

ERŐMÉRŐ RENDSZER TERVEZÉSE, KIVITELEZÉSE ÉS ADAPTÁCIÓJA FINOM ESZTERGÁLÁSKOR FELLÉPŐ KIS ERŐK MÉRÉSÉHEZ

DESIGNING, MAKING AND ADAPTING A DYNAMOMETER SYSTEM TO MEASURE SMALL FORCES FORMING DURING FINE TURNING

Horváth Richárd*, Pálinkás Tibor**, Mátyási Gyula***

ABSTRACT

In cutting researches the knowledge of the spatial force system of cutting processes is important. Therefore measuring the generated forces of cutting processes is recommended. Measuring the generated forces during fine cutting precisely is difficult. The authors of this paper show the development of a special dynamometer system created to measure the "small forces" (0 ... 100 N) generating during fine cutting. The importance and the areas of using a special dynamometer system are described after the calibration of the dynamometer is shown to.

1. BEVEZETÉS

Forgácsolási folyamatoknál a fellépő erők ismerete (mérése) alapvető követelmény, hiszen a keletkezett erőknek közvetlen befolyása van a forgácsolás közben keletkező hőre, a szerszámkopásra, a megmunkált felületek pontosságára, érdességére, rezgésre, felhasznált energiára stb. Illetve a technológiatervezésben, szerszámválasztásnál (méretezésnél) ezt figyelembe kell venni. A forgácsoló erő számításának számos módszere terjedt el, bár ezek (általában) csak szűk tartományban érvényesek és meghatározott szerszám munkadarab párosításra. Ezért ha pontosan szeretnénk tudni a keletkező erőket (nem elterjedt szerszámanyag, munkadarabanyag párosításnál), akkor a legkézenfekvőbb a forgácsoló erő mérése. Számos kutató foglalkozott forgácsoló erőméréssel és annak kiértékelésével.

MDN-250-es acél kerámia szerszámmal történő esztergálását kutatta D.I. Lalwani [1]. Kísérletterv segítségével kutatást végzett CBN szerszámmal Hamdi Aouchi et al. [2], illetve C45-ös acél esztergálását kutatta G. CUKOR et al. [3], valamint száraz, fűlszáraz

(nedves) és MQL körülmények közötti esztergálást kutatott keményfém szerszámmal AISI1045-ös anyagon Young Kug Hwang [4]. Gyémánt szerszámmal kövek forgácsolását vizsgálta W. Polini [5], és részletesen foglalkozott a forgácsolási paraméterek és a forgácsolási erő összefüggésével. Mindegyik kutatás foglalkozott a forgácsolás, esztergálás közben fellépő erőkkel annak vizsgálatával, jól illeszkedő és könnyen használható empirikus képleteket állítottak fel a mért erő komponensekre. Süleyman Yaldiz [6] nyúlásmérős erőmérőt tervezett és kivitelezett, illetve bemutatta annak statikus és dinamikus kalibrálását, lehetséges felhasználási területeit. Másik publikációjukban bemutatták a tervezett erőmérő eredményeit homlokmarás vizsgálatokkor [7]. Oliver Mack [8] a piezoeleven működő erőmérők tulajdonságait kutatta.

Kimondható, hogy kevesen foglalkoznak erőmérő tervezéssel illetve annak adaptációjával, hogy a mérendő folyamathoz (nagyoló/simító) megmunkálás, esztergálás, marás, köszörülés, stb.) a legjobban illeszkedő erőmérő rendszert használják. Köztudott, hogy egészen más nagyságrendű pl.: simító/nagyoló megmunkálás erőigénye, illetve különböző a térbeli erőrendszere különböző forgácsolási eljárásoknak (pl.: esztergálás, marás, fűrés, köszörülés, gyalulás, vésés, stb.) Ezért a megfelelően pontos, és a fellépő erők nagyságrendjéhez igazodó mérési módszer és elrendezés miatt célszerű a mérendő technológiához fejleszteni majd adaptálni az erőmérő rendszert.

Ebben a cikkben a szerzők bemutatják egy három komponenses erőmérő tervezését és kivitelezését (kimondottan „kis”, 0 ... 100 N-os erők, mérésére, finomesztergálás körülményei között). Kitérnek az erőmérővel szemben támasztott követelményekre, annak kalibrációjára, végül bemutatják az elért eredményeket és annak használatával a jövőbeni célokat.

