

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Kandó Kálmán Doktori Iskola

**Összetett szerkezetű járműanyagok (hibridek,
kompozitok) határfelületei megmunkálási
folyamatainak korszerű technológiai diagnosztikája**

TÉZISFÜZET

Doktori értekezés a Ph.D. fokozat megszerzésére

Készítette:
Dömötör Ferenc
Okleveles gépészmérnök

Témavezető:
Dr. Takács János
egyetemi tanár

Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék
Budapest, 2013.

Bevezetés

A járműipari fejlesztések egyik legfontosabb területe manapság a különböző hibrid, ill. kompozit anyagok alkalmazása. Az élenjáró autógyárak sorra számolnak be az új anyagoknak az autógyártásban való felhasználásáról. **Hibrid anyagnak** nevezik egy szerkezeti egységen belül többféle anyag alkalmazását abból a célból, hogy előnyös tulajdonságaikat minél hatékonyabban lehessen hasznosítani. Általánosságban **kompozit anyagnak** nevezik azokat az anyagtársításokat, más néven összetett anyagokat, melyek legalább egy befoglaló anyagból és egy erősítő anyagból állnak. **Hibrid-kompozit anyagnak** nevezik a többféle teherviselő, és egyidejűleg ugyancsak többféle alapanyagból (mátrix) álló anyagokat.

A hibrid és kompozit anyagok forgácsoló megmunkálásakor különböző összetevőket egy időben kell megmunkálni. Hibrid anyagok forgácsolásakor a jelenségek makroszkopikus jellegűek, mert a hibridek anyagai makroszkopikus elrendezésben okoznak anyagtulajdonság eltéréseket, melyek a dinamikai jellemzők, a hőtechnikai jelenségek, valamint a pontosság tekintetében is kihatással lehetnek a forgácsoló megmunkálással előállított darabok minőségére. Ezeket a változó körülményeket és azok hatását a megmunkálásra, a darabok minőségére viszonylag kevés irodalom tárgyalja, ezért e dolgozat ezen a területen szeretne néhány kérdésben pontosításokat meghatározni.

Az irodalom összefoglalása

A célkitűzésnek megfelelően az irodalomkutatást témák szerint végeztem el:

- A forgácsoló megmunkálás állapotfelügyelete, diagnosztikája,
- Szerszámgépek, forgácsoló szerszámok rezgései (rezgésvizsgálata),
- A forgácsolás további jellemzőinek (erő, hőmérséklet) vizsgálata,
- A megmunkált felület alakhúsége, méretpontossága, felületminősége,
- Hibrid és kompozit anyagok forgácsolása, határátmenetek vizsgálata,
- Komplex vizsgálatok.

Az irodalom feldolgozása alapján állítottam össze a T2.1 táblázatot, amely a különböző munkákról, azok komplexitásáról ad áttekintést. (A teljes táblázat 2.1 jelöléssel a dolgozatban található.) A táblázatból kiolvasható, hogy a különböző hibrid/kompozit anyagokra nem készült teljes komplexitású vizsgálat, amely az egyes vizsgálati technikák előnyös vagy hátrányos jellemzőinek megismerését segítené.

Az irodalom feldolgozásából az is megállapítható, hogy kompozitok esetén a szálak elrendezésének, eloszlásainak hatása a forgácsolási dinamikára a makró tartományban kevésbé mutat karakteres tulajdonságokat. Ezért a dolgozati célkitűzések közé a makroszkopikusan és dinamikailag karakteresebb hibrid anyagok vizsgálatára szeretnék fókuszálni.

T2.1 táblázat

Szerzők (ld. irodalom jegyzék)	Vizsg. célja	Vizsgált anyagok	Vizsgálati módszerek					
			Forg. erő	Forg. para- méterek	Rezgés, zaj, akusztikus emisszió	Hőmérséklet	Nagy sebességű kamera	Alakhűség, felületi érdesség
[F33.01-1989]	szerszám kopás	acél	igen		igen			
[F4.19-1999]	ipari alkalmazás	bolygókeres hajtómű			igen	igen		
[F5.32-2002]	szereleési pontosság	erőmérő cellák	igen		igen			
[F5.27-2004]	marás	öntött vas	igen		igen			
[F6.14-2006]	szerszám és munkadarab	szimuláció	igen			igen		
[F6.17-2008]	marás	ipari robot	igen		igen			
[F5.72-2008]	monitoring	elmélet			igen	igen		igen
[F5.41-2008]	forgács képződés	titán ötvözet	igen				igen	
[F7.03-2009]	esztergálás	acél	igen	igen				igen
[F7.05-2010]	szerszám kopás	acél		igen	igen	igen		
[F5.51-2010]	forg. paraméterek	kompozit	igen	igen				
[F3.26-2010]	szerszám gép	szoftver	igen			igen		
[F5.54-2010]	marás	marógép	igen	igen				
[F6.24-2012]	forgácsolás	WINalyse			igen		igen	
[F9.05-xxxx]	felületi érdesség	MATLAB			igen			igen

A kutatás célkitűzése

A doktori értekezés célja hibrid modell anyagokon a

- forgácsoló erő vizsgálata Kistler erőmérő cellával, adatfeldolgozás Matlab szoftverrel,
- rezgésvizsgálat többféle módszerrel és műszerrel (DLI, CSI, SKF, Brüel & Kjaer),
- a különféle paraméterekkel mért rezgések, valamint a kereskedelemben kapható, különböző poszt-processziós rezgésmérési eljárások összehasonlítása a forgácsolási paraméterek megfigyelhetősége szempontjából,
- hőkamerával, és gyorskamerával a forgácsolási folyamatok nyomon követése,
- geometriai (alakhűség), és felületminőségi (érdesség) vizsgálatok a forgácsolás után.

Mindezen vizsgálatok összehangolt célja a hibrid anyagok megmunkálásának jobb megismerése, és annak a kérdésnek a megválaszolása, hogy a komplex vizsgálatok alapján, azoknál egyszerűbb, olcsóbb vizsgálatok alkalmasak lehetnek-e a folyamat hatékony állapotfelügyeletére.

A kutatások célja tehát annak kiderítése, hogy a nagybonyolultságú integrált mérőrendszerbe illesztett rezgésanalízis alapján alkalmazható-e egy viszonylag egyszerűbb és várhatóan olcsóbb módszer az eljárás minőségi paramétereiben bekövetkező változások kimutatására. Ennek alapján jelzést lehet adni ugyanis a szükséges beavatkozásra, amikor cserélni kell a forgácsoló szerszámot, illetve változtatni kell a technológián.

