

Óbudai Egyetem

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

ÚJ ERŐMODELL FINOMESZTERGÁLÁS ESETÉN

Szerző:

Lukács Judit

gépészmérnök BSc. szak, V. évf.

Konzulensek:

Horváth Richárd

tanársegéd

Nikitscher Tamás

intézeti mérnök

Budapest, 2014.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Forgácsolás erőtani viszonyai	4
2.1. Forgácsolás erőviszonyai.....	4
2.2. Forgácsolási erő, Kienzle-Victor modell ismertetése.....	5
2.3. Forgácsolási erőmodell finomsztergálás technológiájára	9
3. Forgácsolási kísérletek.....	13
3.1. Felhasznált anyagok	13
3.2. Felhasznált szerszámok	14
3.3. Felhasznált szerszámgép.....	15
3.4. Erőmérő	15
3.5. Kísérletterv	15
4. Eredmények kiértékelése	19
4.1. F_c erőkomponens vizsgálata	23
4.2. F_f erőkomponens vizsgálata	32
4.3. F_p erőkomponens vizsgálata.....	38
5. Konklúzió.....	45
6. Irodalomjegyzék	47

1. Bevezetés

A forgácsoláskor fellépő erőhatások ismerete nagy jelentőséggel bír. Az adott eljárástól függően nagy befolyással vannak a szerszám gép terhelésére, valamint a munkadarab deformálódására (karcsú tengelyek kihajlása). Meghatározásuknak legpontosabb módszere a mérés. Alkalmazása azonban számos nehézségbe ütközik: nem alkalmazható a tömegtermelésben, költség- és időigényes. Ezért van szükség a technológia sajátosságait is figyelembe vevő erőmodellekre. Ezen számítóképletek már a technológia tervezésében is jól alkalmazhatóak.

Az esztergáláskor fellépő erőhatások az anyagjellemzőkön és forgácsolási adatokon kívül erősen függenek a forgács alakját (vastagság és szélesség) meghatározó szerszám élgeometriájától. A finomesztergálás körülményei között szinte kizárólag a szerszám csúcsgara vesz részt a forgácsleválasztásban.

A dolgozat bemutatja a finomesztergálás technológiáját, és geometriai viszonyait. Geometriai megfontolások alapján olyan forgácsjellemzőket vezet be, amelyekkel egzakt módon leírható a csúcsgáron történő finomesztergálás, mégpedig a beállított forgácsolási adatok függvényében. Különféle iparban gyakran alkalmazott, de teljesen eltérő jellegű anyagtípusokon (szerkezeti acél, korrózióálló acél, nyomásosan öntött alumínium) erőtani vizsgálatokat végez, majd kifejezetten erre a technológiai esetre olyan új matematikai modellt hoz létre, amellyel a technológiai előtervezés során a várható erőhatások nagyon jó közelítéssel becsülhetőek.

2. Forgácsolás erőtanai viszonyai

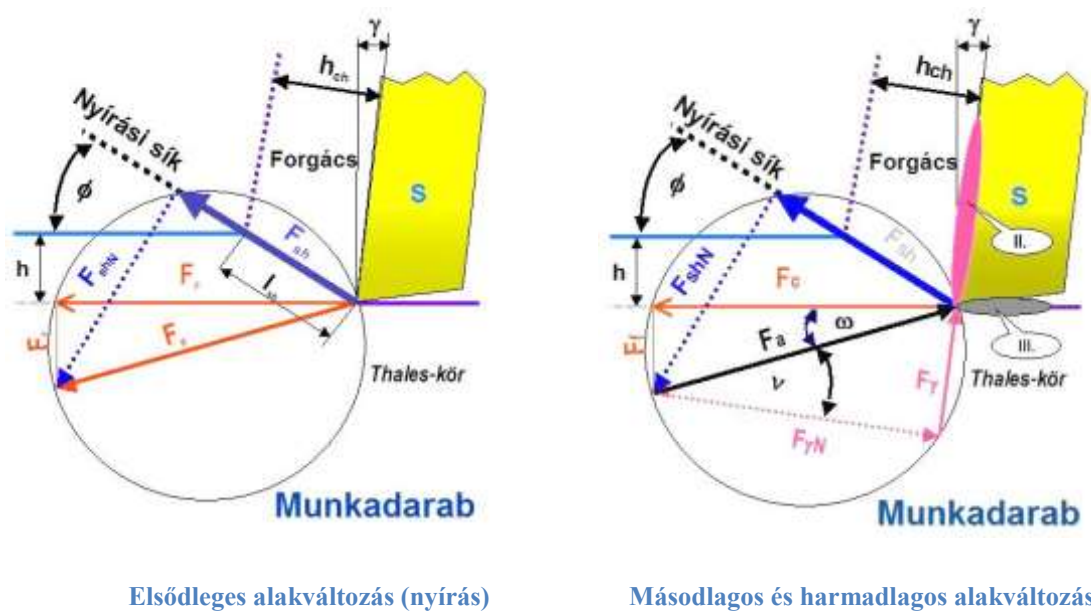
2.1. Forgácsolás erőviszonyai

Szabadforgácsolás esetén, amikor maga a szerszámcsúcs nem vesz részt a forgács leválasztásban, síkbeli erőrendszer keletkezik, amely mozgásirányokba eső komponensekből áll. Ezek vektoriális eredője az aktív erő, amely a Thales-kör segítségével az alábbi módon határozható meg [1]:

$$F_a = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} = \sqrt{F_\gamma^2 + F_{\gamma N}^2} = \sqrt{F_{sh}^2 + F_{shN}^2} (N) \quad (1)$$

A mozgások irányába eső erővektorok által bezárt segédszög meghatározható az (1) egyenlet összefüggésének felhasználásával:

$$\omega = \arctg\left(\frac{F_f}{F_c}\right) (\circ) \quad (2)$$



1. ábra: A forgácsolás erőviszonyai [2]

A 1. ábrán látható módon ugyanebben a Thales-körben helyezkednek el a nyírási erő, valamint a súrlódási erő összetevői is.

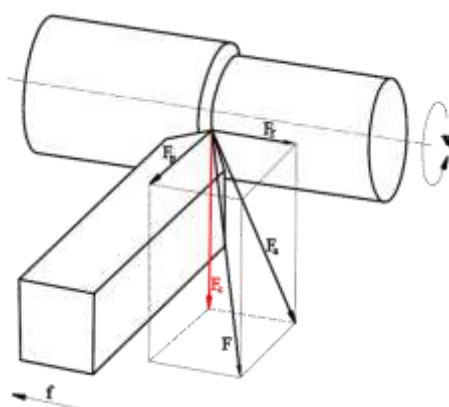
Az ipari gyakorlatban a szabadforgácsolás esete meglehetősen ritkán áll fenn, ezért célszerűbb a kötött forgácsolást vizsgálni, amikor maga a szerszámcsúcs aktívan részt vesz a forgácsleválasztás folyamatában. Ekkor már térbeli erőrendszer jön létre, ahol az aktív erő

mellett jelentős mértékű - a fogásvétel irányába ható, a forgács leválasztásában azonban részt nem vevő - passzív erő is ébred.

Ebben az esetben a három erővektor eredője az alábbi képlet szerint határozható meg:

$$F = \sqrt{F_a^2 + F_p^2} = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} (N) \quad (3)$$

Hagyományos körülmények között végzett forgácsoláskor a komponensek irányát, illetve a köztük felírható arányt - mely nagymértékben függ többek között a szerszám élelrendezésétől is - szemlélteti a 2. ábra:



