

# Térhálós epoxy gyanta forgácsolhatósági vizsgálata hosszesztergálási kísérletekkel

## Machinability analysis of thermosetting epoxy resin through turning experiments

Dr. GEIER Norbert<sup>1</sup>, SEPRŐS Szilárd<sup>1</sup>, POÓR Dániel István<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gyártástudomány és -  
technológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

<sup>2</sup> MTA-BME Lendület Fenntartható Polimerek Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

### Abstract

*Thermosetting polymers are popularly used as matrix materials for high-strength fibre-reinforced polymer (FRP) composite structures. Machining these FRP composites is often necessary, but their machining technology planning is challenging. In order to support the machining technology planning of FRP composites, we investigated the machinability of thermosetting epoxy resin with turning experiments in this research. The feed rate, cutting speed, and depth of cut varied based on a two-level full factorial experimental design. The cutting force was measured with a KISTLER 9263A three-component dynamometer. The quality of the machined surface was examined with a Mitutoyo SJ400 contact profilometer. The significance of the main and cross effects was examined using analysis of variance (ANOVA). Based on the ANOVA results, all three investigated factors significantly affect the cutting force and surface quality, so the careful selection of these factors is of cardinal importance.*

**Keywords:** Machinability; Turning; Polymer cutting; Cutting force; Surface Roughness

### Kivonat

*A térhálós polimereket előszeretettel alkalmazzák a nagyszilárdságú szálerősített polimer (FRP) kompozit szerkezetek mátrixanyagaként. Ezen FRP kompozitok forgácsolása sokszor szükséges, azonban forgácsolástechnológiai tervezésük bonyolult. Az FRP kompozitok forgácsolástechnológiai tervezésének támogatása érdekében ebben a kutatásban térhálós epoxy gyanta forgácsolhatóságát vizsgáltuk hosszsztergálási kísérletekkel. Az előtolást, a forgácsolási sebességet és a fogásmélységet variáltuk kétszintes teljes faktoriális kísérletterv alapján. A forgácsolási erőt egy KISTLER 9263A háromkomponenses erőmérővel mértük. A forgácsolt felület minőségét egy Mitutoyo SJ400 típusú kontakt profilométerrel vizsgáltuk. A fő- és keresztthatások szignifikanciáját varianciaanalízissel (ANOVA) értékeltük ki. Az ANOVA eredmények alapján mindhárom vizsgált faktornak szignifikáns hatása van a forgácsolási erőre és a felület minőségére is, így ezen faktorok körültekintő megválasztása kardinális fontosságú.*

**Kulcsszavak:** Forgácsolhatóság; Esztergálás; Polimer forgácsolás; Forgácsolási erő; Felületi érdesség

## 1. BEVEZETÉS

A szálerősített polimer (FRP) kompozitok – kiváló fajlagos mechanikai tulajdonságaik, valamint geometriai és kémiai stabilitásuk miatt – előszeretettel alkalmazott szerkezeti anyagokká váltak a csúcscategóriás iparágakban, mint például a gépjármű- és repülőgépipar [1]. Gyártásuk alakra közel kész formára készül automatizált kompozitgyártási technológiákkal [2,3], azonban a szerelhetőségi követelmények gazdaságos teljesítése okán sokszor utólagos megmunkálásukra van szükség [4]. A szereléshez szükséges nagy pontosságú furatokat és éleket jellemzően mechanikus forgácsolással (pl. fúrás, marás) szokták elkészíteni, hiszen rendkívül nagy pontosság (IT6 [5]) és nagy anyageltávolítási ráta (>7000 mm<sup>3</sup>/min [6]) érhető el ezen technológiákkal. Ezen forgácsolási műveletek tervezése és kivitelezése azonban számos kihívással jár a kompozit inhomogenitása, anizotrópiája és az erősítőszálak – jellemzően – jelentős koptató hatásai miatt [7]. Az FRP kompozitok forgácsolástechnológiai tervezése során figyelembe szükséges venni