A kísérleti eredmények kiértékeléséhez a mérőrendszerek saját szoftverein kívül

- a forgácsoló erő vizsgálatához egy MATLAB környezetben írt saját kiértékelő programot, míg
- a korrelációs erősségek meghatározásához pedig az EXCEL szoftver korrelációs szolgáltatását tervezem használni.

A kutatási célkitűzések megvalósítása érdekében kutatási tervet állítottunk össze.

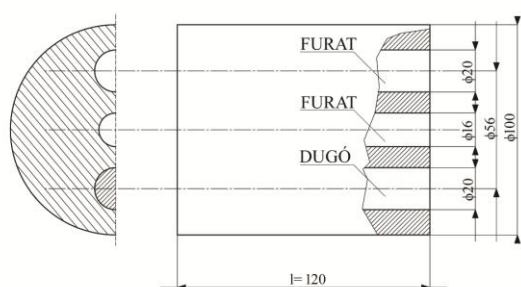
3.1 táblázat – kutatási terv

Kísérlet-sorozat	Próbatest	A vizsgálati módszer				
		Forgácsoló erő vizsgálata	Rezgés	Forgácsolási hőmérséklet	Gyorskamera	Alakhűség, Felületminőség
Előzetes vizsgálatok marógépen	brazing sheet 3 rétegű alumínium lemez		DLI analízátor	WUHAN Guide hőkamera	iSpeed kamera	
Kereszt esztergálás	Szinterfém, ill. alumínium henger, benne különböző keménységű dugók (alumínium, C45 acél, szerszámacél, és bronz dugók)	KISTLER erőmérő + Matlab adat feldolgozás	CMVA10 analízátor (SKF gyártmány)	WUHAN Guide hőkamera	iSpeed kamera	
				AGEMA hőkamera		
			2135 analízátor (CSI gyártmány)	WUHAN Guide hőkamera		
		CMVA60 analízátor (SKF gyártmány)	FLIR hőkamera			
Ortogonalis esztergálás	Alumínium hengerek, benne azonos anyagú (C45), ám különböző módon hőkezelt dugók	KISTLER erőmérő + Matlab adat feldolgozás	CMVA60 analízátor (SKF gyártmány)	FLIR hőkamera	iSpeed kamera	alakhűség felületi érdesség
			Brüel&Kjaer analízátor			

A próbatetek anyagának kiválasztása, a próbatetek előkészítése

A kísérletsorozat időben és feladatában is három, jól elkülöníthető részre oszlik. Ennek megfelelően a kísérletekhez használt anyagok előkészítését is három szakaszban tárgyalom. A **vizsgálatok első fázisában** a járműiparban széles körben használt „brazing sheet” lemezek marását vizsgáltam, de az alkotóelemek mechanikai tulajdonságai, és következésképpen az eredmények sem mutattak markáns eltérést.

A **második fázisban**, az előzetes vizsgálatok tapasztalatai alapján olyan próbatetek vizsgálatát céloztam meg, amelyek összetevőinek mechanikai tulajdonságai markánsabb eltérést mutatnak.



4.02 a ábra - A kereszttesztgáláshoz használt próbatetek vázlatos rajza

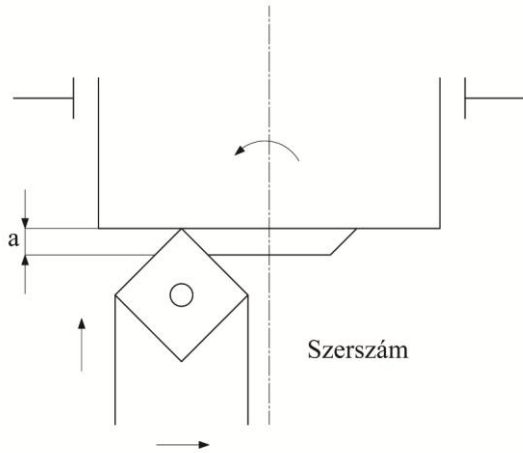


4.02 b ábra - A kereszttesztgáláshoz használt próbatetek fényképe

A vizsgált próbatetek anyaga egy hengerből, és egy abba zsigorkötéssel beleerősített, más anyagból készült dugóból állt, ahogy az a 4.02a és 4.02b ábrákon látható. A próbatetek anyagát takarékosági okokból nem kereskedelemből szereztük be, hanem a kutató munkát támogató cégektől ún minta érték nélkül címszó alatt, akik a próbatetek anyagának vegyi összetételére nézve sajnos nem tudtak garanciát vállalni. Emiatt a próbateteknek mind a vegyi összetételét, mind pedig a mechanikai tulajdonságait, és a metallográfiai szövetszerkezetét meg kellett vizsgálni.

Az összeszerelt próbatetek közül a további vizsgálatokra kiválasztott darabokon keménységmérést is végeztem. A keménységet a lenyomat átmérője alapján határoztam meg, és megállapítottam, hogy az internetes anyagkatalógus alapján becsült adatoktól való eltérés mintegy 10-15% körül van. A továbbiakban természetesen a saját, mért adatainkat használtuk. A megmunkálási jellemzőkre kihatással van a próbatetek szövetszerkezete, ezért mikroszkópos metallográfiai vizsgálatnak vettem alá a próbateteket.

A megmunkálás módja is változott, mert ezúttal keresztesztergálást vizsgáltam. Az egyes feladatok technikai megoldása ily módon egzaktabban volt megoldható, elsősorban az optikai rálátás biztosításával. A második fázisban használt forgácsolási technológia vázlatát a 4.09 a ábrán láthatjuk, illetve a mellé írt szövegben olvashatjuk.

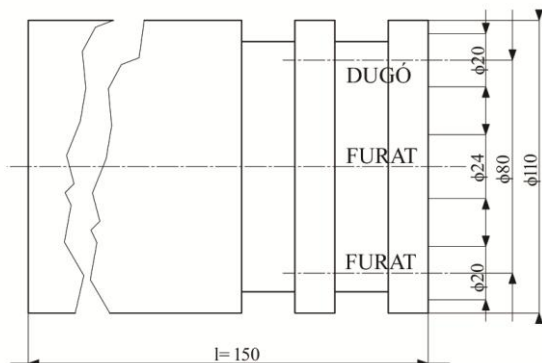


4.09 a ábra – A keresztesztergálási folyamat vázlata

A keresztesztergálás főbb technológiai adatai a következők voltak:

- EU-400/01 eszterga,
- Mitsubishi SEET13T3, AGEN-JL F7030 TIN,
- Előtolás: $v_f = 0,1$ mm/fordulat,
- Fogásmélység: $a = 0,5$ mm,
- fordulatszám $n = 530$ /min, ill. 1060/min,
- átlagos forgácsolási sebesség: $v_c = 162$ m/min (2,7 m/s), ill. 330 m/min (5,5 m/s).