$$F_c : F_p : F_f = 100 : (25 \dots 40) : (25 \dots 32) [11]$$

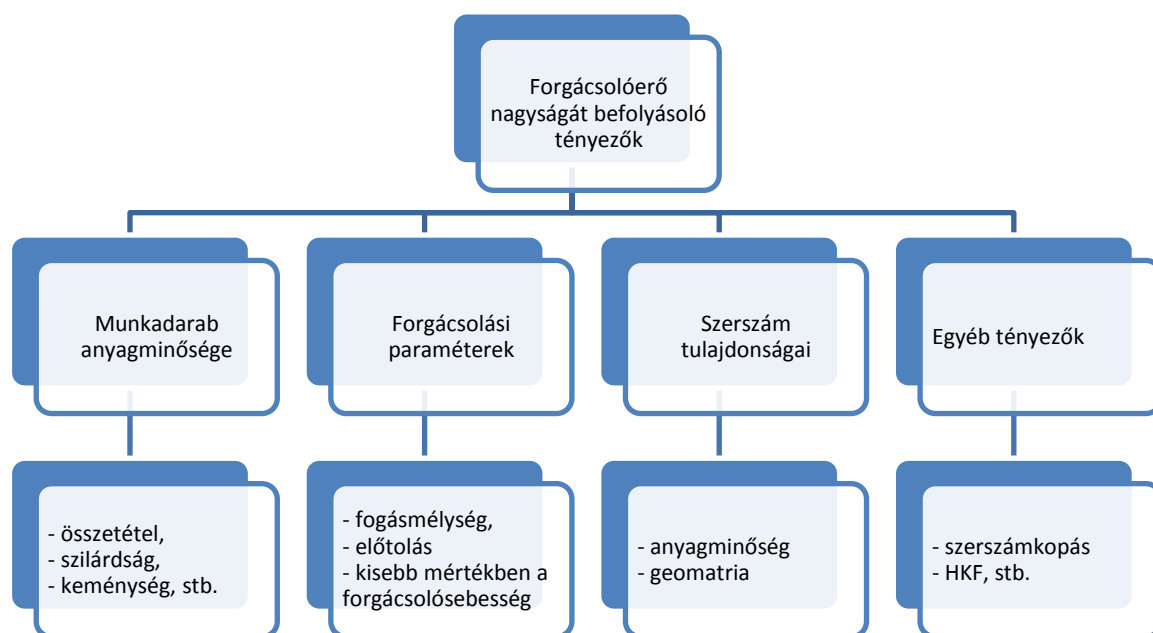
2. ábra: Kötött forgácsoláskor ébredő térbeli erőrendszer

Ebben az esetben már a szerszámmeghatározó rendszerben meghatározottaktól eltérő, működő szerszámszögek alkalmazandóak.

A passzív erő a forgács leválasztásában ugyan nem vesz részt, viszont nagymértékben befolyásolja a gyártmány méretpontosságát. A forgácsolóerő érintőlegesen hat, a passzív erő viszont a fogásvétel irányában deformálja munkadarabot. Bizonyos esetekben (kopott szerszám, nagy keménységű anyag megmunkálása) értéke meg is haladhatja a főforgácsolóerőt.

2.2. Forgácsolási erő, Kienzle-Victor modell ismertetése

A forgácsolóerő nagysága alapvetően négy dologtól függ, melyek a 3. ábrán látható módon a munkadarab, a szerszám, illetve a megmunkálás különböző paraméterei.



3. ábra: Forgácsolóerő nagyságát befolyásoló tényezők [2]

A forgácsolóerő értékének a meghatározása történhet számítási eljárások, illetve experimentális módszerek segítségével. A közvetett mérésre lehetőség adódik üzemi körülmények között is. Ekkor a hajtómotor teljesítményfelvételéből következtetünk (számítással) a forgácsolóerő (F_c) nagyságára. Közvetlen mérés esetén az erőmérőt célszerű a munkadarab befogókészülékében, vagy a szerszámtartóban elhelyezni.

A gyakorlatban legelterjedtebb alkalmazás a nyúlásmérő bélyeges és a piezoelektromos elven történő erőmérés. Az előbbiek közül kétféle elrendezés jellemző. A legegyszerűbb módszer, hogy a bélyegeket a késszárra ragasztják. Ez a főforgácsolóerő mérésére alkalmas, ami a késszár függőleges síkban való lehajlását okozza. Fetecau és társai nevéhez fűződik az ezzel a módszerrel történő, PTFE kísérleti forgácsolása során fellépő, csekély nagyságú erők mérése [3]. A másik konstrukciós változatnál erőmérő asztal közbeiktatásával rögzítik a szerszámbe fogót a szánrendszerhez. Erre az elrendezésre mutat be saját fejlesztésű kivitelt Süleyman és társai [4].

A piezoelektromos elven alapuló erőmérés kiindulási jelensége az, hogy bizonyos kristályos anyagokban (pl. SiO_2) erő hatására töltésátrendeződés megy végbe, így ennek következményeként két párhuzamos felület között elektromos feszültség keletkezik. Természetesen a folyamat fordítottja is igaz: a kristályra feszültséget kapcsolva, az deformálódni fog. A piezo elven történő erőmérés lehet egy, illetve többkomponenses. Amennyiben a jeladók a tárgyasztalba vannak beépítve, akkor a munkadarabra ható erőket mérik. Ha van rá lehetőség, célszerű azonban a szerszám szárában, közvetlenül forgácsolólól

alatt elhelyezni. Erre mutat példát Horváth és társai, akik a finomsztergálás technológiai tartományában történő pontos erőmérés nehézségeinek kiküszöbölésére fejlesztettek ki egy piezoelektromos elven működő, 0...100 N-os erőtartományban tizedes pontosságú mérésekre alkalmas erőmérő cellát [5]. A forgácsolási kísérleteket és az erőtan vizsgálatokat ezzel a speciálisan finomsztergálás jellemzésére kialakított erőmérővel végeztem.

A forgácsolóerő mérésére alkalmas, fentiekben ismertetett módszerek előnye, hogy nagy pontosságúak és elterjedtek. Hátrányuk viszont, költségigényesek és hosszadalmasak. Emellett a termelésben való alkalmazhatóságuk problémás. Ezért van szükség az erőértékek becslésére az adott technológiai körülmények (szerszám, munkadarab, eljárás, stb) ismeretében.

Számos tanulmány foglalkozik a forgácsolási paraméterek, valamint a fellépő erőhatások közötti összefüggéseket. Ezek egyike Rao és társai nevéhez fűződik [12], akik AISI 1050 acélt esztergáltak kerámia szerszámmal. Méréseik alapján az alábbi következtetésekre jutottak:

- a forgácsolósebesség nagysága sem az erőkomponensekre, sem pedig a felületi érdességre nincs jelentős hatással;
- az előtolás értéke mindkettőt számottevően befolyásolja;
- a forgácsolóerő összetevőinek fogásmélységtől való függése lényeges, a felületi érdességé azonban elhanyagolható.

A forgácsolási folyamat stabilitását nagymértékben befolyásolják a fajlagos forgácsolóerő különböző irányú komponensei. Ezek azonban a beállított paraméterek módosításával változnak. Tang és társa kísérleti úton vizsgálta esztergáláskor a fajlagos forgácsolóerő komponenseinek nagyságát a nyírási zónában végbemenő forgácsképződés alapján. Az egyes összetevők értékét a forgácsolási paraméterek alapján jósolták [13].

Hamdi és társai a forgácsolási paraméterek és a munkadarab keménységének a felületi érdességre, valamint az erőhatásokra gyakorolt befolyását kutatta. Edzett acélt esztergáltak CBN szerszámmal [14]. A válaszfelületek módszerével alkottak matematikai erő- és érdességmodelleket. Eredményeik alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a forgácsolóerő komponenseinek nagysága elsősorban a fogásmélységtől, valamint a munkadarab keménységétől függenek.

A forgácsolóerő összetevőinek értéke szoros kapcsolatban áll a képződő hőmennyiséggel, a szerszámkopással, a megmunkált felület minőségével, valamint a munkadarab elvárt méretpontosságával. De Augustina és társai alumínium szárazforgácsolásakor vizsgálták a forgácsolási paraméterek, valamint a szerszám csúcssugarának a az erőhatásokra gyakorolt

hatását [15]. Eredményeik alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a beállított értékek módosításaira F_c komponens a legérzékenyebb. Ezenfelül kis előtolás esetén a különböző csúcssugarú szerszámok a fellépő erőértékek szempontjából hasonlóan viselkedtek.

A legelterjedtebben alkalmazott, mechanikai analógián alapuló erőmodell Kienzle és Victor nevéhez fűződik [6]. A modell számításának alapját könnyen meghatározható paraméterek, a forgácskeresztmetszet jellemzői adják:

$$F_c = k_c \cdot A = k_c \cdot a \cdot f = k_c \cdot b \cdot h(N) \quad (4)$$

ahol k_c - fajlagos forgácsolóerő, ($\frac{N}{mm^2}$);

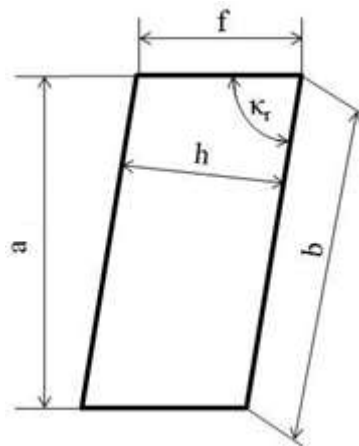
f - előtolás, (mm);

a - fogásmélység, (mm);

b - elméleti forgács szélesség, (mm);

h - elméleti forgácsvastagság, (mm).