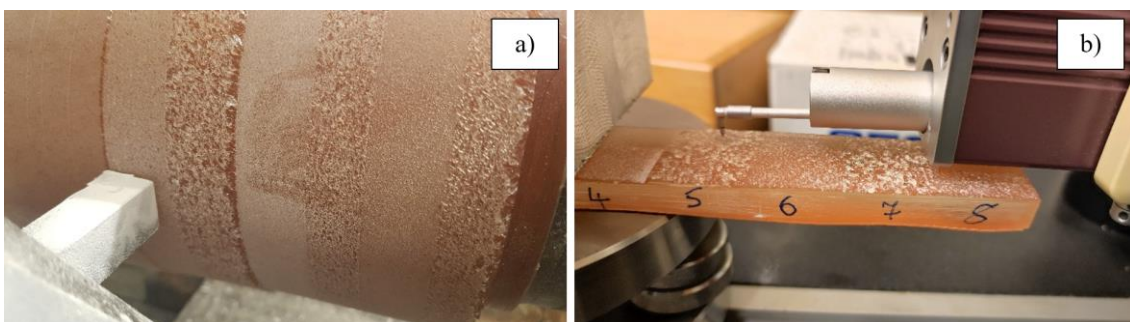
mind az erősítőanyag (szilárdság, felületi karakterisztika, száltartalom, struktúra stb.) és a mátrixanyag (szilárdság, hővezetési tényező, üveges átmeneti hőmérséklet stb.) tulajdonságait, és ezen összetevők adhéziós képességeit. Ezen kutatás a műszaki FRP kompozitok egyik leggyakoribb mátrix anyagára, a térhálós epoxy gyantára fókuszál.

A tiszta epoxy gyanta forgácsolhatóságáról csak nagyon kevés tanulmány értekezik, noha meghatározó szereplője az FRP kompozitok forgácsképződési és felületképződési mechanizmusainak [8–10]. Ahmad [11] foglalta össze a térhálós polimerek forgácsolhatóságának főbb tapasztalatait: (i) rideg viselkedést mutatnak forgácsoláskor és kis feszültség hatására is bekövetkezik a törési tönkremenetelük, (ii) a deformációs sebesség növelésének hatására egyre dominánsabbá válik a rideg viselkedésük (a képlékennyel szemben), (iii) a forgácsolásindukált (elsősorban a nyírási síkban végbemenő deformáció és szerszám-polimer súrlódás miatt bekövetkező) hőmérséklet a forgácstöben lokális kilágyulást eredményez, (iv) a hővezetési képességük rossz, így a felmelegedett polimer nehezebben hűl le, (v) szegmentált, apró, töredezett forgácsot eredményez a forgácsolásuk. Ashworth és munkatársai [12] megfigyelték, hogy az FRP kompozitok kilágyult mátrixanyaga elkenődhet a forgácsolt felületen, ami téves megfigyeléseket és minősítéseket okozhatnak az esetleges geometriai hibák (szálkihúzódság, repedés, üreg stb.) befedése miatt. A publikált kutatások nagyrésze az FRP kompozitok forgácsolása során szerzett polimerforgácsolási tapasztalatokat írja le, amely polimerre vonatkozó tapasztalatok jelentős „hibával” terheltek. Annak érdekében, hogy az FRP kompozitok forgácsolhatósága jobban leírható, modellezhető, megérthető és tervezhető legyen, tiszta epoxy gyanta forgácsolhatóságának kísérleti vizsgálatát tűztük ki jelen kutatási munkánk céljaul.