A harmadik fázisban - az egyes jellemzők jobb szétválaszthatósága érdekében - ortogonális szabadforgácsolást, mint jól modellezhető eljárást választottam. Az ehhez szükséges próbatetek elrendezése ugyanaz volt, mint az első sorozatban, de az alapanyagot ezúttal a kereskedelemben szereztem be. A henger anyaga AlMgSi1F30 alumínium ötvözetből készült, $\phi 110$ -es rúd, míg a dugó anyaga $\phi 22$ -es, C45 minőségű húzott köracél. Az elkészült próbatest vázlatos rajza az alábbi ábrán látható.

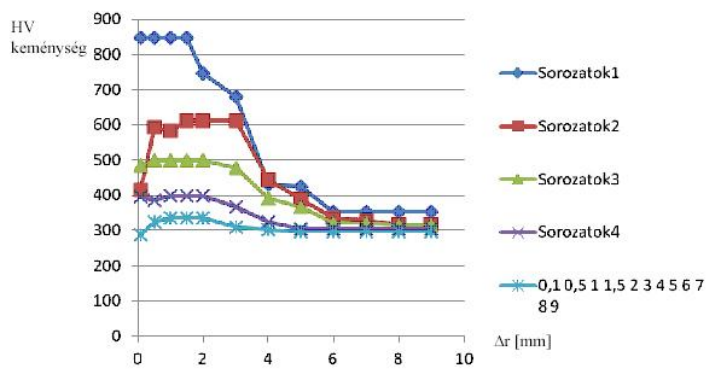


4.10 a ábra - Az ortogonális esztergáláshoz előkészített próbatetek vázlatos rajza

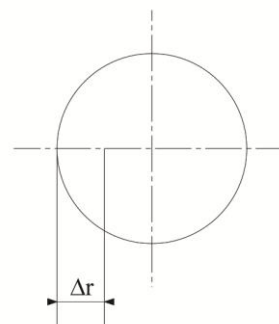


4.10 b ábra - Az ortogonális esztergáláshoz előkészített próbatetek fényképe

A többféle keménységű dugó keménységét különböző hőkezelési eljárásokkal állítottam be. A 4.13 ábrán a vízszintes tengelyen a próbatest palástjától a középpontja irányában mért távolság látható mm-ben, míg a függőleges tengelyen a mért HV keménység értéke látható. A mellette levő ábra a mikrokeménység mérésének helyét mutatja, azaz a próbatest palástjától a középpontja felé.

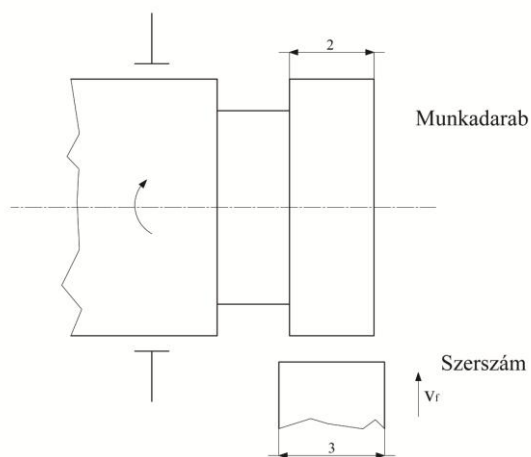


4.13 ábra - A mikro-keménység értéke, a próbatest palástjától a középpontja felé



4.14 ábra - A mikro-keménység mérésének értelmezése a dugón belül (a próbatest palástjától a középpontja felé)

A harmadik fázisban használt forgácsolási technológia vázlatát a 4.18 ábrán láthatjuk, illetve főbb adatait a mellé írt szövegben olvashatjuk.



4.18 ábra

Az ortogonális esztergálás vázlatos rajza

Az ortogonális forgácsolás főbb technológiai adatai

- Szerszámgép: EU-400/01 eszterga
- Fordulatszám: $n = 265/\text{min}$,
- Előtolás: $v_f = 0,1 \text{ mm/fordulat}$
- Forg. sebesség: $v_c = 78 \text{ m/min}$ (1,3 m/s)
- Szerszám-1: L151F SAFM/P25 MT-5 Mircona
- Szerszám-2: Sandvik COROMANT R154.91-25-25-30 R154.91-3300-S18810

A kísérleti vizsgálatok eszközei és módszerei

A szerszám és a forgács kontaktfelületének átlagos *hőmérsékletét* illetően többféle mérési lehetőség (kaloriméter, hőelem, hőjelző festékek, ill. a termográfia) állt rendelkezésre. Ezek közül a szakirodalmi ajánlások, és a tanszéki tapasztalatok, illetve a rendelkezésre álló eszközök közül, a hőkamerát választottam.

A forgácsoló erő meghatározására szolgáló eljárások közül a számítások többnyire csak egy statikus erőt adnak meg, noha a forgácsoló erő változik. A forgácsoló erőnek az időbeli változását emiatt mérésrel kell meghatározni, amihez egy korszerű, piezoelektromos elven működő KISTLER cellás erőmérőt használtam. A forgácsolási erő adatait egy A/D konverteren feldolgozva txt fájlokban tárolta a számítógép, amely adatokat később a Matlab szoftverben írt program segítségével dolgoztam fel időfüggvényként, és FFT analízissel, frekvencia spektrum, illetve spektrogram formájában.

A rezgésméréshez több, az irodalomban elfogadott módszert használtam. Ezek egyike a rezgésmérővel fölvetett időjelek (gyorsulás és sebesség) közvetlen elemzése, másrészt az időjelek gyors Fourier transzformációja (közkeletű rövidítése szerint FFT) révén keletkező spektrumok elemzése, illetve az egyes műszergyártó cégek által kidolgozott, poszt-processzáló eljárások (pl. SKF Envelope Acceleration, CSI PeakVue, stb.) alkalmazása után kapott jelek elemzése. Az elemzés megkönnyítéséhez az egyes cégek által kidolgozott, speciális ábrázolási módokat, mint pl az általánosan használt ZOOM-olás, vízésés diagramok, SKF Palogram, stb. használtam.

A forgács darabok különböző leválási módjainak vizsgálatára a korábban alkalmazott módszerek (munkadarab felületén a karcolatok deformációjának megfigyelése, optikai feszültségvizsgálat stb.) helyett a nagysebességű kamera alkalmazása mellett döntöttem. Ennek feladata, hogy a valóságban lezajló eseményeket rögzítve azok a későbbiekben, tudományos megfigyelés céljából, a valóságosnál lassabban lejátszhatók legyenek.