A Kienzle-Victor erőmodell számításához felhasznált forgácskeresztmetszetet mutatja a 4. ábra:



4. ábra: Jellemző forgácsgeometria esztergáláskor [7]

A leválasztott forgács geometriája a főélelhelyezési szög (κ_r) függvényében az alábbi módon határozható meg:

$$h = f \cdot \sin \kappa_r (mm) \quad (5)$$

$$b = \frac{a}{\sin \kappa_r} (mm) \quad (6)$$

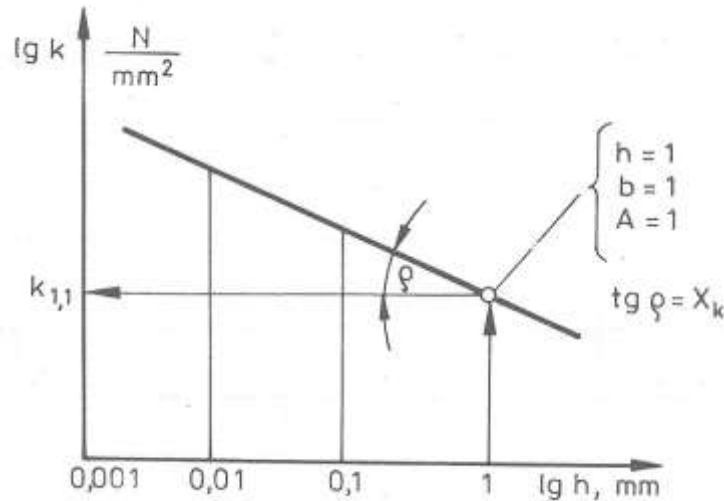
Bevezették a fajlagos forgácsolóerő főértékét, melynek meghatározása kísérleti úton történik, a (7) egyenlet szerint:

$$k_c = \frac{k_{c1.1}}{h^{q_c}} \left(\frac{N}{\text{mm}^2} \right) \quad (7)$$

ahol $k_{c1.1}$ - fajlagos forgácsolóerő főértéke $b = 1 \text{ (mm)} \cdot h = 1 \text{ (mm)}$ méretű forgács esetén, $\left(\frac{N}{\text{mm}^2} \right)$

h - elméleti forgácsvastagság, (mm)

q_c - forgácsvastagság kitevője



5. ábra: Fajlagos forgácsolóerő az elméleti forgácsvastagság függvényében

Ha logaritmikus léptékű diagramon ábrázoljuk a fajlagos forgácsolóerőt az elméleti forgácsvastagság függvényében, a grafikon képe (lásd 5. ábra) egy egyenes lesz. Ennek a meredeksége ($\tan \rho = q_c$) a hatványkitevőt, együtthatója pedig a fajlagos főforgácsolóerő főértékét fogja meghatározni.

A tényleges körülmények figyelembe vétele korrekciós tényezők (ΠF_{cj}) segítségével történik.

A forgácsolóerő meghatározására szolgáló képlet tehát:

$$F_c = k_c \cdot A \cdot \Pi F_{cj} = \frac{k_{c1.1}}{h^{q_c}} \cdot b \cdot h \cdot \Pi F_{cj} = k_{c1.1} \cdot h^{1-q_c} \cdot b \cdot \Pi F_{cj}(N) \quad (8)$$

2.3. Forgácsolási erőmodell finomsztergálás technológiájára

A finomsztergálás korábban a könnyűfémek és ötvözetek, valamint kompozit anyagok forgácsolására alkalmas technológiaként volt számon tartva. A szerszáminnovációnak köszönhetően azonban mára már lehetővé vált az acél, illetve öntöttvas ily módon történő megmunkálása is.

A technológia sajátossága a kismértékű előtolás ($f = 0,008 \dots 0,15 \text{ (mm)}$) és fogásmélység ($a = 0,05 \dots 0,3 \text{ (mm)}$), valamint a relatíve nagy forgácsolósebesség (akár a $v_c = 600 \dots 1000 \text{ (}\frac{\text{m}}{\text{min}}\text{)}$ is elérhető).

1. táblázat: Hagyományos és simító esztergálás összehasonlítása [8]

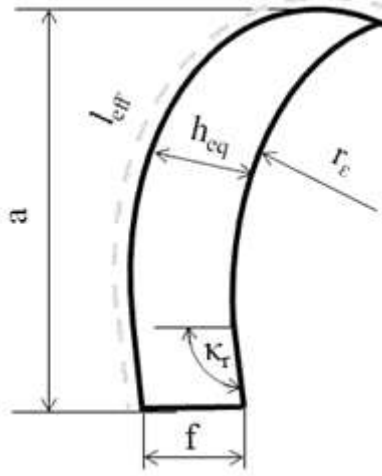
Jellemző	Hagyományos esztergálás	Finomesztergálás
Alakpontosság (mm)	~0,01	~0,001
Felületi érdesség (μm)	Ra>1,25	Ra<1,25
Méretpontosság	>IT6	<IT6
Forgácsoló erő, F_c (N)	1000...10000	1...1000
Forgácskeresztmetszet, A (mm ²)	1...10	0,001...0,01

Az 1. táblázatban található a hagyományos esztergálás és a finomesztergálás technológiai paramétereinek összehasonlítása.

A Kienzle-Victor féle erőmodell csak a viszonylagosan nagy forgácsok tartományában működik, ahol nem teljesül a következő egyenlőtlenség:

$$a < r_e \quad (9)$$

Finomesztergáláskor, az esetek döntő többségében, a forgácsleválasztást szinte kizárólagosan a szerszám csúcscsugara végzi. Az elméleti deformálatlan forgácskeresztmetszet nagyságrendekkel kisebb, mint a Kienzle és Victor által definiált, ezenfelül alakja is lényegesen eltér attól. Itt már nem hanyagolható el a csúcscsugár a forgács méreteinek meghatározásakor. A jellemző forgácskeresztmetszetet szemlélteti a 6. ábra.



6. ábra: Simítóesztergálás tipikus forgácskeresztmetszete [7]

Finomesztergáláskor, ahol teljesül a (9) reláció, nem lehet elméleti forgács szélességgel és forgácsvastagsággal kalkulálni. Ezért szükség van további fogalmak bevezetésére. A fogásban levő, működő élhossz meghatározása az alábbi módon lehetséges [9], [10]:

$$l_{eff} = \frac{a - r_{\epsilon} \cdot (1 - \cos \kappa_r)}{\sin \kappa_r} + \frac{2 \cdot r_{\epsilon} \cdot \pi}{360^\circ} \cdot \left(\kappa_r + \arcsin \frac{f}{2 \cdot r_{\epsilon}} \right) (mm) \quad (10)$$

A beállított forgácsolási paraméterek alapján pedig kiszámítható az ekvivalens forgácsvastagság:

$$A = a \cdot f = b \cdot h = l_{eff} \cdot h_{eq} (mm^2) \quad (11)$$

$$h_{eq} = \frac{A}{l_{eff}} = \frac{a \cdot f}{l_{eff}} (mm) \quad (12)$$

A fajlagos forgácsolóerő meghatározható a forgácsolás erőszükséglete és a leválasztott forgács keresztmetszetének hányadosaként:

$$k_c = \frac{F_c}{A} = \frac{F_c}{a \cdot f} = \frac{F_c}{b \cdot h} = \frac{F_c}{l_{eff} \cdot h_{eq}} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (13)$$

Az érték azonban nem egyértelműen a forgácskeresztmetszet nagyságától ($A = l_{eff} \cdot h_{eq}$), sokkal inkább az egyes geometriai paraméterektől függ (l_{eff} és h_{eq}). Ezért a bevezetett új erőmodellben a fajlagos forgácsolóerő értékét nem a leválasztott forgács keresztmetszete, hanem az alaki jellemzők külön-külön befolyásolják.

$$k_c = C \cdot h_{eq}^{q_c} \cdot l_{eff}^{y_c} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (14)$$

ahol $C = k_{c1.1}$, fajlagos forgácsolóerő főértéke, $\left(\frac{N}{mm^2} \right)$;

$q_c < 0$, ekvivalens forgácsvastagság kitevője;

y_c , működő élhossz kitevője.

