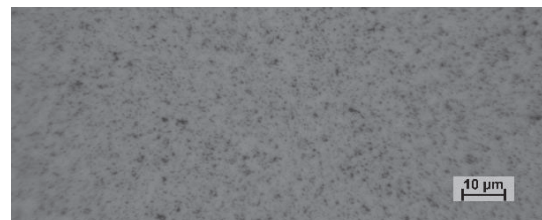
1. ábra Vizsgálatba vont forgácsolószerszám

A szerszám főbb méretei az alábbiak: $l_1 = 57$ mm; $l_2 = 13$ mm; $l_3 = 21$ mm; d_1 (h10) = 6 mm; d_2 (h6) = 6 mm. A szerszám jellemzői: fogszám (z) = 6; élkialakítás (c) = $0,05\text{mm} \times 45^\circ$; hátszög (α) = 0° ; homlokszög (γ) = 7° ; horony emelkedési szög (λ) = 45° .

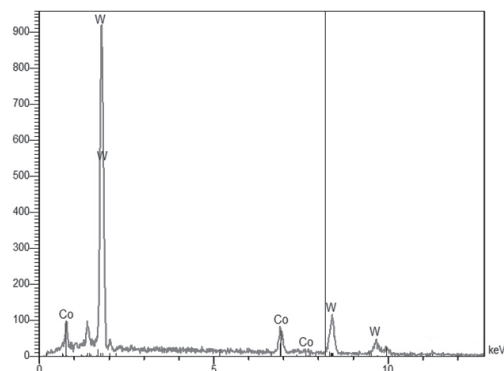
A forgácsolási kísérleteket MSN-500 CNC marógépen végeztük. A forgácsoló erőkomponenseket KISTLER 9257B háromkomponenses erőmérővel és KISTLER 5019 háromcsatornás mérőerősítővel mértük. A vizsgált szerszámok szövetszerkezeti vizsgálatát gyémánttárcsás kimunkálást követően, metallográfiai csiszolat készítése után, Neophot 2 típusú fémmikroszkópon végeztük. Maratószerként királyvizet (1 rész HNO_3 + 3 rész HCl) alkalmaztunk. A töretfelületek vizsgálatát Nikon FSZX sztereomikroszkóppal és JEOL gyártmányú JSM 5310 pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) tanulmányoztuk. A forgácsolási kísérletek során a felhasznált munkadarab anyaga C45 (1.0503) acél volt.

A fémmikroszkópos vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a szerszámok belső szerkezete jó homogenitást mutat, belső hibák, repedések nem voltak kimutathatók. A minták maratása után a keményfém részecskék egyenletes eloszlását a 2. ábra mutatja.

Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok alapján a szerszámokat volfrámkarbid (WC) alkotja, amelyeket kobalt (Co) kötőanyag kapcsol össze (3. ábra, 1. táblázat). Az elemanalízishez energiadiszperziós spektrométeres vizsgálatot alkalmaztunk (SEM-EDS). A szerszám bevonatának elemanalízisét a 4. ábra mutatja, a detektált elemek mennyiségi arányait a 2. táblázat foglalja össze. Az elemzésből adódóan a bevonatot alkotó főbb elemek az Al, Ti és N.



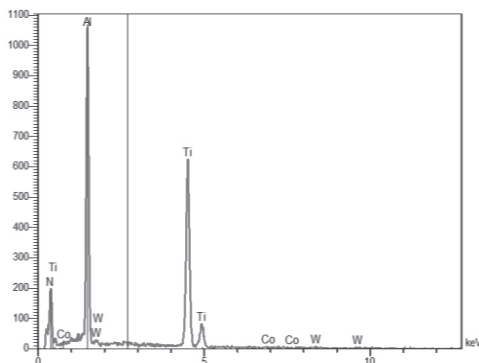
2. ábra Fémmikroszkópos felvételek a marószerszám (B01) keresztirányú csiszolatáról, maratás után $N_{eredeti} = 1000\times$



3. ábra. A marószerszám (B01) elemanalízise SEM-EDS vizsgálat alapján

1. táblázat. A marószerszámban (B01) detektált elemek

Elemek	Tömeg%	Atom%
Co	9,51	22,50
W	81,65	61,91



4. ábra SEM-EDS spektrum a marószerszám (B01) bevonatolt részén

2. táblázat A marószerszámon (B01) lévő bevonat összetétele:

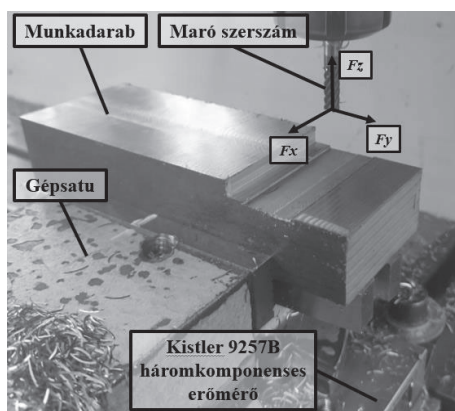
Elemek	Tömeg %	Atom%
N	47,61	70,21
Al	24,10	18,45
Ti	25,15	10,85
Co	0,21	0,07
W	2,29	0,26

2.2. Forgácsolási paraméterek, mért erőkomponensek

A forgácsolási kísérleteket 50 mm-es szakaszokon végeztük, hogy a szerszámkopás minél kisebb hatással legyen a forgácsoló erőre. A kísérletsorozatban mértük a forgácsolási erő három komponensét $F_x, N; F_y, N$ (szerszámra ható radiális erő komponensek); F_z, N (axiális erő), melyekből a szerszámra ható eredő erő:

$$F_e = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

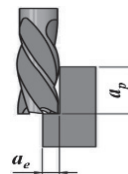
A mért erőkomponensek irányát és a kísérleti elrendezést az 5. ábra mutatja.



5. ábra A forgácsolási kísérlet elrendezése

Két kísérletsorozatot végeztünk annak megállapítására, hogy a forgácsolási paraméterek hogyan befolyásolják a forgácsolási erőigényeket. A

változtatott forgácsolási paramétereket a szerszám töréséig növeltük. A fogásmélységek magyarázatát a 6. ábra ismerteti. Az a_p az axiális fogásmélységét mutatja, míg az a_e a radiális fogásmélységét jelöli.



6. ábra. Fogásmélységek maráskor

Az első kísérlet sorozatban az radiális fogásmélységet változtattuk $a_e = 0,3 \dots 2,85$ mm, az $f_z = 0,025$ mm ($v_f = 210$ mm/min) állandó értéken tartása mellett. A második kísérlet sorozatban az fogankénti előtolást változtattuk $f_z = 0,01$ mm-től $0,045$ mm -ig, az $a_e = 1,8$ mm konstans értéke mellett. Mindkét kísérlet sorozatban az $a_p = 6$ mm és $n = 1400$ 1/min ($v_c = 26,4$ m/min) állandó értékek voltak.

3. EREDMÉNYEK

3.1. Forgácsolási erők változása a forgácsolási paraméterek függvényében

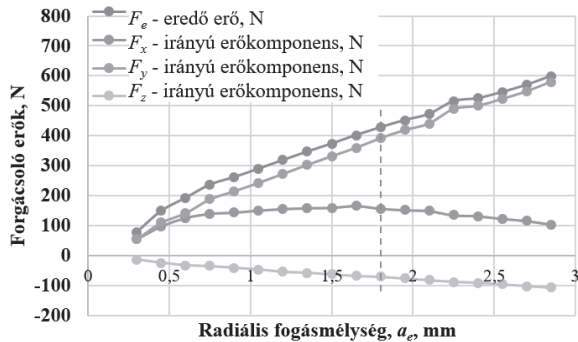
A forgácsolási paramétereket külön-külön szerszámtörésig növeltük (ahogy azt a 3. és 4. táblázat mutatja). A mért erőkomponensekre, valamint a szerszámra ható eredő erő változását a 7. és 8. ábra mutatja. Minden mérési sorozat utolsó beállításánál a vizsgálatba vont szerszámok eltörtek. A két mérési sorozat B01-11 és B02-4 mérési pontjainak forgácsolási paraméterei megegyeznek.