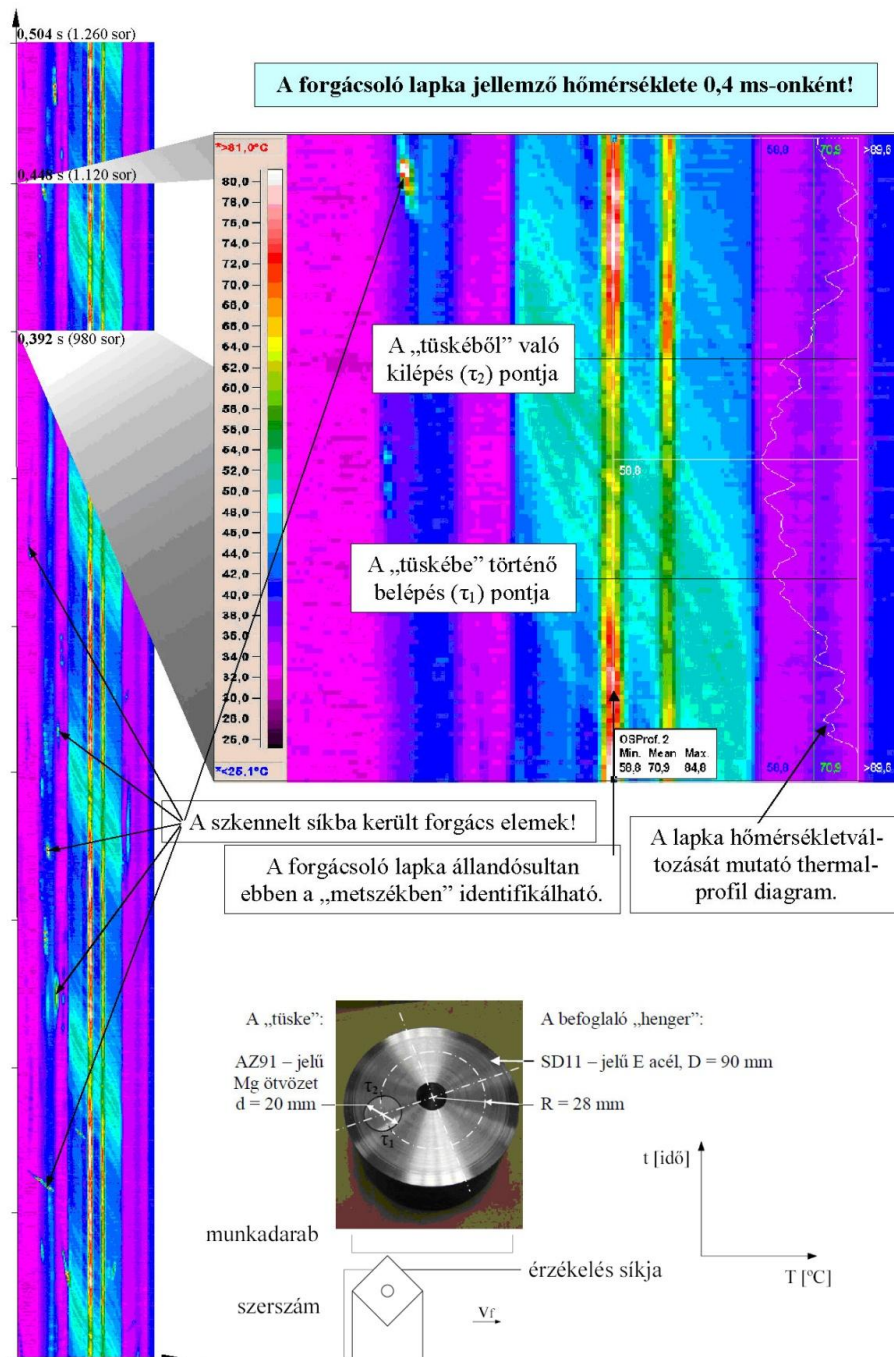
Az elkészült munkadarabok elméleti alaktól való eltéréseinek és a felületi érdességnek a mérését nemzetközi szabványok határozzák meg. A megadott jellemzők közül a körköröségtől való eltérést, és a felületi érdesség mérőszámait vizsgáltam, s az eredményeket az egyes próbatestek mechanikai tulajdonságainak (keménység) függvényében elemeztem.

A kutatás részterületei, a vizsgálatok lefolyása

A vizsgálat sorozat összesen mintegy két éves időtartamban zajlott, amelynek során különféle eljárásokkal kísérleteztem. A különböző típusú és gyártmányú hőkamerák, valamint az ugyancsak különböző rezgés-analizátorok beállítási paramétereit értelemszerűen az egyes méréseknél adtam meg.

A kutatás eredményei

A kereszttergálás hőkamerás vizsgálata során SD11 szinterfém henger és AZ91 magnézium anyagú dugó összeállítású próbatest forgácsolását vizsgáltam egy ún. vonali üzemmódba kapcsolt AGEMA kamerával (7.3 ábra).

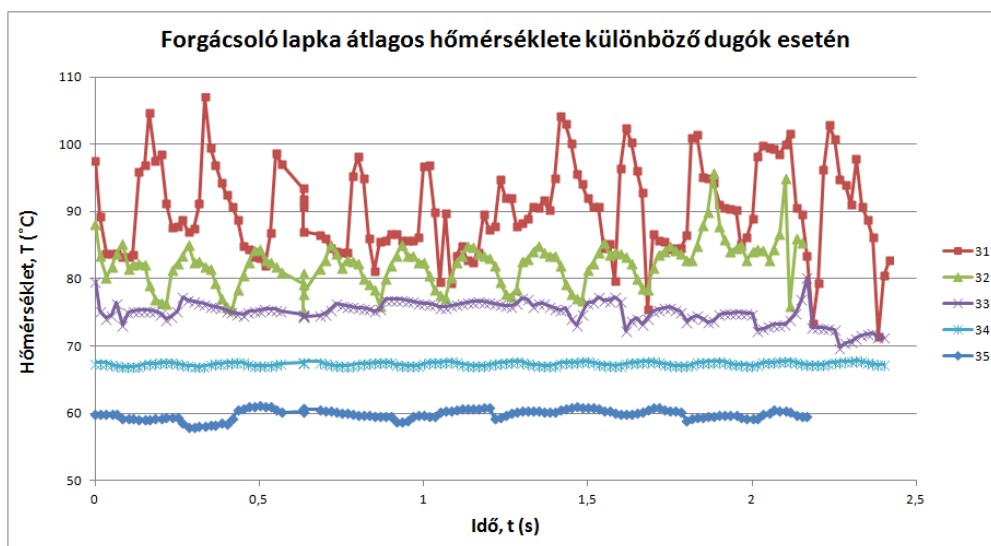


7.3 ábra - Kereszttergálás termikus vizsgálata (vonali üzemmódban készített felvételek)