* tanársegéd, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki kar, e-mail: horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu

** műszerfejlesztő, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki kar, e-mail: palinkas.tibor@uni-obuda.hu

*** egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem e-mail: matyasi@manuf.bme.hu

2. ESZTERGÁLÁSKOR FELLÉPŐ ERŐK MÉRÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

2.1. Nyúlásmérő bélyeges erőmérők

Az esztergálás során fellépő forgácsoló erők méréséhez alkalmazható mérőjel-átalakítóként beváltak és elterjedtek a nyúlásmérő bélyegek. Ezekkel alapvetően kétféle mérési elrendezés valósítható meg. A legegyszerűbb módszer szerint a készszárra ragasztják fel a nyúlásmérő bélyegeket. Többnyire csak a főforgácsoló erőt mérik, ami a készszár függőleges síkban történő deformációját, (lehajlását) okozza. A méréshez a készszárának alsó (nyomott) és felső (húzott) szálakat megtestesítő síkjára 1-1 bélyeget ragasztanak, amelyeket félhídba kapcsolnak. A híd másik felét precíziós, nagy stabilitású ellenállások képezik, amelyek a mérőegységhez csatlakoztatott jelkondicionáló áramkör bemenetének „túloldalán” vannak, és megkapják a stabilizált hídátfeszültséget is.

Kis erők méréséhez jól alkalmazható ez a módszer, mert a simító forgácsolási paraméterek mellett nem várható jelentős hőmérsékletingadozások a készszárban. A hajlított rugóként is értelmezhető készszár többnyire nemesített acélból készül, ami kis hiszterézisű rugókarakterisztikával rendelkezik. A csekély mértékű deformációnak köszönhetően a forgácsolóerő hatására történő μm -es nagyságrendű erő/lehajlás karakterisztika lineárisnak tekinthető.

PTFE esztergálási kísérletei közben fellépő, viszonylag csekély főforgácsolóerők mérésére mutat be konkrét példát a fenti módszerrel Catalin Fetecau [9]. A 150 N maximális erőre kalibrált rendszer érdekessége, hogy a tényleges erőmérésben egyetlen, a szerszám csúcsától 22 mm-re a nyomott oldalra felragasztott nyúlásmérő bélyeg vesz részt. A félhíd másik bélyegét a semleges szárra (a készszár egyik függőleges síkjára) ragasztották fel, szerepe csupán a hőfokkompenzálás. Jelkondicionálóként és intelligens adatgyűjtőként egy PC-hez illesztett SPIDER 8 készüléket használtak.

A másik elterjedt elrendezés szerint a szerszámbefogót erőmérő asztal közbeiktatásával erősítik fel az esztergagép szánrendszerére. Egy gondosan kimunkált, saját fejlesztésű nyúlásmérőbélyeges erőmérő asztalt ismertet Süleyman Yaldiz [7]. A négykomponenses (három erőkomponens és egy forgatónyomaték) asztal két, viszonylag nagy tömegű, párhuzamos lapja közé 4 db nyolcszögletű rugózó gyűrűt építettek be, megfelelően elrendezve. A konstrukció kialakítása során arra törekedtek, hogy a mért jellemzők egymásra hatása minél kisebb legyen, ill. minél csekélyebb mértékben befolyásolják azokat az erők támadáspontjának koordinátái. Az összesen 16 db bélyeget ezen rugókra ragasztották fel. Ezt mérési kísérletekhez használták a hagyományos, vízszintes elrendezésben úgy, hogy a munkadarabot a mérőasztal felső síkjára fogták fel. Ugyanezen szerzők egy teljesen hasonló konstrukciójú „szendvicset” a szokástól

eltérően függőlegesen építették be a késbefogó és a készszár közé, esztergálási kísérletekhez [6].

Bár a többkomponenses erő (-és nyomaték-mérő) asztalok konstrukciója jóval bonyolultabb a készszár erőmérő rugóként is kihasználó módszereknél, de ezek mindhárom erőkomponens mérésére alkalmasak úgy, hogy a kereszterézékenység (az egyes erőkomponensek egymásra hatása) tized százalékos nagyságrendben (gyakorlati szempontból elhanyagolható) marad. A publikált vizsgálati adatok azt mutatják, hogy szintén tized százalékos nagyságrendű (erőmérésnél elhanyagolható) eltéréseket okoz a szerszámcsúcs helyzetének megváltozása.