A finomesztergálás technológiai paramétereiből adódik, hogy az ekvivalens forgácsvastagság minden esetben lényegesen kisebb 1 mm-nél, ezért a Kienzle-Victor erőmodellben szereplő $k_{c1.1}$, a fajlagos főforgácsolóerő főértéke (az elméleti forgácsvastagság és –szélesség is 1 mm) helyett célszerű lenne bevezetni a $k_{c1.0,1}$ főértéket, ahol $l_{eff} = 1 (mm)$, valamint $h_{eq} = 0,1 (mm)$ [11]:

$$k_{c1.0,1} = C \cdot h_{eq}^{q_c} \cdot l_{eff}^{y_c} = C \cdot 0,1^{q_c} \cdot 1^{y_c} = C \cdot 0,1^{q_c} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (15)$$

Ebből következik, hogy

$$C = k_{c1.1} = \frac{k_{c1.0,1}}{0,1^{q_c}} = k_{c1.0,1} \cdot 10^{q_c} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (16)$$

A (14) fajlagos erőmodellbe a (16) egyenletet behelyettesítve kapjuk a következőt:

$$k_c = k_{c1.0,1} \cdot 10^{q_c} \cdot h_{eq}^{q_c} \cdot l_{eff}^{y_c} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (17)$$

A (4) egyenletbe a (11) és a (17) behelyettesítésével kapjuk tehát a keresett forgácsoló erőmodellt (18).

$$F_c = k_c \cdot A = k_c \cdot h_{eq} \cdot l_{eff} = k_{c1.0,1} \cdot 10^{q_c} \cdot h_{eq}^{1+q_c} \cdot l_{eff}^{1+y_c} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (18)$$

3. Forgácsolási kísérletek

3.1. Felhasznált anyagok

C45 (1.0503)

Ötvözetlen, általános rendeltetésű, szerkezeti acél. Az anyagminőség utólagos hőkezelésre kiválóan alkalmas. Jellemző felhasználási területei az alacsonyabb igénybevételű, autó- és gépipari alkatrészek, valamint a közepes mechanikai igénybevételeknek kitett szerszámok, kopásálló alkatrészek, nyomástartó edények. Az anyagminőség összetételét mutatja be a 2. táblázat.

2. táblázat: C45 kémiai összetétele

Anyag	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cr+Ni +Mo
(%)	0,42 - 0,5	≤ 0,4	0,5 – 0,8	≤ 0,045	≤ 0,045	≤ 0,4	≤ 0,1	≤ 0,4	≤ 0,63

KO36 (1.4541)

Az egyik legelterjedtebben alkalmazott ausztenites korrózióálló acél. Kiválóan hegeszthető és jól megmunkálható. Jellemző felhasználási területe a fokozott mechanikai és vegyi igénybevételnek kitett élelmiszer-, tej- és vegyipari termékek, tartályok, palackok, fegyvergyártás és a repülőgépipar. Az anyagminőség kémiai összetétele látható a 3. táblázatban.

3. táblázat: KO36 vegyi összetétele

Anyag	C	P	S	Si	Mn	Cr	Ni
(%)	≤ 0,8	≤ 0,045	≤ 0,015	≤ 1	≤ 2	17 - 19	9 - 12

AS12

Nyomásosan öntött alumínium ötvözet, mely mind mechanikai, mind technológiai tulajdonságait tekintve kiválónak mondható. Önthetősége és megmunkálhatósága is kiemelkedően jó.

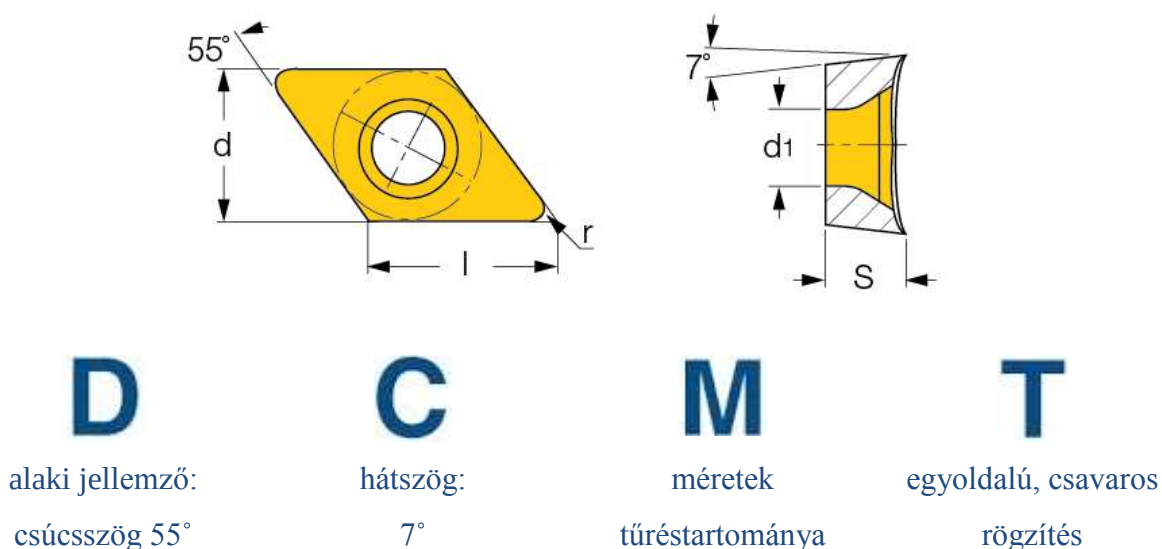
A 4. táblázat tartalmazza az ötvözet vegyi összetételét.

4. táblázat: AS12 kémiai összetétele

Anyag	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti
(%)	12,2 – 13,2	0,35 – 0,55	0,04	0,09	0,04	0,04	0,09	0,09

3.2. Felhasznált szerszámok

Az acélok forgácsolása a TaeguTec által, kifejezetten az erőtani folyamatok vizsgálatára biztosított keményfém lapkákkal történt. Az AS12 alumínium ötvözet forgácsolása pedig TiroTool-tól származó gyémántlapkával történt. Ezek geometriáját szemlélteti a 7. ábra.



7. ábra: DCMT lapkák alaki jellemzői

C45 forgácsolása DCMT 11T304 FG TT8115 CVD bevonatos (TiN/TiCN/Al₂O₃/TiN) keményfémlapkával történt, mely kiváló mértékben kopás- és hőálló. Kifejezetten acélok folyamatos forgácsleválasztást biztosító, nagy sebességű megmunkálásához ajánlott.

KO36 forgácsolása DCMT 11T304 PC CT3000 bevonatmentes CerMet lapkával történt, mely kimondottan acélok és öntöttvasak esztergálására lett kifejlesztve. Kiemelkedően jó kopásállóság, valamint kis súrlódási együttható jellemzi.

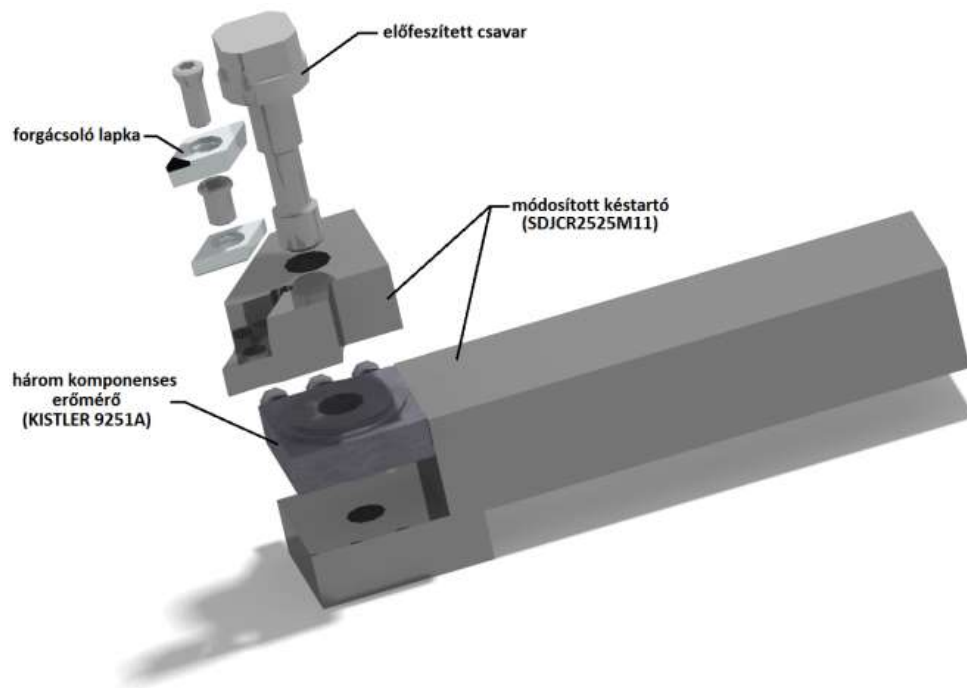
AS12 megmunkálása DCGT 11T304 FL K10 gyémántlapkával történt.

3.3. Felhasznált szerszámgép

A méréseket Dugard Eagle BNC 1800-as sorozatú CNC esztergagépen végeztem, melynek maximális teljesítménye 11 kW, állítható fordulatszám tartománya: $n = 100 \dots 4500 \left(\frac{1}{\text{min}}\right)$.