Az érzékelés (pásztázás) síkja a forgástengelyre merőleges síkban, a munkadarab homloklapfelületétől kb 1 mm-re volt beállítva. A hőmérséklet ábrázolása egy kvázi-háromdimenziós ábrában történik, amelynek vízszintes tengelye a geometriai távolság, míg a függőleges tengelye az idő. A függőleges tengely mentén 0,4 ms időközönként (2500 Hz-es pásztázási sebesség) rögzítettünk egy-egy távolság-hőmérséklet vonalat. A hőmérséklet értékét a különböző színek jelölik. Az ábra bal oldalán több ciklus képe látható, míg az ebből kimetszett négyzet alakú részlet egy szakasz kinagyítása, amelyeken a részletek is megfigyelhetők. Nyomon követhetők a szkennelési síkba kerül forgács elemek, valamint a hőmérséklet időbeli változását (0,4 ms mintavételezéssel) mutató diagram (7.3 ábra jobb felső sarkában).

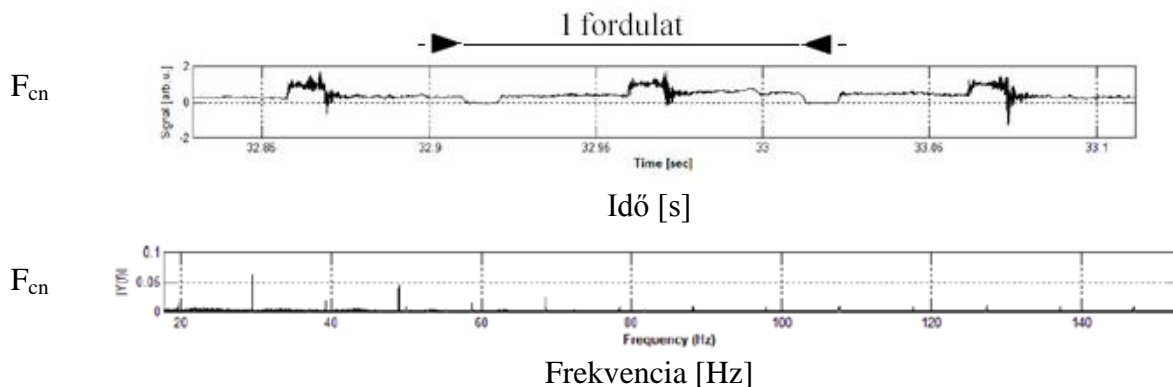
A vizsgálat alapján megállapítható, hogy a magnézium anyagú dugó forgácsolásakor a szinterelt acél forgácsolásához képest lecsökken a hőmérséklet. Ennek oka részben a magnézium jobb hővezető képessége, részben a forgácsoláshoz szükséges kisebb erő. A csökkenés mértéke, a különbség értékei a thermal profil (hőprofil) diagramból kiolvashatók. Megállapítottam, hogy a forgácsoló szerszám hőmérséklete a munkadarab egy fordulatan belül periodikusan változik.

Az ortogonális esztergálás hőkamerás eredményeit látjuk a 7.21 ábrán. Bizonyos idő után a hőmérséklet állandósul, de ez nem minden próbatestre igaz. Közel állandó hőmérséklet (kék és lila színű görbék) csak azokban az esetekben alakul ki, amelyekben a dugó keménysége nem túl nagy (34, 35-ös próbatetek). A keményebb dugók esetén a hőmérséklet periódikus változása figyelhető meg, s a periódusidő egyértelműen a fordulatszámhoz köthető (31-es és 32-es próbatetek). A vízszintes tengelyen ugyanis az egyes csúcsok közötti „távolság” kb. 0,1 sec, ami elfogadható közelítéssel éppen az 530/perc fordulatszámra felel meg, hiszen $530/60=8,83$ Hz, amiből $1/8,83=0,113$ sec. A 33-as próbatest ebből a szempontból átmenetinek tekinthető, mert noha a hőmérséklet nem állandó (lila vonal), de a periódicitás nem azonosítható egyértelműen.



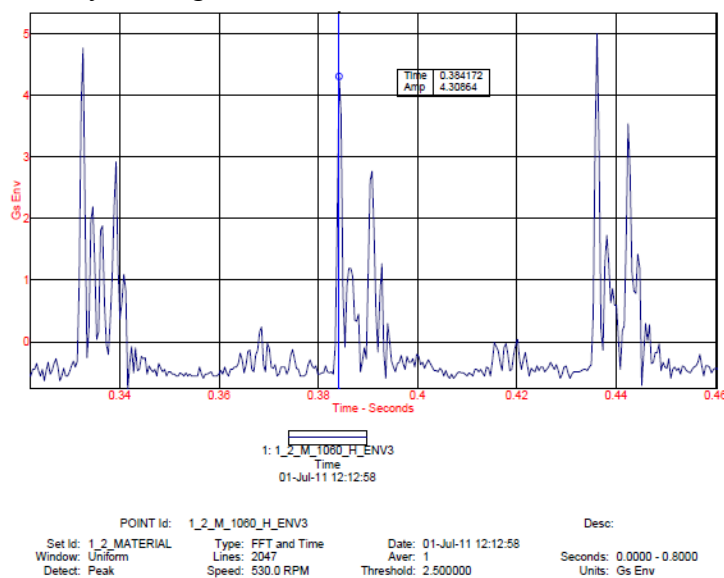
7.21 ábra – A forgácsoló lapka hőmérséklete a különböző próbatetek ortogonális forgácsolása során

A forgácsoló erőt mind a kereszttergálás, mind pedig az ortogonális esztergálás során KISTLER erőmérő cellával végeztem, melyek közül a 2.5 számú próbatest (alumínium henger, acél dugóval) esetét kiemelem. MATLAB szoftverrel történt adatfeldolgozás a 7.8 ábra szerinti eredményeket adta. Látható, hogy az időjel periódicitást mutat, amely a fordulatszámhoz köthető. Teljesen egyértelműen látszanak a dugóba való felütkezések, amelyek kb. $T=0,1$ sec periódusidővel követik egymást. A spektrumon jól elkülöníthető komponensek láthatók. A függőleges tengelyen az F_c főforgácsoló erő dimenziótlanított értéke látható, amelyet F_{cn} -nel jelöltem.