A nagy tömegű „asztallap” és a gyűrűk kis rugómerevsége igen alacsony rezonanciafrekvenciát eredményezett, így a tapasztalatok szerint a mérőrendszer dinamikus tulajdonságai nem befolyásolták érdemben a mérési eredményeket. A bélyegek – megfelelő kombinációban összekapcsolva – négy (vagy ha csak erőmérésre kötik be, akkor három) Wheatstone-hidat képeznek, amelyeket PC-hez illesztett Advantech ADAM 3016 DAQ-hoz csatlakoztattak.

2.2. Piezoelektromos elven működő erőmérés lehetősége

A piezoelektromos erőmérő cellák működése egyes kristályos anyagok (az ipari gyakorlatban többnyire SiO_2 kvarckristályok), ill. kerámiák azon tulajdonságán alapul, hogy azokon mechanikai deformáció (erőhatás) következtében töltésátrendeződés megy végbe, miáltal pl. két párhuzamos felületük között villamos feszültség keletkezik. (A fordítottja is igaz: feszültséget kapcsolva az ilyen kristályra, az deformálódik.) A deformáció jellege attól függ, hogy a lemezt – mert a mérőcellákba vékony lemezek formájában építik be a kvarcot – a kristálytani tengelyekhez viszonyítva milyen orientációval vágják ki az eredeti kristályból. Az erőmérő cellákban általában nyomó- ill. nyírólapkák találhatóak. A rajtuk keletkező feszültség, ill. töltésmennyiség széles tartományban egyenesen arányos a gerjesztő erővel.

A kvarclapka belsőellenállása rendkívül nagy, így nem csak a hozzá kapcsolt jelkondicionáló áramkör bemenetével szemben támaszt komoly követelményeket (pl. 10^{12} A nagyságrendű bemeneti áram) de a cellát az erősítővel összekapcsoló csatlakozóknak, árnyékolt kábeleknak is különleges minőségűeknek kell lenniük.

A forgácsolás közben dinamikus jelenségek játszódnak le, az erők jelentősen ingadoznak, ezért a lapkákon is váltakozó polaritású töltés keletkezik. Mivel az árnyékolt kábel önkapacitása és a jelkondicionáló erősítő bemenetének szórt kapacitásai váltakozófeszültségű szempontból a cellát sőtölnék, az ipari mérés technikában nem feszültségerősítőket, hanem a negatív visszacsatoló ágban kapacitív tagot tartalmazó töltéserősítőket alkalmazunk. Ezzel a kábelkapacitás, a

cellakapacitás és a szórt kapacitások hatása gyakorlatilag kiküszöbölhető.

Azonban a töltéserősítőknek sem végtelen a bemeneti ellenállása. A cellában felhalmozott töltés előbb-utóbb elszivárog. Rontja a helyzetet a szerelt kábel (főleg az elszennyeződött csatlakozók) szivárgása. Hogy ez mennyi idő alatt történik meg, az erősítő időállandójától függ. A gyártók általában ez alatt azt a minimális mérési időt értik, ami alatt az erősítő kimenőfeszültsége a kezdeti érték 99%-ára csökken.

A különböző mérési feladatokhoz különböző időállandók alkalmasak. A gyártók általában háromfélét (Short, Medium, Long) definiálnak, ill. a műszer előlapi kapcsolójával ezek közül lehet választani.

Az áramköri elemek – ezek közül is leginkább a FET-ek, FET-bemenetű műveleti erősítők – paramétereinek szórásából adódóan ezek az időtartamok csak nagyon nagy szórással definiálhatók. Például a KISTLER töltéserősítőinél Long állásban az időállandó $1000 \dots 100\,000$ s. Ezzel a piezocella kvázistatikus erőmérésre alkalmas. Az önálló mérőerősítők kalibrált feszültségelet biztosítanak a kisimpedanciás kimenetükön. Az erőmérő cellákat a gyártók egyenként hitelesítik, a mellékelt protokollban megadva a töltésérzékenységet is, többnyire pC/N -ban. A cella illesztése során a mérőerősítő megfelelő kezelőelemeivel ezt kell beállítani, illetve a korszerű jelkondicionáló egységek esetén numerikusan beadni. Így V/N -ban kalibrált mérőjel-átalakító láncot kapunk.