3. táblázat. Az 1. mérési sorozat a radiális fogásmélység (a_e) változtatásával

Mérési pont	Forgácsolási paraméterek			Mért erőkomponensek			
	f_z, mm	$v_f, \text{mm/perc}$	a_e, mm	F_x, N	F_y, N	F_z, N	F_e, N
1	0,025	210	0,3	55	55	-13	79
2	0,025	210	0,45	98	110	-24	149
3	0,025	210	0,6	126	142	-33	193
4	0,025	210	0,75	140	188	-34	237
5	0,025	210	0,9	144	215	-41	262
6	0,025	210	1,05	151	243	-47	290
7	0,025	210	1,2	156	273	-53	319
8	0,025	210	1,35	159	303	-58	347
9	0,025	210	1,5	160	332	-62	374
10	0,025	210	1,65	166	360	-67	402
11	0,025	210	1,8	157	392	-70	428
12	0,025	210	1,95	152	419	-76	452
13	0,025	210	2,1	149	441	-82	473
14	0,025	210	2,25	135	489	-89	515
15	0,025	210	2,4	132	500	-91	525
16	0,025	210	2,55	123	523	-95	546
17	0,025	210	2,7	116	548	-103	570
18	0,025	210	2,85	104	580	-107	599

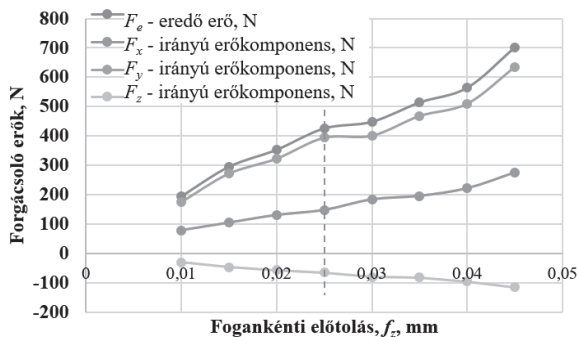
4. táblázat A 2. mérési sorozat a fogankénti előtolás (f_z), - előtoló sebesség (v_f) változtatásával

Mérési pont	Forgácsolási paraméterek			Mért erőkomponensek			
	f_z , mm	v_f , mm/perc	a_e , mm	F_x , N	F_y , N	F_z , N	F_e , N
1	0,01	84	1,8	79	175	-30	194
2	0,015	126	1,8	105	272	-46	295
3	0,02	168	1,8	131	323	-57	353
4	0,025	210	1,8	148	394	-65	426
5	0,03	252	1,8	184	401	-80	448
6	0,035	294	1,8	196	468	-82	514
7	0,04	336	1,8	222	510	-95	564
8	0,045	378	1,8	276	635	-115	702



7. ábra B01 jelű szerszám forgácsoló erő komponenseinek változása a radiális fogásmélység függvényében (f_z ; a_p – állandó értéken tartva)

A 7. ábra a fellépő forgácsoló erő komponensek és az eredő erő változását mutatja a radiális fogásmélység függvényében. Jól látszik, hogy ez a forgácsolási paraméter a legnagyobb hatással az F_y irányú komponensre van. Ennek következtében az eredő forgácsoló erőre ez az irányú komponens gyakorolja a legnagyobb hatást, amely így hasonlóan a radiális fogásvételnek a növelésével szintén nő. Az F_x irányú komponens enyhe növekedést mutat a 10. mérési pontig ($a_e = 1,65$ mm), majd ezután a törésig enyhén csökken. Végezetül az F_z irányú erő a radiális fogásvétel növekedésével folyamatosan csökken, ami az egyre nagyobb fogásvétel miatt egyre növekvő (horonyszögből adódó) axiális erőkomponensből adódik.



8. ábra B02 jelű szerszám forgácsoló erő komponenseinek változása a fogankénti előtolás függvényében (a_e ; a_p – állandó értéken tartva)

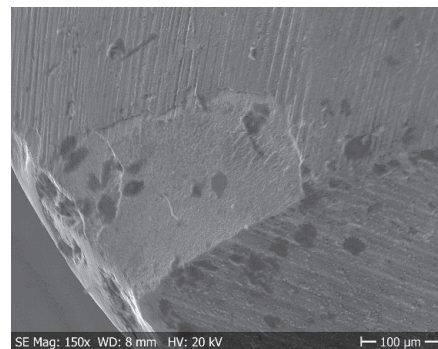
A 8. ábrán a forgácsoló erők és az eredő forgácsoló erő változása látható a fogankénti előtolás

függvényében. Ahogyan azt a radiális fogásvétel növelésénél is tapasztaltuk, az itt változtatott forgácsolási paraméter (f_z) is az F_y irányú forgácsoló erő komponensre gyakorolja a legnagyobb hatást. Az F_x irányú erő komponens a törésig folyamatosan növekszik a fogankénti előtolás függvényében, míg az F_z irányú erő (hasonlóan a 7. ábrához) a fogankénti előtolás növekedésével folyamatosan csökkenést mutat.