3.4. Erőmérő

Az erőmérésre egy speciálisan átalakított készárat használtam [5], mely kifejezetten a finomesztergáláskor fellépő kis erők mérésére lett kifejlesztve. A készár (mely mindhárom erőkomponens mérésére alkalmas) egy KISTLER 5019 Multichannel Charge Amplifier, háromcsatornás töltéserősítőhöz lett csatlakoztatva. Ennek konstrukcióját szemlélteti a 8. ábra.



8. ábra: Az erőmérő konstrukciós kialakítása [5]

3.5. Kísérletterv

A dolgozatban olyan kísérletterv került bemutatásra, mely a finomesztergálás teljes tartományát magába foglalja:

$$f = 0,03 \dots 0,15 \text{ (mm)};$$

$$a = 0,25 \dots 0,7 \text{ (mm)}.$$

Több tanulmány foglalkozik forgácsoláskor fellépő erőhatások nagysága, valamint a forgácsolósebesség közötti kapcsolattal. Ezek alapján kijelenthető, hogy szignifikáns

mértékben nincs v_c az összetevők értékére hatással. Ezért a mérések során a forgácsolósebesség anyagféleségenként eltérő, de állandó nagyságúra lett megválasztva.

Megjegyzendő az a tény, hogy a kisebb fogásmélységek esetén kizárólagosan a csúcssugár végzi a forgácsleválasztást és a beállított legnagyobb érték esetén is csupán a főél egy rövid szakasza vesz benne részt.

A kísérletterv alapján meghatározott mérési pontokat tartalmazza a 5. táblázat, melyben beállítási, valamint a leválasztott forgács geometriai paraméterei is összehasonlíthatóak.

Mindhárom anyagféleség esetében a fogásmélység értékei 3 ($a_1=0,25$ (mm); $a_2=0,5$ (mm); $a_3= 0,7$ (mm)), míg az előtolás 7 lépcsőben ($f_1=0,03$ (mm); $f_2=0,05$ (mm); $f_3=0,07$ (mm); $f_4=0,09$ (mm); $f_5=0,11$ (mm); $f_6=0,13$ (mm); $f_7=0,15$ (mm)) lettek állítva.

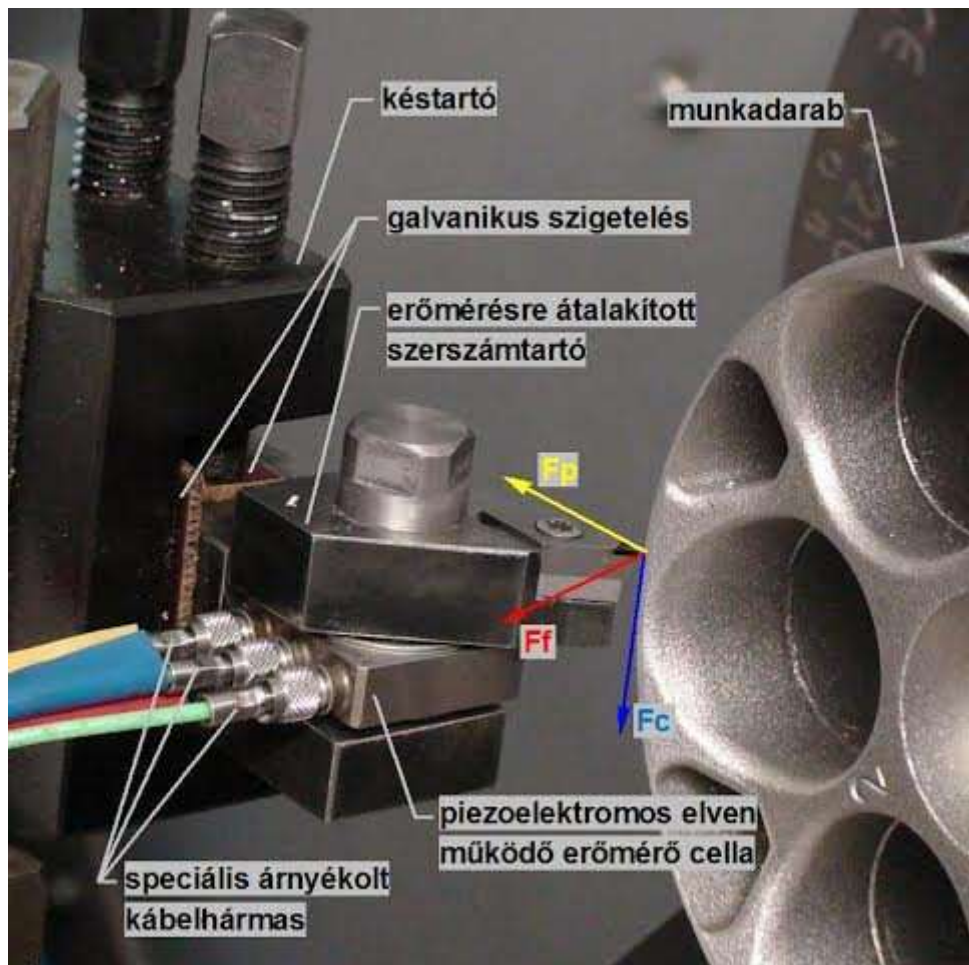
A létrehozott kísérlettervben a az ekvivalens forgácsvastagság folyamatosan növekvő értéket vesz fel.

5. táblázat: A kísérlet során felvett mérési pontok

Mérési pont	a (mm)	f (mm)	l_{eff} (mm)	h_{eq} (mm)	$A = a \cdot f$	$A = l_{\text{eff}} \cdot h_{\text{eq}}$
1.	0,25	0,03	0,493	0,015	0,0075	0,0075
2.	0,25	0,05	0,503	0,025	0,0125	0,0125
3.	0,25	0,07	0,513	0,034	0,0175	0,0175
4.	0,25	0,09	0,523	0,043	0,0225	0,0225
5.	0,25	0,11	0,533	0,052	0,0275	0,0275
6.	0,25	0,13	0,543	0,060	0,0325	0,0325
7.	0,25	0,15	0,554	0,068	0,0375	0,0375
8.	0,5	0,03	0,743	0,020	0,015	0,015
9.	0,5	0,05	0,753	0,033	0,025	0,025
10.	0,5	0,07	0,763	0,046	0,035	0,035
11.	0,5	0,09	0,774	0,058	0,045	0,045
12.	0,5	0,11	0,784	0,070	0,055	0,055
13.	0,5	0,13	0,794	0,082	0,065	0,065
14.	0,5	0,15	0,804	0,093	0,075	0,075
15.	0,7	0,03	0,944	0,022	0,021	0,021
16.	0,7	0,05	0,954	0,037	0,035	0,035
17.	0,7	0,07	0,964	0,051	0,049	0,049
18.	0,7	0,09	0,974	0,065	0,063	0,063
19.	0,7	0,11	0,984	0,078	0,077	0,077
20.	0,7	0,13	0,994	0,092	0,091	0,091
21.	0,7	0,15	1,004	0,105	0,105	0,105

A mérés elrendezését szemlélteti a 9. ábra. Jól látható, hogy a piezoelektromos elven működő erőmérő cella közvetlenül a forgácsolóél alatt helyezkedik el, ami a tárgyasztalba történő beépítésnél lényegesen előnyösebb megoldás.

Az ábrán feltüntetésre kerültek a fellépő erőhatások, valamint azok iránya is.



9. ábra: A mérések elrendezése [5]

4. Eredmények kiértékelése

A kísérlettervben meghatározott módon, a mérés elvégzésével DynoWare szoftver segítségével kiértékeltem a kapott erőket. Mindhárom erőkomponens feldolgozásra került. Az 6., 7. és 8. táblázat mutatja a vizsgált alapanyagok forgácsolóerő értékeit, illetve a fajlagos forgácsoló értékeit a különböző irányokban, melyeket az alábbi módon határoztam meg.