3. ERŐMÉRŐ TERVEZÉSE ÉS KIVITELEZÉSE

A szerzők az előbbi lehetőségek közül a piezoelektromos elven működő erőmérő cella tervezését és applikációját választották. Bár mind a piezoelektromos és mind a nyúlásmérő bélyeges erőmérőknek vannak előnyei és hátrányai, ebben az esetben a merevség (lényegesen kisebb deformáció) és a viszonylag gyors megépíthetőség volt a választás indoka.

3.1. Erőmérővel szemben támasztott követelmények

A forgácsoló és a fajlagos forgácsoló erő ismerete a különböző forgácsoló technológiáknál, a különböző szerszám és forgácsolandó anyagoknál fontos. Ennek egzakt meghatározására a legcélszerűbb a forgácsoló erő (vagy azok komponenseinek) mérése. A szerzők által készített forgácsoló erőmérővel szemben támasztott követelmények a következők:

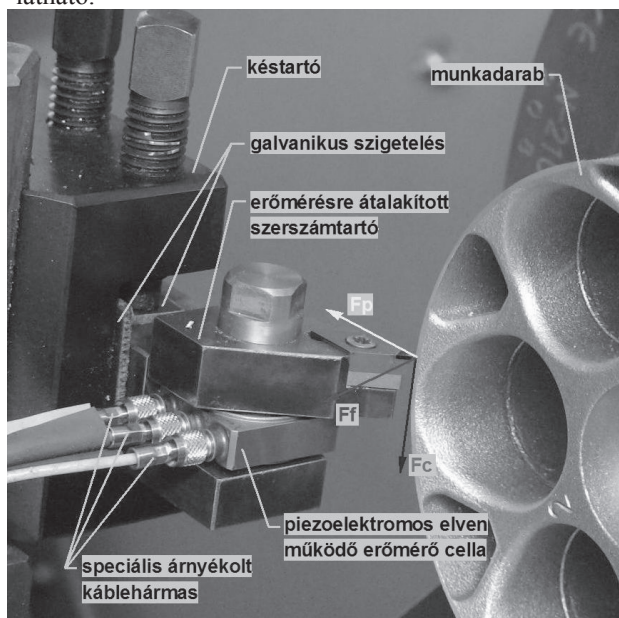
- képes legyen finom esztergálás közbeni kis erők korrekt mérésére (0 ... 100 N) tized newtonos pontossággal.

- mindhárom erőkomponens mérésére legyen képes valós időben (F_c – főforgácsoló erő, F_f – elötölő erő, F_p – passzív erő).
- könnyen, gyorsan legyen elkészíthető.
- a szerszámbe fogóban való rögzítése ne legyen bonyolultabb, mint egy készzáré.
- a konstrukció előzze meg a drága mérőcella esetleges sérülésekből adódó meghibásodását.

3.2. Erőmérő tervezése simító esztergálásnál fellépő kis erőkre

Jelen kísérlethez a szerzők egy KISTLER 9251A, 3D-s gyűrűcellát alkalmaztak. Az ilyen fajta piezoelektromos erőmérő cellák jellemzője, hogy a merevségük megegyezik egy ugyanolyan geometriájú, nagy szilárdságú acélalkatrész merevségével, így utólagos beépítés esetén (illetés a megfelelő forgácsoló technológiához) nem romlanak lényegesen az átalakított objektum mechanikai tulajdonságai. A cellában gyűrű alakú elemek fészkeiben kis körtárcsa alakú kvarclemezek helyezkednek el, speciális, kötéssel rögzítve az erőátadó felületekhez. Az F_z (jelen alkalmazásban F_c - főforgácsoló erőt) érzékelő kvarctárcsák nyomóerőre, a többi tárcsa F_x , ill. F_y (F_f - elötölés irányú erő, illetve F_p - passzív erő) irányú nyíróerőre érzékeny. A cella kellően kis méretű ahhoz, hogy egy készzárbá is beépíthessük.

Az erőmérő kést egy SDJCR 2525M 11 típusú szabványos készzárból lett kialakítva, amelybe a vizsgálat alá vont lapkákat lehet befogni (DCGW 11T304). A megvalósított szerkezet fotója a 1. ábrán látható.