## 2. KÍSÉRLETI BEÁLLÍTÁSOK ÉS KÖRÜLMÉNYEK

A forgácsolási kísérleteket egy EU630 típusú hosszesztergán végeztük hűtő-kenő folyadék alkalmazása nélkül, száraz körülmények mellett. A forgácsleválasztást egy SECO SCLCR1616H09 szerszámszárba befogott SECO CCGT09T304F-AL,KX típusú váltólappá végezte (1.a ábra). A váltólappát 3 Nm meghúzási nyomatékkal rögzítettük a szerszámszárba. A forgácsolt hengeres munkadarab egy acélcsőre öntött epoxy gyanta („A” komponens: MR3016; „B” komponens: MH3122; keverési arány: 100:40) volt. A hengeres epoxy munkadarab névleges belső és külső átmérője rendre 146 és 160 mm, névleges hossza 220 mm. A forgácsolási erőt egy KISTLER 9263A típusú háromkomponenses erőmérővel mértük 5000 Hz mintavételezési frekvenciával és 500 N mérés határral. A forgácsolási erő ( $F$ ) forgácsolási sebesség irányú komponensét ( $F_c$ ) a mozgó átlag módszerrel szűrt forgácsolási erőjel ( $F_z$ ) három  $t=1$  s ideig tartó szakaszán ( $m=3$ ) számolt átlagok átlagaival jellemeztük az 1. egyenlet alapján.

$$F_c = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{j=1}^{m=3} \sum_{i=1}^{n=5000} F_{z,ij} \quad (1)$$



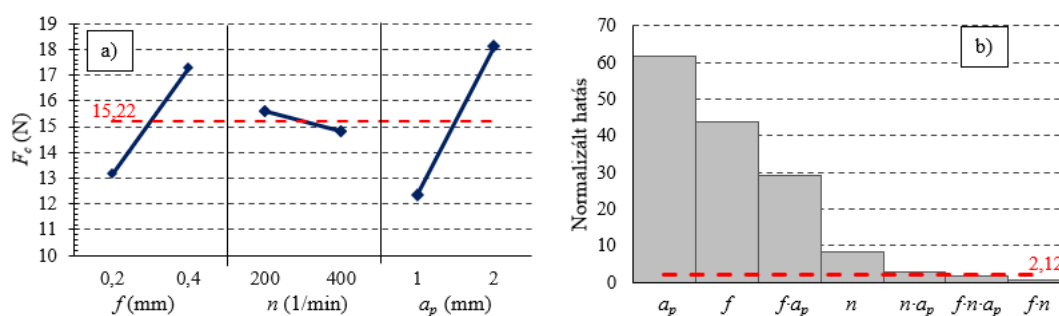
1. ábra. (a) Esztergálási környezet, (b) érdességmérési környezet

A forgácsolt felületek érdességét egy Mitutoyo SJ400 típusú kontakt profilométerrel mértük (fontosabb mérési beállítások:  $\lambda_c=2,5$  mm,  $N=3$ , Gauss filter,  $v=0,5$  mm/s) a mérések ötszörös elvégzése mellett (1.b ábra). A mért adatsorból az ISO 4287:1997 szabvány alapján számoltuk az átlagos felületi érdességet ( $R_a$ ) és érdességmagasságot ( $R_z$ ). A kísérleteket a  $2^k$  típusú teljes faktoriális kísérletterv alapján terveztük meg. Variálható faktoroknak a forgácsolhatóságot várhatóan szignifikánsan befolyásoló előtolást ( $f$ ), fordulatszámot ( $n$ ) és fogásmélységet ( $a_p$ ) választottuk. A kísérleti faktorokat és szintjeit foglalja össze az 1. táblázat. Egy kísérleti beállítással legalább 15 mm hosszon esztergáltunk, hogy kellő adatot gyűjthessünk a forgácsolási erőről és felületi érdességről. A vizsgált faktorok fő- és kereszt hatásait és azok szignifikanciáját  $\alpha=0,05$  szignifikancia szinten elvégzett varianciaanalízissel (ANOVA) vizsgáltuk.

Megnevezés	Jelölés	Mértékegység	Értelmezési tartomány		Szintek száma	Vizsgált szintek
			Legalsó szint	Legfelső szint		
Előtolás	$f$	mm	0,2	0,4	2	0,2; 0,4
Fordulatszám	$n$	1/min	200	400	2	200; 400
Fogásmélység	$a_p$	mm	1	2	2	1; 2