$$k_c = \frac{F_c}{A} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (19)$$

$$k_f = \frac{F_f}{A} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (20)$$

$$k_p = \frac{F_p}{A} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (21)$$

6. táblázat: Mért erőértékekből számított fajlagos forgácsoló erők C45 esetén

Mérési pont	v_c (m/min)	$A = l_{eff} \cdot h_{eq}$	F_c (N)	F_p (N)	F_f (N)	k_c (N/mm ²)	k_p (N/mm ²)	k_f (N/mm ²)
1.	300	0,0075	41,19	41,12	32,95	5492,00	5482,67	4393,33
2.	300	0,0125	50,94	50,2	35,97	4075,20	4016,00	2877,60
3.	300	0,0175	62,98	57,06	39,42	3598,86	3260,57	2252,57
4.	300	0,0225	70,2	63,8	40,02	3120,00	2835,56	1778,67
5.	300	0,0275	78,24	66,17	40,14	2845,09	2406,18	1459,64
6.	300	0,0325	88,35	71,57	41	2718,46	2202,15	1261,54
7.	300	0,0375	100	75,58	42,38	2666,67	2015,47	1130,13
8.	300	0,015	70	44,87	72,34	4666,67	2991,33	4822,67
9.	300	0,025	95,9	54,73	81,05	3836,00	2189,20	3242,00
10.	300	0,035	125,5	63,76	89,15	3585,71	1821,71	2547,14
11.	300	0,045	142	73,03	93,94	3155,56	1622,89	2087,56
12.	300	0,055	160,8	82,23	103,5	2923,64	1495,09	1881,82
13.	300	0,065	183,5	95,12	110,6	2823,08	1463,38	1701,54
14.	300	0,075	214	104,3	117,5	2853,33	1390,67	1566,67
15.	300	0,021	90,74	40,88	92,38	4320,95	1946,67	4399,05
16.	300	0,035	124	51,43	109	3542,86	1469,43	3114,29
17.	300	0,049	167,9	59,7	122	3426,53	1218,37	2489,80
18.	300	0,063	185	70,49	134,9	2936,51	1118,89	2141,27
19.	300	0,077	216,2	80,72	148,4	2807,79	1048,31	1927,27
20.	300	0,091	246	92,73	154,3	2703,30	1019,01	1695,60
21.	300	0,105	288	103	162,4	2742,86	980,95	1546,67

7. táblázat: Mért erőértékekből számított fajlagos forgácsoló erők KO36 esetén

Mérési pont	v_c (m/min)	$A = l_{eff} \cdot h_{eq}$	F_c (N)	F_p (N)	F_f (N)	k_c (N/mm ²)	k_p (N/mm ²)	k_f (N/mm ²)
1.	210	0,0075	46,14	58,46	41,9	6152,00	7794,67	5586,67
2.	210	0,0125	53,78	60,86	37,95	4302,40	4868,80	3036,00
3.	210	0,0175	68,15	62,69	38,82	3894,29	3582,29	2218,29
4.	210	0,0225	75	66,2	40,46	3333,33	2942,22	1798,22
5.	210	0,0275	83,52	74,56	40,52	3037,09	2711,27	1473,45
6.	210	0,0325	89,49	76,93	40,77	2753,54	2367,08	1254,46
7.	210	0,0375	99,25	79,44	41,24	2646,67	2118,40	1099,73
8.	210	0,015	75,6	56,32	82,3	5040,00	3754,67	5486,67
9.	210	0,025	102	59,84	93,78	4080,00	2393,60	3751,20
10.	210	0,035	128,3	62,72	102,2	3665,71	1792,00	2920,00
11.	210	0,045	155	65,9	107,2	3444,44	1464,44	2382,22
12.	210	0,055	170,8	67,5	110,2	3105,45	1227,27	2003,64
13.	210	0,065	196,4	70,02	113,6	3021,54	1077,23	1747,69
14.	210	0,075	222,8	79,08	118,4	2970,67	1054,40	1578,67
15.	210	0,021	105	44,4	137,5	5000,00	2114,29	6547,62
16.	210	0,035	145,8	47,2	169,8	4165,71	1097,14	4851,43
17.	210	0,049	195,4	50,3	184,9	3987,76	819,18	3773,47
18.	210	0,063	219,3	53,8	207,4	3480,95	618,41	3292,06
19.	210	0,077	265,3	55,3	220	3445,45	453,77	2857,14
20.	210	0,091	293	58,9	225	3219,78	403,41	2472,53
21.	210	0,105	351,5	64,9	264	3347,62	410,95	2514,29

8. táblázat: Mért erőértékekből számított fajlagos forgácsolóerők AS12 esetén

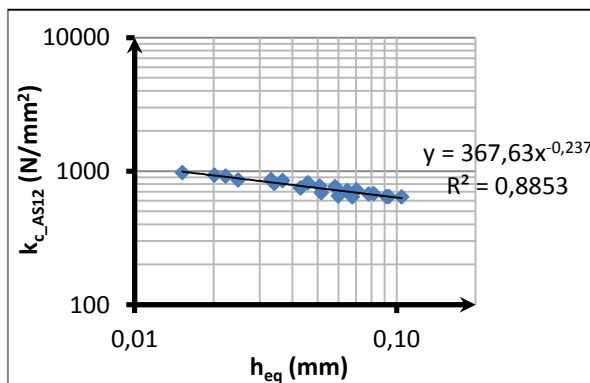
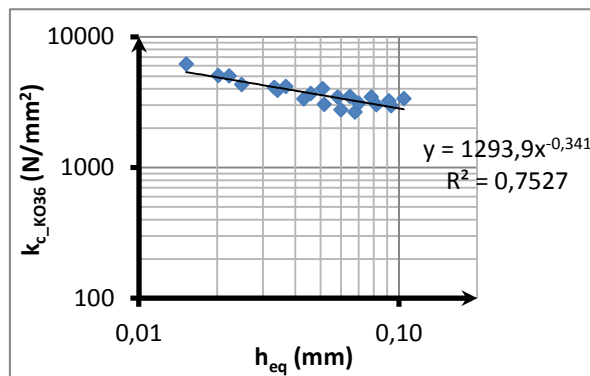
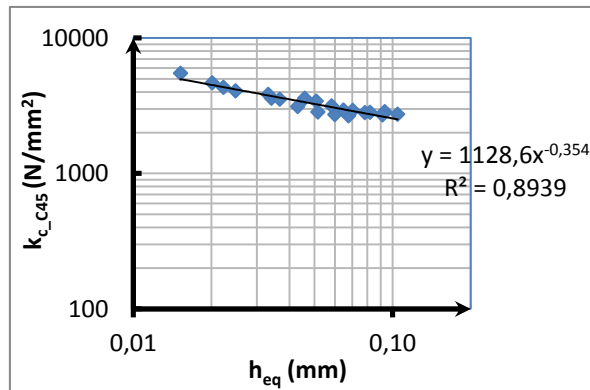
Mérési pont	v_c (m/min)	$A = l_{eff} \cdot h_{eq}$	F_c (N)	F_p (N)	F_f (N)	k_c (N/mm ²)	k_p (N/mm ²)	k_f (N/mm ²)
1.	600	0,0075	7,31	3,2	2,44	974,40	426,67	324,93
2.	600	0,0125	10,72	4,03	3,08	857,60	322,40	246,64
3.	600	0,0175	14,14	4,81	3,57	808,00	274,74	203,89
4.	600	0,0225	16,8	5,46	3,99	746,67	242,49	177,33
5.	600	0,0275	18,89	5,89	4,10	686,91	214,29	149,16
6.	600	0,0325	21,14	6,29	4,43	650,46	193,60	136,15
7.	600	0,0375	23,99	7,13	4,87	639,63	190,19	129,84
8.	600	0,015	13,96	2,79	5,80	930,67	186,47	386,60
9.	600	0,025	21,53	3,86	7,28	861,20	154,24	291,16
10.	600	0,035	28,53	4,88	8,62	815,14	139,43	246,23
11.	600	0,045	34,48	5,23	9,50	766,22	116,31	211,02
12.	600	0,055	39,75	5,77	10,3	722,73	104,98	187,27
13.	600	0,065	44,08	6,02	10,53	678,15	92,66	162,00
14.	600	0,075	48,25	6,34	10,84	643,33	84,49	144,53
15.	600	0,021	19,26	2,71	8,29	917,14	129,00	394,71
16.	600	0,035	29,78	3,89	11,3	850,86	111,09	322,86
17.	600	0,049	37,81	4,79	12,97	771,67	97,80	264,69
18.	600	0,063	45	5,09	14,08	714,29	80,78	223,49
19.	600	0,077	51,86	5,59	14,77	673,51	72,53	191,82
20.	600	0,091	58,48	5,83	14,82	642,64	64,09	162,86
21.	600	0,105	67,16	5,88	15,95	639,62	55,99	151,90

A táblázatokból jól látszik, hogy, a csúcsugáron való forgácsolásnál – az acélok esetén – közelítőleg megegyeznek az erők (elsősorban F_c erőkomponens esetében), a különbség akkor lesz számottevő mikor nagyobb fogásvételnél már a főél is szerepet kap a forgácsleválasztásban.

Ezzel szemben az alumínium forgácsolásakor mért erők (lásd 8. táblázat), mindhárom komponens tekintetében, nagyságrendi különbséget mutatnak az 6. és 7. táblázatban szereplő értékekhez képest.

4.1. F_c erőkomponens vizsgálata

A 6., 7. és 8. táblázat fajlagos főforgácsolóerő értékeit az ekvivalens forgácsvastagság függvényében logaritmikus léptékű diagramon ábrázolva a függvények képeként minden anyagféleség esetén egy-egy egyenest kaptam, melyek a 10. ábrán láthatók.