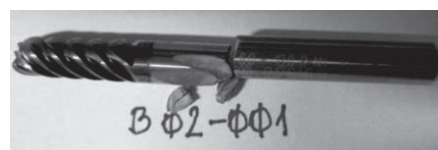
A 7. és a 8. ábrán jelölt szaggatott vonal az azonos forgácsoló paraméter kombinációkat ábrázolja. Jól látszik, hogy bár más és más forgácsolási paraméter változtatásával értünk el ugyanazon beállításhoz, a fellépő erők nagysága közel azonos. Ez a jelenség elmondható a szerszámtöréskor keletkezett erők nagyságára is. Az eltérő forgácsolási paraméterekből adódóan a B01-es szerszám közel kétszer annyi időt töltött forgácsolásban, mint a B02 jelű szerszám, a szerszám törésekor fellépő erők ebben az esetben is hasonlóak. Megállapítható, hogy a szerszámok törési károsodása a fellépő erők nagyságától függ. A végrehajtott forgácsolási kísérletsorozat alapján elmondható, hogy a törés bekövetkezése a töréshez tartozó forgácsolási erőhöz köthető, függetlenül attól, hogy mely forgácsolási paraméter növelésével értünk el a törést kiváltó erőt. A töréskor mért forgácsoló erők eredői között közel 100 N különbség észlelhető. A töréshez vezető erők közti különbség magyarázatát illetően további forgácsolási kísérletek szükségesek.

3.2. Törétfelületek vizsgálata

A szerszámtörések a szerszám szár részében következtek be. Annak ellenére, hogy a forgácsolási kísérletek során a szerszám élénél a bevonat lepattant és minimális éllepattanás is felfedezhető volt pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok során (9. ábra). A B02 jelű törött marószerszámot a 10. ábra mutatja.



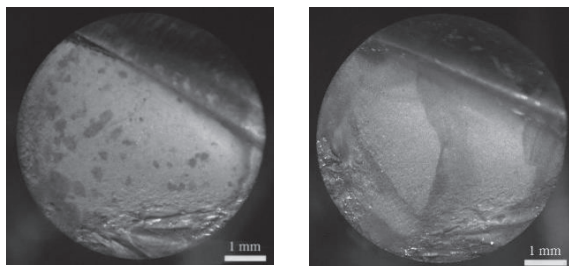
9. ábra Bevonat és él sérülése B01 szerszámnál



10. ábra. A törött B02 jelű marószerszám

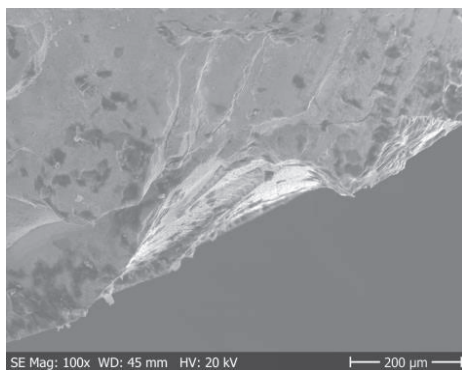
Ahogy a 11. ábrán, látható a törétfelületek jellege nagyon hasonló. A töretek rideg törési jelleget mutatnak, hasonló számú lépcsősség és nagy síkbeli hasadás

mutatkozott mindkét szerszámon. Ez a lépcsős töret a pásztázó elektronmikroszkópos felvételen még egyértelműbben látható (12. ábra)



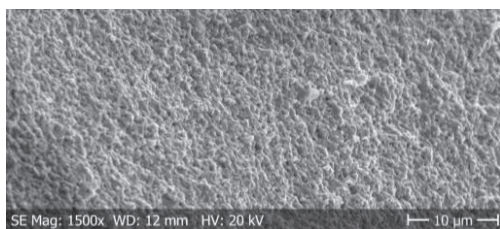
a) B01 jelű szerszám b) B02 jelű szerszám

11. ábra A szerszámok töretfelületei

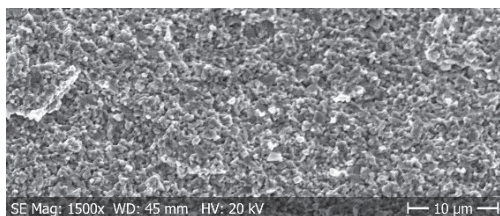


12. ábra Lépcsős töret jellege elektronmikroszkópos felvételeken (B01 szerszám)

Nagyobb nagyításban készült elektronmikroszkópos felvételekből következően egyértelmű, hogy a töretfelület ridegtörés jelleget mutat mindkét szerszámnál (13-14. ábrák).