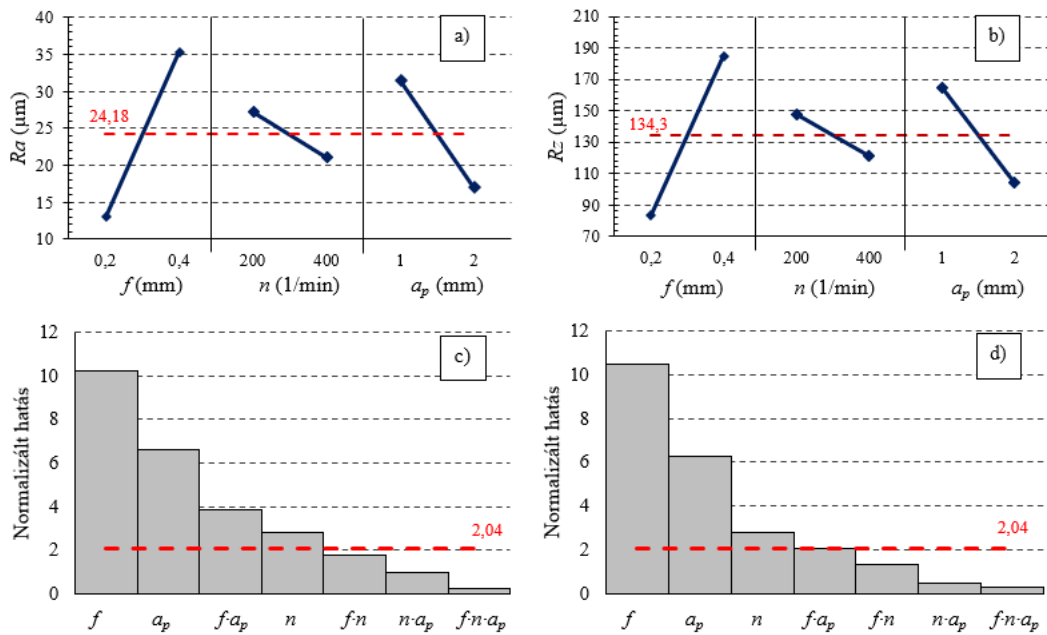
### 3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTELMEZÉSÜK

A 2. ábrán látható az előtolás, fordulatszám és fogásmélység főhatása a forgácsoló erőre ( $F_c$ ). Az előtolás növelésének hatására növekedett a forgácsoló erő, ahogyan várható volt az előtolás-növelés közvetlen forgácsvastagság növelő hatásának köszönhetően (nagyobb a forgácsvastagság, így nagyobb a forgácskeresztmetszet és – forgácsvastagságtól szignifikánsan nem függő fajlagos forgácsoló erőt feltételezve ebben a tartományban – nagyobb a forgácsoló erő). A fordulatszám-növelés hatására a forgácsoló erő csökkent, ami a nagyobb alakváltozási sebesség okozta nagyobb forgácsolási hőmérséklet által létrejövő lokális polimer lágyulásnak köszönhető, feltételezhetően [13]. A fogásmélység növelése is közvetlenül növeli a forgácskeresztmetszet nagyságát, így a fogásmélység forgácsoló erőre gyakorolt növelő hatása is várható volt. ANOVA vizsgálatok alapján az előtolás, fordulatszám és fogásmélység főhatása is szignifikáns volt (F-értékek rendre: 1921,39; 66,94; 3801,85; P-értékek rendre: 0,000; 0,000; 0,000). A vizsgált faktortérben a fogásmélységnek volt a legnagyobb hatása a forgácsoló erőre, amit rendre az előtolás, az előtolás és fogásmélység interakciója, majd a fordulatszám követ.



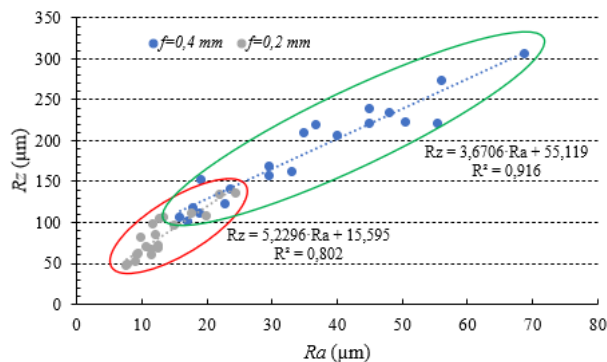
2. ábra. (a) A vizsgált faktorok ( $f$ ,  $n$ ,  $a_p$ ) főhatása a forgácsoló erőre ( $F_c$ ), (b) a főhatások és interakciók szignifikanciájának szemléltetése Pareto diagrammal