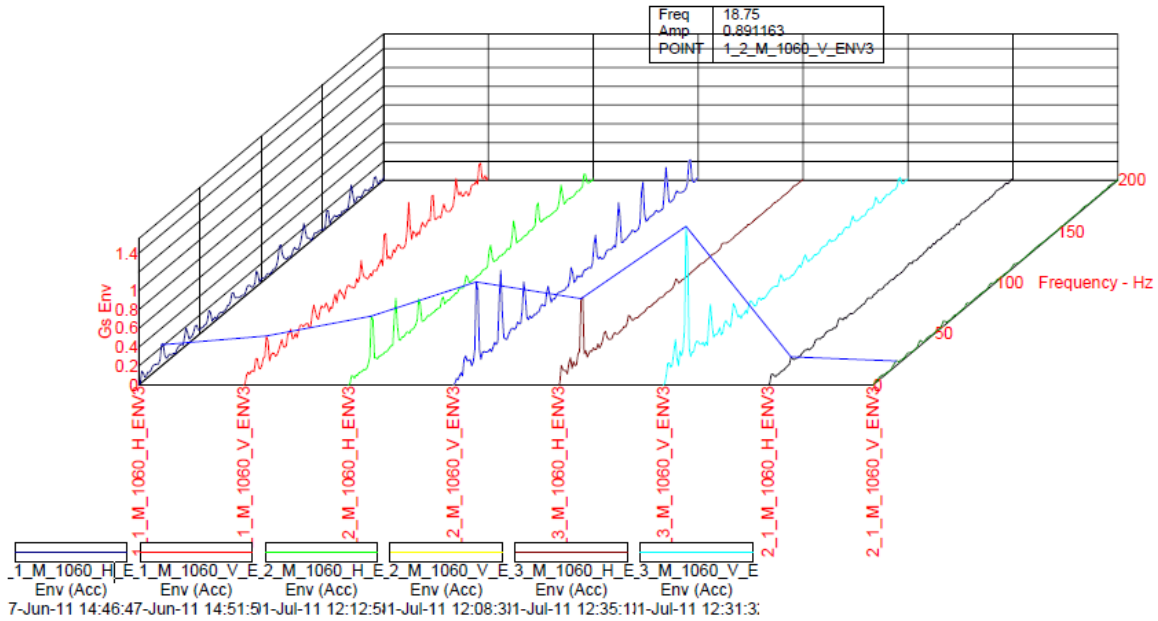


7.8 ábra - A 2.5 sz. próbatest forgácsolása során fölvevett időjel, ill. spektrum Kistler erőmérő cella + Matlab szoftver [T.04-2011]

A rezgés-mérések egy részét egy CMVA 10-es (SKF) rezgés-analizátorral végeztem el. Ennek eredménye a fenti ábrán látható. A függőleges tengely az ún Envelope Acceleration függvényt mutatja. Felismerhető a szerszámnak a munkadarab fordulatonként egyszeri beleütkezése a henger anyagánál keményebb dugóba.

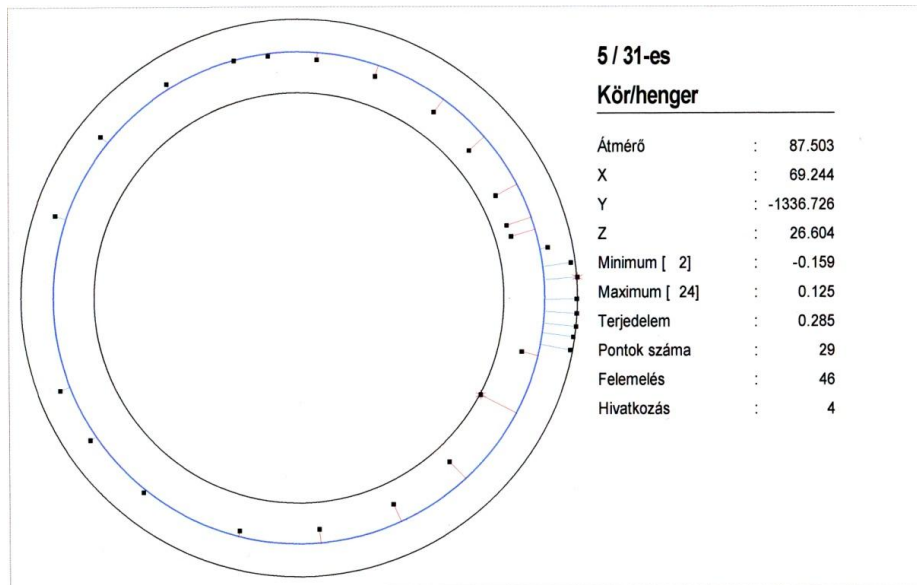


7.12 ábra - Az 1.2 számú próbatest forgácsolása során CMVA10-es analizátorral fölvevett rezgés-időjel



7.13 ábra - A különböző próbatetek forgácsolása során CMVA10-es analizátorral fölvelt spektrumok axonometrikus ábrázolásban (SKF Palogram™, 1060/perc) [T.02-2011]

A 7.13 ábrán különböző próbatetek keresztasztergálása során fölvelt spektrumok láthatók ún. Palogram alkalmazásban. A homogén anyagok (Nr.1.1 és Nr.2.1 számú próbatetek) forgácsolása során keletkező rezgések spektrumai jóval kisebb amplitúdójú összetevőket tartalmaznak, mint az inhomogén anyagok spektrumai (Nr.2.2 és Nr.2.3 próbatetek).



7.37 ábra - 31-es próbatest, körkörösségtől való eltérés eredményei

A forgácsolás utáni, geometriai mérések célja annak megállapítása volt, hogy a különböző keménységű dugók megmunkálása miként hat egyrészt a geometriai formára (körköröségtől való eltérés), másrészt a felületi érdességre. A részletes mérési adatok (diagramok, stb.) megtalálhatók a dolgozat M12 mellékletben. Itt csupán egy-egy érdekesebb részletet ragadok ki, s azokhoz fűzök magyarázatot. Amint az a 7.37 ábrán is látható, a forgácsolt munkadarab alakja eltér az elméleti köralaktól, amit az ábra jobb oldalán a 7 mérési pont bizonyít (3 óra állása körüli helyzetben).