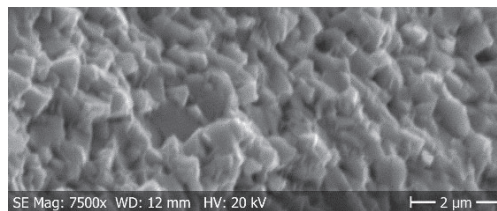
13. ábra B01 jelű szerszám töretéről készült elektronmikroszkópos felvétel $N_{eredeti}=1500x$



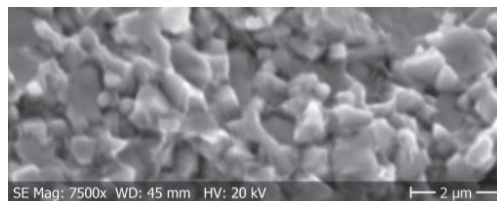
14. ábra B02 jelű szerszám töretéről készült elektronmikroszkópos felvétel $N_{eredeti}=1500x$

Nagyobb nagyításban vizsgálva a töretfelületeket, megállapítható, hogy a szerszámokat $1 \mu\text{m}$ -nél kisebb szemcsékből készítették. Bár azonos jelölésű szerszámokkal dolgoztunk a szerszámokat alkotó

szemcsék a B01-es szerszámnál finomabb szemcsemérettel rendelkeztek, mint a B02-es jelűnél (15. ábra).



a) B01 jelű szerszám törete (nagyítás 7500x)



b) B02 jelű szerszám törete (nagyítás 7500x)

15. ábra Marószerszámok szemcseszerkezete (töretfelületekről 7500x-os nagyításban készült elektronmikroszkópos felvételek)

4. KONKLÚZIÓ

Két azonos típusú marószerszámot terhelünk eltérő forgácsolási paraméterek változtatásával törési tönkremenetelig. A forgácsolási kísérletek során az egyik szerszámnál a fogásmélységet növeltük, a másik szerszámnál pedig a fogankénti előtolást (előtolási sebességet). A mért fellépő erőkomponensekből és a töretek vizsgálatából az alábbi következtetések vonhatók le:

- a törés bekövetkezése egy kritikus erő érték hatására történt ($F_e \sim 600 \dots 700 \text{ N}$)
- a törési tönkremenetelhez tartozó erőértékek, a végrehajtott kísérletek alapján, függetlenek a változtatott forgácsolási paraméterektől;
- az eltérő forgácsolási paraméterek növeléséből adódóan a B01-es jelű szerszám ~ 106.000 fordulatot, míg a B02-es szerszám közel a felét ~ 50.000 fordulatot tett meg forgácsolás során. A töretfelületek ettől függetlenül mindkét esetben lépcsősek voltak.
- a sztereomikroszkópos felvételekből megállapítható, hogy a töretek rideg törési jelleget mutatnak, a törés kiindulási pontjától hasonló lépcsős felépítéssel. A ridegtörés felületek geometriai jellemzői az elvégzett vizsgálatokból következően, nem függték a megmunkálásban eltöltött időtől, vagy az eltérő forgácsolási paraméterek változtatásától.
- a töretfelületek elektronmikroszkópos vizsgálata alapján megállapítható, hogy a finom szemcseszerkezetű porkohászati marószerszámok rideg törését nem belső hiba okozta.

5. SUMMARY

Two milling tools of the same type were loaded by changing different cutting parameters until fracture

failure. During the cutting experiments, the cutting depth was increased for one tool and the feed per tooth (feed speed) for the other tool. The following conclusions can be drawn from the measured force components and the fracture analysis:

- the fracture occurred under the influence of a critical force value ($F_e \sim 600 \dots 700$ N)

- the force values for fracture failure, based on the experiments performed, are independent of the changed cutting parameters;

- due to the increase of the different cutting parameters, the tool marked B01 made $\sim 106,000$ revolutions, while the tool B02 made almost half of the turns $\sim 50,000$ revolutions. The fracture surfaces, however, were stepped in both cases.