A 3. ábrán látható az előtolás, fordulatszám és fogásmélység főhatása a forgácsolt felületi érdességet jellemző átlagos felületi érdességre ( $R_a$ ) és érdességmagasságra ( $R_z$ ). A vizsgált faktorok főhatása mindkét optimalizációs paraméter esetében jellegre azonos: (i) a nagyobb előtolás esetében nagyobbak várható a felületi érdesség, míg a (ii) fordulatszámnak és fogásmélységnek a növelésére csökken a várható felületi érdesség. Az előtolásnak közvetlen, analitikus geometriával levezethető érdességnövelő hatása várható volt [14]. A nagyobb fordulatszámon a feltehetően kilágyult polimer forgácsolt felülete kevesebb rideg töreftelületet és repedést tartalmazhatott, ezért az érdesség is kisebb. Noha a térhálós polimerek ridegebben viselkednek forgácsleválasztáskor, mint a hőre lágyulók [11], a térhálós polimerek is hajlamosak a forgácsoláshoz kapcsolódó elkenődésre, ami elfedheti az esetleges érdességvölgyeket [12]. A fogásmélység felületi érdességre gyakorolt hatásának érdemi magyarázata további vizsgálatokat igényel. ANOVA vizsgálatok alapján az előtolás, fordulatszám és fogásmélység főhatása is szignifikáns volt az átlagos felületi érdességre (F-értékek rendre: 104,57; 7,83; 43,57; P-értékek rendre: 0,000; 0,009; 0,000) és az érdességmagasságra (F-értékek rendre: 109,78; 7,71; 39,43; P-értékek rendre: 0,000; 0,009; 0,000) is. A vizsgált faktortérben az előtolásnak volt a legnagyobb hatása az érdességjellemzőkre, amit a fogásmélység követ.



3. ábra. A vizsgált faktorok ( $f$ ,  $n$ ,  $a_p$ ) főhatása az (a) átlagos felületi érdességre ( $Ra$ ) és (b) érdességmagasságra ( $Rz$ ), valamint a főhatások és interakciók szignifikanciájának szemléltetése Pareto diagrammal az (c)  $Ra$  és (d)  $Rz$  vonatkozásában

A forgácsolt felületet jellemző  $Rz/Ra$  arányszámot szemlélteti a 4. ábra. A kvázi-homogén anyagszerkezetű anyagok forgácsolásához [15] hasonlóan, az általunk esztergált epoxy gyanta  $Rz/Ra$  aránya is az  $Rz/Ra=4$  nominális érték körül szór. Az  $f=0,4$  mm előtolással forgácsolt felületek esetében 3,67, míg az  $f=0,02$  mm előtolással forgácsolt felületek esetében 5,23 nagyságú az arányszám. Az adatokon egyutas ANOVA vizsgálatot végeztünk és a számolt 10,49 F- és 0,002 P-értékek alapján kijelenthető, hogy a két vizsgált előtoláshoz tartozó  $Rz/Ra$  arányszámok szignifikánsan eltérőek. Tehát a nagyobb előtolás esetében nagyobb arányban nőtt az átlagos felületi érdesség, mint az érdességmagasság, amely tendencia megértése további vizsgálatokat igényel.