10. ábra: Logaritmikus léptékű erődiagramok

A Kienzle-Victor féle erőmodellből az első bevezetésre szánt erőmodell esetében a fajlagos forgácsolóerőt az ekvivalens forgácsvastagság segítségével a (22) egyenlet alapján próbáltam meghatározni.

$$k_c = C \cdot h_{eq}^{q_c} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (22)$$

A (22) egyenlet alapján elvégzett hatványfüggvény-regresszió során kapott konstansok értékét a 9. táblázat tartalmazza.

9. táblázat: (22) egyenletben szereplő konstansok értékei

	C_c	q_c
C45	1036	-0,382
KO36	1156	-0,378
AS12	370	-0,235

A (22) modell szerint jósolt fajlagos forgácsolóerőértékeket, valamint a mért értékhez viszonyított relatív hibát szemlélteti a 10. táblázat.

10. táblázat: (22) egyenlet segítségével jósolt fajlagos forgácsolóerő értékek

Mérési pont	k_{c_C45} (N/mm ²)	k_{csz_C45} (N/mm ²)	Hiba k_{c_C45} (%)	k_{c_KO36} (N/mm ²)	k_{csz_KO36} (N/mm ²)	Hiba k_{c_KO36} (%)	k_{c_AS12} (N/mm ²)	k_{csz_AS12} (N/mm ²)	Hiba k_{c_AS12} (%)
1.	5492,00	5128,8	-6,61	6152,00	5628,1	-8,52	974,40	990,99	1,70
2.	4075,20	4251,9	4,34	4302,40	4675,2	8,67	857,60	883,00	2,96
3.	3598,86	3767,3	4,68	3894,29	4147,6	6,51	808,00	819,63	1,44
4.	3120,00	3447,9	10,51	3333,33	3799,5	13,99	746,67	776,13	3,95
5.	2845,09	3216,8	13,06	3037,09	3547,5	16,80	686,91	743,69	8,27
6.	2718,46	3039,6	11,81	2753,54	3354,1	21,81	650,46	718,21	10,42
7.	2666,67	2898,3	8,69	2646,67	3199,8	20,90	639,63	697,48	9,05
8.	4666,67	4603,9	-1,34	5040,00	5058,0	0,36	930,67	927,29	-0,36
9.	3836,00	3807,0	-0,75	4080,00	4190,9	2,72	861,20	824,94	-4,21
10.	3585,71	3364,7	-6,16	3665,71	3708,9	1,18	815,14	764,56	-6,21
11.	3155,56	3072,0	-2,65	3444,44	3157,3	-1,60	766,22	722,91	-5,65
12.	2923,64	2859,4	-2,20	3105,45	2978,5	1,67	722,73	691,70	-4,29
13.	2823,08	2695,7	-4,51	3021,54	2835,2	-1,43	678,15	667,07	-1,63
14.	2853,33	2564,7	-10,11	2970,67	4874,1	-4,56	643,33	646,93	0,56
15.	4320,95	4434,9	2,64	5000,00	4034,3	-2,52	917,14	906,18	-1,20
16.	3542,86	3663,3	3,40	4165,71	3566,5	-3,15	850,86	805,62	-5,32
17.	3426,53	3234,2	-5,61	3987,76	3256,1	-10,56	771,67	746,18	-3,30
18.	2936,51	2949,8	0,45	3480,95	3256,1	-6,46	714,29	705,08	-1,29
19.	2807,79	2742,9	-2,31	3445,45	3030,0	-12,06	673,51	674,22	0,11
20.	2703,30	2583,3	-4,44	3219,78	2855,6	-11,31	642,64	649,81	1,12
21.	2742,86	2455,4	-10,48	3347,62	2715,6	-18,88	639,62	629,81	-1,53

A (23) modellben már az ekvivalens forgácsvastagság mellett a fogásban levő, működő élhossz is szerepet kap [7]:

$$k_c = C \cdot h_{eq}^{q_c} \cdot l_{eff}^{y_c} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (23)$$

Az ebben az esetben a regresszióval számított konstansokat a 11. táblázat tartalmazza.

11. táblázat: (23) erőmodell számított konstans értékei

	C_c	q_c	y_c
--	-------	-------	-------

C 45	1015	-0,399	0,095
KO 36	1107	-0,416	0,234
AS12	358	-0,259	0,125

12. táblázat: (23) egyenlet szerint jósolt forgácsolóerő értékek

Mérési pont	k_{c_C45} (N/mm ²)	k_{csz_C45} (N/mm ²)	Hiba k_{c_C45} (%)	k_{c_KO36} (N/mm ²)	k_{csz_KO36} (N/mm ²)	Hiba k_{c_KO36} (%)	k_{c_AS12} (N/mm ²)	k_{csz_AS12} (N/mm ²)	Hiba k_{c_AS12} (%)
1.	5492,00	5035,7	-8,31	6152,00	5362,6	-12,83	974,40	968,80	-0,57
2.	4075,20	4148,6	1,80	4302,40	4391,9	2,08	857,60	855,46	-0,25
3.	3598,86	3663,3	1,79	3894,29	3867,0	-0,70	808,00	790,11	-2,21
4.	3120,00	3345,8	7,24	3333,33	3526,9	5,81	746,67	745,91	-0,10
5.	2845,09	3117,8	9,58	3037,09	3284,7	8,15	686,91	713,38	3,85
6.	2718,46	2944,0	8,30	2753,54	3101,6	12,64	650,46	688,16	5,79
7.	2666,67	2806,3	5,24	2646,67	2957,6	11,75	639,63	667,88	4,42
8.	4666,67	4678,8	0,26	5040,00	5248,5	4,14	930,67	947,97	1,86
9.	3836,00	3841,8	0,15	4080,00	4279,8	4,90	861,20	834,90	-3,05
10.	3585,71	3381,4	-5,70	3665,71	3752,3	2,36	815,14	769,20	-5,64
11.	3155,56	3078,8	-2,43	3444,44	3408,3	-1,05	766,22	724,41	-5,46
12.	2923,64	2860,2	-2,17	3105,45	3161,5	1,81	722,73	691,19	-4,36
13.	2823,08	2692,9	-4,61	3021,54	2973,7	-1,58	678,15	665,23	-1,91
14.	2853,33	2559,6	-10,30	2970,67	2825,0	-4,90	643,33	644,19	0,13
15.	4320,95	4603,1	6,53	5000,00	5328,3	6,57	917,14	952,24	3,83
16.	3542,86	3774,4	6,54	4165,71	4336,9	4,11	850,86	837,76	-1,54
17.	3426,53	3317,6	-3,18	3987,76	3795,5	-4,82	771,67	771,01	-0,09
18.	2936,51	3016,6	2,73	3480,95	3441,5	-1,13	714,29	725,37	1,55
19.	2807,79	2798,8	-0,32	3445,45	3186,8	-7,51	673,51	691,40	2,66
20.	2703,30	2631,7	-2,65	3219,78	2992,5	-7,06	642,64	664,76	3,44
21.	2742,86	2498,2	-8,92	3347,62	2838,1	-15,22	639,62	643,11	0,55

A 12. táblázatban láthatóak a mért erőértékekből számított, valamint az (23) modell alapján kalkulált fajlagos forgácsolóerők.

A 10. és a 12. táblázatok összehasonlításával lehet összevetni a (22) és (23) modellek pontosságát, alkalmazhatóságát. A mért és számított érték közötti százalékos hiba nagysága arra enged következtetni, hogy a (23) egyenlet jobban közelíti a mérések eredményét,

valamint a teljes tartományban kisebb ingadozást mutat. Ez figyelhető meg a 13. táblázatban szereplő statisztikai paraméterek segítségével.

13. táblázat:: (22) és (23) statisztikai összehasonlítása

	C45 (22)	C45 (23)	KO36 (22)	KO36 (23)	AS12 (22)	AS12 (23)
Szórás (%)	6,86	5,81	10,97	7,30	4,70	3,23
Minimum (%)	-10,48	-10,30	-18,88	-15,22	-6,21	-5,64
Maximum (%)	13,06	9,58	21,81	12,64	10,42	5,79

A 13. táblázatból látszik, hogy a (23) egyenlettel az főforgácsolóerő jobban jósolható, tehát a további erőkomponensek esetén már csak ezt a modellt fogom alkalmazni.