1. ábra A megvalósított erőmérő rendszer

A beépítés úgy terveztük meg, hogy a lehetőségekhez képest megfeleljen a KISTLER által (erőmérő cella

beépítésére vonatkozó adatlap) javasolt elrendezésnek. A csavar egyedi, $M8 \times 1$ -es, nemesített acélból készült. Szerkezeti okból a szerszám (lapka) csúcsa a cella tengelyére nézve külpontos elhelyezkedésű, miáltal az előtolás irányú erő (F_f) a csavar tengelyére nézve is létesít forgatónyomatékat. Ezt kizárólag a késszár és a cella egymáshoz szorított felületei között fellépő súrlódás ellensúlyozza, ezért a szorítócsavar (erőmérő cella beépítésére vonatkozó adatlap) javasolta 25 kN erővel lett előfeszítve.

A konstrukció olyan kialakítású, hogy az esetleges veszélyes nagyságú előtoló erő esetén (F_f) is legfeljebb a lapka sérül, mert sem a cella, sem a lapkabefogó fej nem tud $1-2^\circ$ -nál jobban elfordulni. A hátsó hézag ennyit engedélyez, mielőtt az elforduló alkatrész a késszáron felütközne. Ez a beépített cella pl.: egy KISTLER 5019 Multichannel Charge Amplifier, háromcsatornás töltéserősítőhöz csatlakoztatható (speciális árnyékolt kábelhármason keresztül).

A műszer IEE-488 és RS-232 illesztőfelülettel is rendelkezik. A PC-hez legegyszerűbb ez utóbbin keresztül hozzákapcsolni. DynoWare szoftverrel lehet az erőregisztrátumokat kiértékelni.

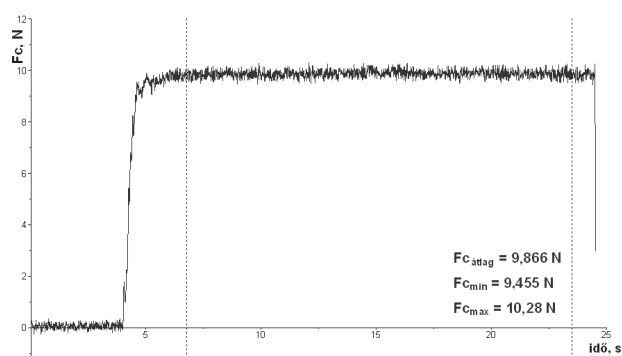
Célszerű a földhurkot lehetőleg csökkenteni pl. úgy, hogy az erőmérő késszárát vékony textilbakelit lapokkal galvanikusan elszigeteljük a földpotenciálon levő a késtartótól.

4. ERŐMÉRŐ KALIBRÁLÁSA

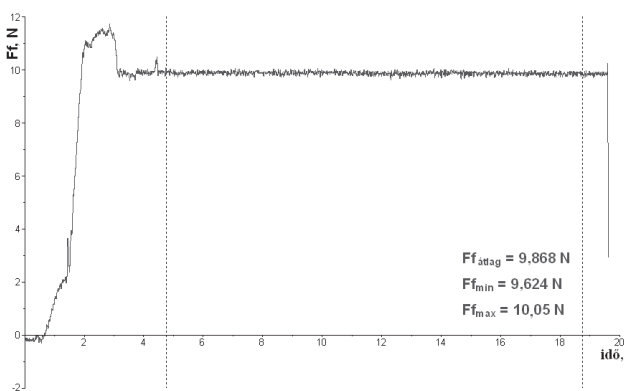
Mivel a tervezett erőmérő kis erők mérésére szolgál, ezért ebben a tartományban kellett elvégezni annak kalibrálását is. Ez a fejezet az F_c – főforgácsoló erő, és F_f – előtoló erő, és F_p – passzív erő komponensek kalibrálását és a mérési pontosság javítása miatt azok kompenzációját mutatja be.