A keletkezett hiba a munkadarabban levő dugók keménységével jó korrelációt mutat, ha kihagyjuk az értékelésből azt a mintát (32-es minta), amelynek forgácsolása során eltört a szerszám. A fontosabb jellemző paramétereket az automatikus gépi leolvasás adatai alapján megállapítható, hogy a mérési adatok terjedelme igen jelentős pontatlanságot mutat (0,285 mm), ami jelentékeny hiba lehet a hibrid anyagok megmunkálása során. Ennek a nagy eltérésnek az oka az MKGS rendszernek a nagy erőváltozásokkal szembeni merevségi viselkedésében keresendő.

Új tudományos eredmények összefoglalása tézisekben

T-1. TÉZIS: Hibrid anyagok forgácsolásakor, optikai rálátás esetén a hőkamera vonali üzemmódban alkalmas a viszonylag nagysebességű folyamatok nyomon követésére, a hely szerinti lokalizáció biztosíthatóságával, amit a forgácsolás során a keményebb anyagba való belépések esetén a hőmérséklet periodikus felfutása igazol. A kidolgozott módszer kimutathatóvá tette a hibrid anyag eltérő tulajdonságainak a forgácsoló lapka hőmérsékletére gyakorolt hatását. Ezen vizsgálat alapján megállapítható, hogy a magnézium ötvözet anyagú dugó forgácsolásakor a szinterelt acél forgácsolásához képest lecsökken a hőmérséklet a magnézium ötvözet kisebb forgácsolási ellenállása és jobb hővezetése miatt. A csökkenés mértéke, a különbség értékei a hőprofil diagramból kiolvashatók. [T.05-2012], [T.10-2013]

T-2. TÉZIS: A próbatestekben levő dugók hőkezelése, és az azt követő mikrokeménység mérésével megállapítottam, hogy a mikrokeménység értéke a dugón belül nem egyenletes, ezért az irodalmi adatok és a saját méréseim alapján bevezettem a dugó jellemző keménysége fogalmát. Megállapítottam, hogy a hibrid anyagok ortogonális szabadforgácsolása közben a szerszámcsúcs hőmérséklete ingadozásainak amplitúdója egyértelműen függ a dugó jellemző keménységétől. Minél keményebb a dugó, annál nagyobb az amplitúdó. Edzett, 700 HV jellemző keménységű dugó esetén a hőmérsékletingadozás amplitúdója elérheti a 30 °C-ot, míg lágyított esetben, azaz 300 HV esetén a hőmérsékletingadozás amplitúdója alig éri el a 2-3 °C-ot. [T.05-2012], [T.09-2013], [T.10-2013]

T-3. TÉZIS: Megállapítottam, hogy hibrid anyagok ortogonális esztergálása során az F_c főforgácsoló erő, és a dugó Vickers keménysége közötti korreláció 0,920686, azaz nagyon erős. Megállapítottam, hogy főforgácsoló erő mért értékei jól illeszkednek a regressziós egyenesre, azaz dinamikus körülmények között is (egy fordulaton belül is változó anyagok megmunkálásakor) igazolják a korábban, a forgácsoló erő kvázistatikus értékének meghatározására széles körben használt összefüggést, amely szerint a főforgácsoló erő arányos munkadarab szakítószilárdságával, illetve keménységével. [T.04-2013], [T.05-2013]

T-4. TÉZIS: A rezgésmérési módszerek (beállítási paraméterek) olyan kombinációját fejlesztettem ki, amelynek révén hibrid anyagok forgácsolásakor hatékonyan lehet vizsgálni a határátmenetet. Megállapítottam, hogy hibrid anyagok forgácsolásakor a határátmenetnél fellépő rezgések jeleinek diagnosztikai célú elemzése a közvetlenül regisztrált gyorsulás/sebesség/elmozdulás jel helyett hatékonyabban elvégezhető valamely posztprocesszáló algoritmus alkalmazásával. Megállapítottam, hogy ezek közül az ún. gyorsulás burkológörbe (Envelope Acceleration) módszerrel lehet a legjobb eredményeket elérni, azaz a legerősebb korrelációt kimutatni. [T.09-2013], [T.11-2013], [T.12-2013]

T-5. TÉZIS: A hibrid anyagú próbatestek forgácsolása során – az erő és a rezgés egyidejű mérése révén – összekapcsoltam e két jelenséget, és valós képet alkotva a folyamatról megállapítottam azok közvetlen összefüggését. Ez azt jelenti, hogy a gyorsulásérzékelő és az ugyancsak piezoelektromos elven működő erőmérő cella mérési tartományán belül mind az idő, mind pedig a frekvencia tartományban kimutatható a jelek hasonlósága. Hibrid anyagok forgácsolásakor kialakuló dinamikus erőváltozások kiértékelésével a kísérleti eredmények alapján megadhatók olyan peremértékek, amelyek a folyamatmodellezési eljárások validálását teszik lehetővé. [T.11-2013], [T.12-2013]

T-6. TÉZIS: A hibrid anyagú próbatestek vizsgálata során megállapítottam, hogy a megmunkálás során a munkadarabban levő dugó keménysége és a körkörösségtől való eltérés terjedelme között a korrelációs együttható erős, azaz az MKGS rendszer az egy munkadarab fordulaton belül fellépő erőhatás ingadozás miatt jelentős körkörösségi hibát okoz. [T.11-2013], [T.12-2013]

T-7. TÉZIS: A hibrid anyagok megmunkálási folyamatának diagnosztikai jellemzésére az erőmérés, lokális hőmérsékletmérés dinamikus jellemzői (jelalak, felfutás, periodicitás) mellett a viszonylag egyszerűbb rezgésmérési eljárások (gyorsulás burkoló görbe alapvető hasonlóságai) hatékonyan alkalmazhatók. [T.06-2013], [T.07-2013], [T.08-2013], [T.09-2013], [T.10-2013], [T.11-2013], [T.12-2013].