- from the stereomicroscopic images it can be stated that the fractures show a brittle fracture character, with similar a stepped structure at starting point of the fracture. The geometrical characteristics of the brittle fracture surfaces did not depend on the time spent in machining or on the change of different cutting parameters.

- on the basis of the electron microscopic examination of the fracture surfaces it can be established that the brittle fracture of the fine-grained powder metallurgy milling tools was not caused by internal defect.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A publikáció elkészítését a 2018-1.3.1-VKE-2018-00041 számú projekt támogatta. (Támogató: Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal, az NKFI alából megvalósuló projekt).

7. IRODALOMJEGYZÉK

[1] Lan, M. S., & Nærheim, Y. (1986). In-process detection of tool breakage in milling. doi.org/10.1115/1.3187063

[2] Altintas, Y., Yellowley, I., & Tlustý, J. (1988). The detection of tool breakage in milling operations. doi.org/10.1115/1.3187881

[3] Altintas, Y. (1992). Prediction of cutting forces and tool breakage in milling from feed drive current measurements. doi.org/10.1115/1.2900688

[4] Lee, J. M., Choi, D. K., Kim, J., & Chu, C. N. (1995). Real-time tool breakage monitoring for NC milling process. *CIRP annals*, 44(1), 59-62. [doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62275-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62275-6)

[5] Chen, J. C., & Chen, W. L. (1999). A tool breakage detection system using an accelerometer sensor. *Journal of Intelligent manufacturing*, 10(2), 187-197. doi.org/10.1023/A:1008980821787

[6] de Jesús, R. T. R., Gilberto, H. R., Iván, T. V., & Carlos, J. C. J. (2004). FPGA based on-line tool breakage detection system for CNC milling machines. *Mechatronics*, 14(4), 439-454. [doi.org/10.1016/S0957-4158\(03\)00069-2](https://doi.org/10.1016/S0957-4158(03)00069-2)

[7] Sevilla-Camacho, P. Y., Herrera-Ruiz, G., Robles-Ocampo, J. B., & Jáuregui-Correa, J. C. (2011). Tool breakage detection in CNC high-speed milling based in feed-motor current signals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(9-12), 1141-1148. doi.org/10.1007/s00170-010-2907-9

[8] Čuš, F., & Župerl, U. (2011). Real-Time Cutting Tool Condition Monitoring in Milling. *Strojnikski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 57(2). doi.org/10.55451sv-jme.2010.079

[9] Tansel, I., Trujillo, M., Nedbouyan, A., Velez, C., Bao, W. Y., Arkan, T. T., & Tansel, B. (1998). Micro-end-milling—III. Wear estimation and tool breakage detection using acoustic emission signals. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(12), 1449-1466. [doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00017-0](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00017-0)

[10] Cao, H., Chen, X., Zi, Y., Ding, F., Chen, H., Tan, J., & He, Z. (2008). End milling tool breakage detection using lifting scheme and Mahalanobis distance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(2), 141-151. doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.09.001

[11] Sun, S., Hu, X., Cai, W., & Zhong, J. (2019). Tool breakage detection of milling cutter insert based on SVM. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1549-1554. doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.420

[12] Sun, S., Hu, X., & Zhang, W. (2020). Detection of tool breakage during milling process through acoustic emission. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(5), 1409-1418. doi.org/10.1007/s00170-020-05751-7

[13] Chen, J. C., & Black, J. T. (1997). A fuzzy-nets in-process (FNIP) system for tool-breakage monitoring in end-milling operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(6), 783-800. [doi.org/10.1016/S0890-6955\(96\)00023-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00023-5)

[14] Chen, J. C. (2000). An effective fuzzy-nets training scheme for monitoring tool breakage. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11(1), 85-101. doi.org/10.1023/A:1008908309585

[15] Cuka, B., & Kim, D. W. (2017). Fuzzy logic based tool condition monitoring for end-milling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 47(C), 22-36. doi.org/10.1016/j.rcim.2016.12.009

[16] Li, G., Yang, X., Chen, D., Song, A., Fang, Y., & Zhou, J. (2018, July). Tool breakage detection using deep learning. In *2018 IEEE International Conference on Big Data, Cloud Computing, Data Science & Engineering (BCD)* (pp. 37-42). IEEE. doi.org/10.1109/BCD2018.2018.00014