4.1. Érzékenység beállítása

A forgácsoló erő támadáspontja a szerszám csúcsában van. Ez egy külpontos terhelést jelent az erőmérő cellára nézve. Például 1007 g terhelésnél $9,88 \text{ N}$ -t mint elméleti értéket kellene mérnie. Ezért iterációs módszerrel először be kellett állítani az erőmérő érzékenységét. Rövid ideig tartó terhelésnél a mért F_c átlag értéke $9,866 \text{ N}$, míg a mért F_f átlag értéke $9,868 \text{ N}$ volt (hasonlóan az F_p értéke is). Az 2. ábra mutatja ezeket az eredményeket, és jól látható hogy ezt az elméleti értékekhez közeli eredményt viszonylag kis ingadozással teljesíti az erőmérő.



a) F_c erőkomponens értékei 1007 g terhelésnél



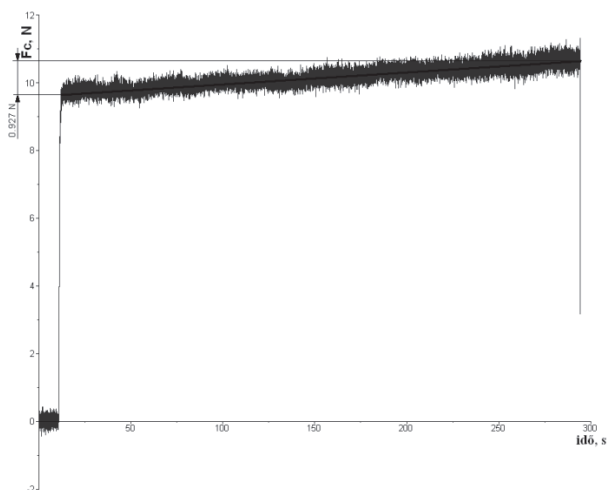
b) F_f erőkomponens értékei 1007 g terhelésnél
2. ábra Az erőmérő ellenőrzése az érzékenységek meghatározása után

Az 2. ábrán is látható értékekhez tartozó (és beállítandó érzékenységek a következők):

- F_c érzékenysége: $-3,463 \text{ pC/N}$
- F_f érzékenysége: $-7,47 \text{ pC/N}$
- F_p érzékenysége: $-7,05 \text{ pC/N}$

4.2. Ellenőrzés az idő függvényében

Bár a gyakorlatban általában nincs szükség hosszantartó folyamatos erőmérésre (inkább a szerszám éltartama során meghatározott időközönkénti rövid idejű regisztrátumokra), mégis célszerű megvizsgálni (a piezó sajátos jellemzője a töltődés miatt) a mért erő változását az idő függvényében. Az 3. ábra 1007g -os terhelést mutat 300 másodpercig F_c irányú erőmérés közben.



3. ábra F_c változása az idő függvényében ($m = 1007$ g)

A 3. ábrán jól látható, hogy 300 s alatt az 1007 g tömeg mérése közben az öntöltődés hatására az erőnövekedés lineárisnak tekinthető, és nem haladja meg az 1 N értéket. Ezt a csekély erőváltozást az idő függvényében szoftveres úton könnyen lehet kompenzálni, illetve rövid ideig tartó mérésnél gyakorlatilag elhanyagolható.

4.3. Ellenőrzés és korrekció a méréstartományban

A tervezett méréstartományon belül ellenőriztük az erőmérőt. Az 1., 2. és 3. táblázat tartalmazza az F_c , F_f és F_p irányú erő ellenőrzését, és eltérését az elméleti értékhez képest.

1. táblázat F_c erőkomponens ellenőrzésének és korrekciójának adatai

Terhelés, g	$F_{c,elméleti}$, N	$F_{c,mért}$, N (1. mérés)	$F_{c,mért}$, N (2. mérés)	$F_{c,mért}$, N (3. mérés)	$F_{c,mért}$ átlag, N	$F_{c,szórás}$	hiba, N	hiba, %	$F_{c,korrigált}$, N	korrigálás utáni hiba, %
1007	9,88	9,87	9,82	10,17	9,953	0,189	0,075	0,756	9,94	0,645
1529	15,00	14,69	14,72	14,79	14,733	0,051	-0,266	-1,774	14,79	-1,415
2006	19,68	19,67	19,75	19,75	19,723	0,046	0,044	0,226	19,86	0,916
3050	29,92	29,48	29,58	29,57	29,543	0,055	-0,377	-1,261	29,86	-0,195
5080	49,83	49,28	49,29	48,89	49,153	0,228	-0,681	-1,367	49,79	-0,097
8093	79,39	78,58	79,23	78,97	78,927	0,327	-0,466	-0,587	79,30	-0,120
10200	100,06	100,9	100,6	101,1	100,867	0,252	0,805	0,804	99,91	-0,156