A disszertáció témájával kapcsolatos publikációk

- [T1.01-2008] **Dömötör, F.** (szerk.): „Rezgésdiagnosztika” tankönyv, I. kötet, Főiskolai Kiadó, Dunaújváros, 2008., ISBN: 978-963-87780-0-0
- [T1.02-2011] **Dömötör, F.** (szerk.): „Rezgésdiagnosztika” tankönyv, II. kötet, Főiskolai Kiadó, Dunaújváros, 2011., ISBN 978-963-9915-43-5
- [T.03-2010] **Dömötör, F.** - Banlaki, P: Vibration acceptance test of vehicle gearboxes used in agriculture, International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 2010, Vol. 15. No. 2. ISSN 1425-1605
- [T.04-2011] **Dömötör, F.** et al: Fém-kompozit anyagok forgácsolási folyamatának komplex diagnosztikája, XXV. microCAD Nemzetközi Tud. Konf., Miskolc, 2011. ISBN:978-963-661-965-7

- [T.05-2011] **Dömötör, F.** et al.: Complex Diagnostics of the Cutting Process of Metal Composite Materials, IN-TECH 2011 International Conference on Innovative Technologies, Bratislava, Slovakia, 2011., ISBN 978-80-9045-02-6-4
- [T.06-2011] **Dömötör, F.** et al: Some features of the Complex Diagnostics of the Cutting Process of Metal composite Structures, 8th Danubia-Adria Symposium on Advances in Exp. Mechanics, Siofok, 2011., ISBN: 978-963-9058-32-3
- [T.07-2012] **Dömötör, F.** et al.: Some Features of the Complex Diagnostics of Cutting Hybrid Metal Structures, SEMDOK 17th International of PhD Students Seminar, Zilina-Terchova, Slovakia, 2012., ISBN 978-80-554-0477-6
- [T.08-2012] **Dömötör F.** et al.: Összetett szerkezetű, fém-kompozit anyagok forgácsolásának diagnosztikai vizsgálata rezgésméréssel és termovíziós kamerával, microCAD-2012, Nemzetközi Tudományos Konferencia, Miskolc, 2012, ISBN: 978-963-661-773-8
- [T.09-2012] **Dömötör F.** et al.: Complex Diagnostics of the Cutting Process of Hybrid Metal Structures with Improved Specimens, 29th International Colloquium on Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry” University of Žilina, Terchová, 21-23 May, 2012., ISBN 978-80-554-0533-9
- [T.10-2012] **Dömötör, F.:** Complex diagnostics of the cutting process of metal composite structures, 9th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Beograd, 2012, ISBN 978-86-7083-762-1
- [T.11-2013] **Dömötör, F.:** A rezgésösszetevők amplitúdóinak változása különböző keménységű, összetett szerkezetű, fém-kompozit anyagok forgácsolása során, microCAD-2013, Nemzetközi Tudományos Konferencia, Miskolc, 2013. ISBN: 978-963-358-018-9
- [T.12-2013] **Dömötör F.** et al: Some Features of the Vibration and Temperature Diagnostics of Cutting Hybrid Metal Structures, 30th International Colloquium on Advanced Manufacturing and Repairing Technologies in Vehicle Industry, Visegrád, Hungary, 22-24 May 2013., ISBN: 978-963-313-079-7
- [T.13-2013] **Dömötör, F.** - Weltsch, Z.: Complex Diagnostics of the Cutting Process of Metal Composite Materials, using Thermo Camera, 18th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 3-5th July 2013., ISBN: 978-963-8231-97-0
- [T.14-2013] **Dömötör, F.:** Combined force and vibration measurements of the cutting process of metal composite structures, under surveillance of thermo and high speed camera, In-Tech2013 Conference Budapest, 2013.09.10-12. ISBN: 978-953-6326-88-4
- [T.15-2013] **Dömötör, F.** et al: Some Features of the Complex Diagnostics of the Cutting Process of Hybrid Metal Composite Materials, Periodica Polytechnica Transportation Engineering, Vol.: 2013/2. ISSN: 1587-3811

A tézisfüzetben hivatkozott irodalom

- [F5.01 – 1989] Emel, E. – Kannatey, E.: Acoustic Emission and force Sensor fusion for monitoring the Cutting Process, Int. J. Mech. Sci. Vol. 31. No. 11/12. pp. 795-809.

- [F4.19-2001] Szabó - Kégl: A rezgésanalízis és a thermovízió a gyártórendszerek gépdiagnosztikájában, GEP, L. évfolyam, 1999. 7 szám, 23-31. oldal
- [F5.32 - 2006] L. Ricardo Castro et al.: Correction of dynamic effects on force measurements made with piezoelectric dynamometers, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) pp.: 1707–1715, Elsevier Ltd., doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.12.006
- [F5.27 – 2004] Lacerda, H.B. – Lima V.T.: Evaluation of Cutting Forces and Prediction of Chatter Vibrations in Milling, J. of the Brazilian Soc. of Mech. Sciences & Engineering, Jan.-March 2004, Vol. XXVI. No. 1. pp. 74-81.
- [F6.14 – 2006] Schermann, T. et al: Simulation von Zerspanprozessen unter Berücksichtigung des dynamischen Maschinenverhaltens, 18. Deutschsprachige ABAQUS-Benutzerkonferenz, Tagungsband, 18-19. September, 2006. Erfurt, Germany
- [F6.17 - 2008] Abele, E. et al: Wechselwirkungen von Fräsprozess und Maschinenstruktur am Beispiel des Industrierobots, Preprint of an article which appeared in wt-online 9-2008, pp. 733-737, Springer-VDI Verlag
- [5.72 - 2008] P.N. Botsaris – J.A. Tsanakas: State-of-the-art in methods applied to tool condition monitoring (TCM) in unmanned machining operations: a review, Proceedings of the Conference of COMADEM, Prague, 2008. pp. 73-87. Czech Republic
- [F5.41 - 2008] Cotterell – Byrne, G.: Dynamics of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 57 (2008).
- [F7.03 – 2009] А. С. Мановицкий: ВЗАИМОСВЯЗЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ..., *Инст. сверхтвердых мат. им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, 2009.*
- [F7.05 -. 2010] Симула Н.А., Румбешта В.А., Подвысоцкая В.С. ДИАГНОСТИКА ТЕХН. СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ МЕХАНООБРАБОТКЕ, Вестник НТУУ КПИ Приладоудивленная 2010 Вип. 39. стр. 111-116.
- [F5.51- 2010] Rusinek, R.: Cutting process of composite materials: An experimental study, International Journal of Non-Linear Mechanics 45, Elsevier, (2010)
- [F3.26 - 2010] Schwarz, F.: Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung, PhD Dissertation, TU München, 2010.
- [F5.54 – 2011] F. Cus - U. Zuperl: Real-Time Cutting Tool Condition Monitoring in Milling, Strojnicki Vestnik – Journal of Mechanical Engineering 57 (2011) 2, pp. 142-150. Slovenia
- [F6.24 - 2012] Vogel M. – Kaltenbrunner M.: Optische Schwingungsanalyse, Werkzeugmaschinen, WB, 10/2012, pp. 21-23.
- [F9.05 - xxxx] Арясов и др.: Влияние вибрации на точность обрабатываемых деталей при резании, Таллиннский Технический Университет, Таллин, Естония (www.mh.ttu.ee)