4. ábra. Az érdességmagasság ( $Rz$ ) az átlagos felületi érdesség ( $Ra$ ) függvényében

#### 4. KONKLÚZIÓK

Az FRP kompozitok forgácsolástechnológiai tervezésének támogatása érdekében ebben a kutatásban térhálós epoxy gyanta forgácsolhatóságát vizsgáltuk hosszesztergálási kísérletekkel. Az előtolást, a forgácsolási sebességet és a fogásmélységet variáltuk kétszintes teljes faktoriális kísérletterv alapján. A kísérleti eredmények ANOVA vizsgálata alapján megmutattuk mindhárom vizsgált faktor hatásának módját, nagyságát és szignifikanciáját. A vizsgált faktortérben a fogásmélységnek volt a legnagyobb hatása a forgácsoló erőre, míg az előtolás hatása volt a legnagyobb a vizsgált érdességi jellemzőkre. A forgácsolt felületek minőségének kiterjesztett vizsgálata indokolt a jövőben, hogy a vonatkozó hatásokat és mechanizmusokat megérthessük.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a kutatás az USA és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző 2021-1.2.4-TÉT-2021-00050 támogatásnak köszönhetően valósult meg, valamint a Kulturális és Innovációs és Minisztérium ÚNKP-23-3-II-BME-227 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Ez a kutatás az Európai Unió által támogatott EPIC 739592 azonosítójú H2020 projekt támogatásnak köszönhetően valósult meg.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Geier N, Paulo Davim J, Szalay T. Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2019;125:105552. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105552>.
- [2] Czigány T. Special manufacturing and characteristics of basalt fiber reinforced hybrid polypropylene composites: Mechanical properties and acoustic emission study. *Composites Science and Technology* 2006;66:3210–20. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.07.007>.
- [3] Czél G. Development of bi-directional pseudo-ductile glass/carbon-epoxy hybrid composites for improved safety in structural applications. *Composites Part B: Engineering* 2022;231:109546. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109546>.
- [4] Abrão AM, Faria PE, Rubio JCC, Reis P, Davim JP. Drilling of fiber reinforced plastics: A review. *Journal of Materials Processing Technology* 2007;186:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.146>.
- [5] Sauer K, Hertel M, Fickert S, Witt M, Putz M. Cutting parameter study of CFRP machining by turning and turn-milling. *Procedia CIRP* 2020;88:457–61. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.079>.
- [6] Abhishek K, Datta S, Mahapatra SS. Optimization of MRR, Surface Roughness, and Maximum Tool-Tip Temperature during Machining of CFRP Composites. *Materials Today: Proceedings* 2017;4:2761–70. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.154>.
- [7] Xu J, An Q, Cai X, Chen M. Drilling machinability evaluation on new developed high-strength T800S/250F CFRP laminates. *Int J Precis Eng Manuf* 2013;14:1687–96. <https://doi.org/10.1007/s12541-013-0252-2>.
- [8] Alauddin M, Choudhury IA, El Baradie MA, Hashmi MSJ. Plastics and their machining: A review. *Journal of Materials Processing Technology* 1995;54:40–6. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01917-0](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01917-0).
- [9] Xiao KQ, Zhang LC. The role of viscous deformation in the machining of polymers. *International Journal of Mechanical Sciences* 2002;44:2317–36. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(02\)00178-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(02)00178-9).
- [10] Gubbels GPH. Diamond turning of glassy polymers. Phd Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e). Technische Universiteit Eindhoven, 2006. <https://doi.org/10.6100/IR613637>.
- [11] Ahmad J. *Machining of Polymer Composites*. Springer US; 2009.
- [12] Ashworth S, Fairclough JPA, Sharman ARC, Meredith J, Takikawa Y, Scaife R, et al. Varying CFRP workpiece temperature during slotting: Effects on surface metrics, cutting forces and chip geometry. *Procedia CIRP* 2019;85:37–42. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.09.021>.
- [13] Jia Z, Fu R, Wang F, Qian B, He C. Temperature effects in end milling carbon fiber reinforced polymer composites. *Polymer Composites* 2018;39:437–47. <https://doi.org/10.1002/pc.23954>.
- [14] Geier N, Pereszlai C. Analysis of characteristics of surface roughness of machined CFRP composites. *Periodica Polytechnica* 2020;64:67–80. <https://doi.org/10.3311/PPme.14436>.
- [15] Palásti-Kovács B, Sipos S, Czifra Á. 'Rz=4xRa' and other roughness parameters in the evaluation of machined surfaces. 13th International Conference on Tools Miskolc 2012.