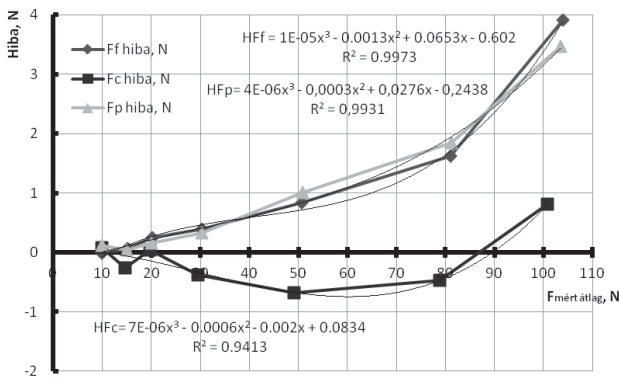
2. táblázat F_f erőkomponens ellenőrzésének és korrekciójának adatai

Terhelés, g	$F_{f,elméleti}$, N	$F_{f,mért}$, N (1. mérés)	$F_{f,mért}$, N (2. mérés)	$F_{f,mért}$, N (3. mérés)	$F_{f,mért}$ átlag, N	$F_{f,szórás}$	hiba, N	hiba, %	$F_{f,korrigált}$, N	korrigálás utáni hiba, %
1007	9,88	9,87	9,87	9,87	9,870	0	-0,01	-0,088	9,94	0,667
1529	15,00	15,09	15,04	15,08	15,070	0,026	0,07	0,470	14,95	-0,337
2030	19,91	20,17	20,15	20,18	20,167	0,015	0,25	1,267	19,90	-0,079
3050	29,92	30,34	30,31	30,29	30,313	0,025	0,39	1,313	29,85	-0,229
5080	49,83	50,67	50,67	50,66	50,667	0,006	0,83	1,669	50,00	0,325
8093	79,39	81,04	81,02	81	81,020	0,020	1,63	2,050	79,55	0,194
10200	100,06	104	103,9	104	103,967	0,058	3,90	3,902	100,59	0,531

3. táblázat F_p erőkomponens ellenőrzésének és korrekciójának adatai

Terhelés, g	$F_{p,elméleti}$, N	$F_{p,mért}$, N (1. mérés)	$F_{p,mért}$, N (2. mérés)	$F_{p,mért}$, N (3. mérés)	$F_{p,mért}$ átlag, N	$F_{p,szórás}$	hiba, N	hiba, %	$F_{p,korrigált}$, N	korrigálás utáni hiba, %
1007	9,88	9,89	10,02	10,08	9,997	0,097	0,118	1,194	9,99	1,132
1529	15,00	15,12	15,02	14,97	15,037	0,076	0,037	0,248	14,92	-0,532
2030	19,91	20,16	20,02	20,02	20,067	0,081	0,152	0,765	19,85	-0,347
3050	29,92	30,32	30,24	30,2	30,253	0,061	0,333	1,112	29,83	-0,316
5080	49,83	50,42	51,14	50,96	50,840	0,375	1,005	2,017	49,93	0,192
8093	79,39	81,25	81,05	81,4	81,233	0,176	1,841	2,319	79,07	-0,405
10200	100,06	103,3	103,7	103,6	103,533	0,208	3,471	3,469	99,70	-0,366

Az 4. ábra mutatja a mérési pontokban (F_c , F_f és F_p irányú erőkomponenseknél) az eltérést az elméleti értékhez képest. Ezek az úgynevezett hibagörbék.



4. ábra F_c , F_f és F_p erőkomponensek hibagörbéje a tervezett mérésstartományban

A 4. ábrán látható hibagörbéket harmadfokú polinomokkal megfelelő korrelációval le lehet írni, így ezzel kompenzálni (és még pontosabbá tenni) a mért értéket. Ebből adódóan a valós erő komponensek a következő módon számíthatók:

$$F_c = F_{c_{m\acute{e}rt}} - HF_c \quad (1)$$

$$F_f = F_{f_{m\acute{e}rt}} - HF_f \quad (2)$$

$$F_p = F_{p_{m\acute{e}rt}} - HF_p \quad (3)$$

ahol EF_c , EF_f és EF_p a három erőkomponens hibagörbéjét leíró (mint korrekciós tag) egyenlet:

$$HF_c = 7 \cdot 10^{-6} x^3 - 0,0006x^2 - 0,002x + 0,0834 \quad (4)$$

$(R^2=0,9413)$

$$HF_f = 1 \cdot 10^{-5} x^3 - 0,0013x^2 + 0,0653x - 0,602 \quad (5)$$

$(R^2=0,9973)$

$$HF_p = 4 \cdot 10^{-6} x^3 - 0,0003x^2 + 0,0276x - 0,2438 \quad (6)$$

$(R^2=0,9931)$

A hibagörbével kompenzált értékek százalékos eltérésein jól látszik (1., 2., 3. táblázat), hogy lényegesen kisebbek, mint a kompenzálás nélküli értékeké.

A mérésstartományon belül a mért érték és a valódi érték közötti eltérés F_c erőkomponens esetén: a legkisebb eltérés $-0,097\%$ a legnagyobb eltérés $-1,415\%$, míg az F_f irányú erőkomponens estén a legkisebb eltérés $-0,079\%$ a legnagyobb eltérés pedig $0,667\%$. F_p irányú erőkomponensnél pedig a legkisebb eltérés $0,192\%$ a legnagyobb eltérés $1,132\%$.

5. KONKLÚZIÓ

A szerzők ebben a cikkben egy könnyen reprodukálható forgácsolás közbeni kis erők – pl.: finomsztergálás – mérésére ($0 \dots 100 \text{ N}$) alkalmas erőmérő rendszert tervezését mutatták be. Rávilágítanak az erő mérésének lehetőségeire, módszereire. Ismertetik azok előnyeit, hátrányait. Definiálták a tervezett erőmérő rendszerrel szemben támasztott

követelményeket. Majd a tervezett mérés tartományban kalibrálták azt.

Felvették mindhárom mérendő erőkomponens hibagörbéjét. Ezután felállítottak három kompenzációs összefüggést mellyel megfelelő pontosságúvá lehet tenni (korrigálni) az erőmérést.

Olyan komplex erőmérő rendszert alkottak, mellyel tized newtonos pontossággal vizsgálhatóak a finom esztergálás közbeni erőtani folyamatok. Pontosabban feltérképezhetőek a forgácsoló erőt befolyásoló tényezők (pl.: technológiai beállítások, szerszám geometria, éllekerekedés, szerszámanyag munkadarab párosítás stb.), illetve tovább (pontosabban) vizsgálható a fajlagos forgácsoló erő viselkedése ilyen technológiáknál.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. (TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások).

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] D.I. Lalwani, N.K. Mehta, P.K. Jain: Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel, *Journal of materials processing technology* 206 (2008) 167–179
- [2] Hamadi Aouici, Mohamed Athmane Yallese, Kamel Chaoui, Tarek Mabrouki, Jean-François Rigal: Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization, *Measurement* 45 (2012) 344–353
- [3] G. Cukor, Z. Jurkovic, M. Sekulic: Rotatable central composite design of experiments versus taguchi method in the optimization of turning, *Metalurgija* 50 (2011) 1, 17–20
- [4] Young Kug Hwang, Choon Man Lee: Surface roughness and cutting force prediction in MQL and wet turning process of AISI 1045 using design of experiments, *Journal of Mechanical Science and Technology* 24 (8) (2010) 1669–1677
- [5] W. Polini, S. Turchetta: Force and specific energy in stone cutting by diamond mill, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44 (2004) 1189–1196
- [6] Süleyman Yaldız, Faruk Ünsacar: A dynamometer design for measurement the cutting forces on turning, *Measurement* 39 (2006) 80–89
- [7] Süleyman Yaldız, Faruk Ünsacar, Hacı Sağlam, Hakan Isik: Design, development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque, *Mechanical Systems and Signal Processing* 21 (2007) 1499–1511
- [8] Oliver Mack: Investigations of piezoelectric force measuring devices for use in legal weighing metrology *Measurement* 40 (2007) 746–753
- [9] Catalin Fetecau, Felicia Stan: Study of cutting force and surface roughness in the turning of polytetrafluoroethylene composites with a polycrystalline diamond tool, *Measurement* 45 (2012) 1367–1379