A fajlagos főforgácsolóerő számítóképlete tehát anyagféleségenként az alábbiak szerint néz ki:

$$k_{c_C45} = 1015 \cdot h_{eq}^{-0,399} \cdot l_{eff}^{0,095} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (24)$$

$$k_{c_KO36} = 1107 \cdot h_{eq}^{-0,416} \cdot l_{eff}^{0,234} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (25)$$

$$k_{c_AS12} = 358 \cdot h_{eq}^{-0,259} \cdot l_{eff}^{0,125} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (26)$$

A finomsztergálás technológiájából adódik, hogy a $k_{c1.1}$ főérték nem alkalmazható. Ehelyett szükséges lenne $k_{c1.0,1}$ -et bevezetni az erőmodell számítóképletébe:

$$k_{c1.0,1_C45} = 1015 \cdot 0,1^{-0,399} = 2542 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (27)$$

$$k_{c1.0,1_KO36} = 1107 \cdot 0,1^{-0,416} = 2889 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (28)$$

$$k_{c1.0,1_AS12} = 358 \cdot 0,1^{-0,259} = 650 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (29)$$

A (18) erőmodell alapján az adott anyagféleségekre meghatározott, konkrét erőmodellek tehát az alábbiak szerint néznek ki:

$$F_{c_C45} = 2542 \cdot 10^{-0,399} \cdot h_{eq}^{0,601} \cdot l_{eff}^{1,095}(N) \quad (30)$$

$$F_{c_KO36} = 2889 \cdot 10^{-0,416} \cdot h_{eq}^{0,584} \cdot l_{eff}^{1,234}(N) \quad (31)$$

$$F_{c_AS12} = 650 \cdot 10^{-0,259} \cdot h_{eq}^{0,741} \cdot l_{eff}^{1,125}(N) \quad (32)$$

14. táblázat: A mért és a (30)-(31)-(32) erőmodell alapján számított forgácsolóerők összehasonlítása

Mérési pont	F _{cmért C45} (N)	F _{cszám C45} (N)	F _{cmért KO36} (N)	F _{cszám KO36} (N)	F _{cmért AS12} (N)	F _{cszám AS12} (N)
1.	41,19	37,8	46,14	40,2	7,31	7,27
2.	50,94	51,9	53,78	54,9	10,72	10,69
3.	62,98	64,1	68,15	67,7	14,14	13,83
4.	70,2	75,3	75	79,4	16,80	16,78
5.	78,24	85,7	83,52	90,3	18,89	19,62
6.	88,35	95,7	89,49	100,8	21,14	22,37
7.	100	105,2	99,25	110,9	23,99	25,05
8.	70	70,2	75,6	78,7	13,96	14,22
9.	95,9	96,0	102	107,0	21,53	20,87
10.	125,5	118,3	128,3	131,3	28,53	26,92
11.	142	138,5	155	153,4	34,48	32,60
12.	160,8	157,3	170,8	173,9	39,75	38,02
13.	183,5	175,0	196,4	193,3	44,08	43,24
14.	214	192,0	222,8	211,9	48,25	48,31
15.	90,74	96,7	105	111,9	19,26	20,00
16.	124	132,1	145,8	151,8	29,78	29,32
17.	167,9	162,6	195,4	186,0	37,81	37,78
18.	185	190,0	219,3	216,8	45,00	45,70
19.	216,2	215,5	265,3	245,4	51,86	53,24
20.	246	239,5	293	272,3	58,48	60,49
21.	288	262,3	351,5	298,0	67,16	67,53

A (30), (31) és (32) egyenletek alapján számított, illetve a mért értékek számszerű összehasonlítását tartalmazza a 14. táblázat.

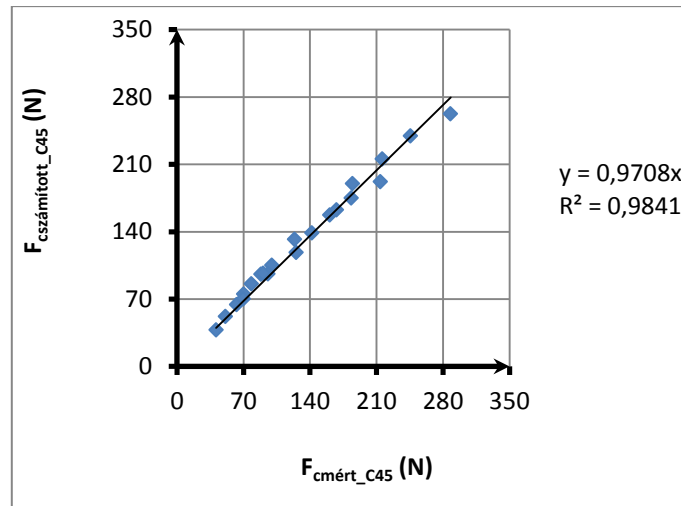
Ha grafikonon ábrázoljuk a 14. táblázatban szereplő számított főforgácsolóerőket a mérés során kapott értékek függvényében, akkor a létrejövő ponthalmazra egy egyenest lehet illeszteni. Amennyiben az értékek páronként megegyeznek, az függvény képeként egy az origóból induló, 45°-os dőlésszögű egyenest kapunk, melynek iránytangense 1, egyenlete pedig a (33) szerint néz ki:

$$y = x \quad (33)$$

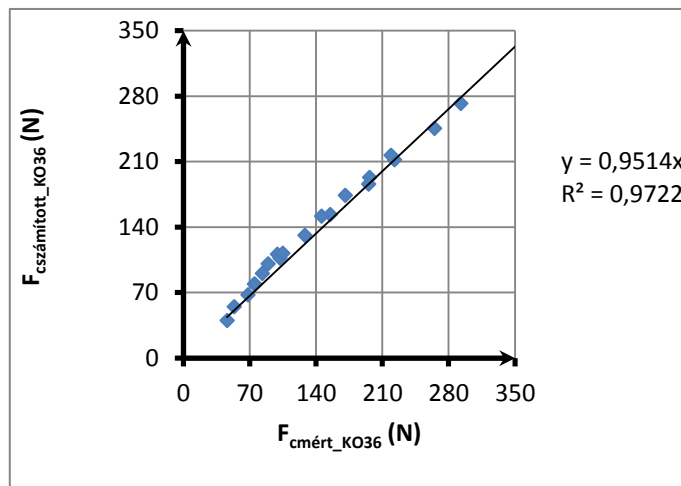
A 11./a. ábrán látható C45-re vonatkozó főforgácsolóerők összehasonlítása. Az illesztett egyenes meredeksége közelítőleg 1, vagyis a teljes vizsgált tartományban megfelelő pontossággal jósolhatóak az erőértékek a (30) egyenlet segítségével.

A 11./b. ábra KO36 esetén szemlélteti az összehasonlítást. Itt az egyenes iránytangense 0,95. A számított főforgácsolóerők tehát kis eltéréssel közelítik mért értékeket. F_c előrejelzésére jól alkalmazható a (31) egyenlet.

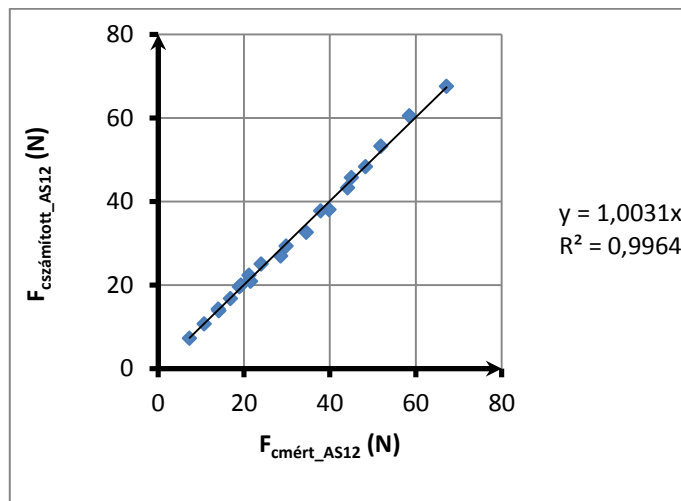
A 11./c. ábra AS12-re vonatkozólag szemlélteti mérés során felvett és a kalkulált főforgácsolóerők értékeit. Ebben az esetben az illesztett egyenes meredeksége $m=1,00$; ebből az következik, hogy kiválóan alkalmas az F_c erőkomponens meghatározására a (32) egyenletben szereplő modell.



a.



b.



c.

11. ábra: Grafikus összehasonlítás F_c erőkomponens esetén

A fentiekből adódik, hogy a három létrehozott erőmodell alapján a finomsztergálás tartományában nagy pontossággal tudjuk a forgácsolás F_c komponensének erőszükségletét előzetesen becsülni.

4.2. F_f erőkomponens vizsgálata

Az előtolás irányú erőkomponens vizsgálatát a Kienzle-Victor féle erőmodellből eredő, (34) egyenlet alapján végeztem:

$$k_f = C_f \cdot h_{eq}^{q_f} \cdot l_{eff}^{y_f} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (34)$$

15. táblázat: (34) egyenlet állandói

	C_f	q_f	y_f
C45	249	-0,789	0,646
KO36	301	-0,843	1,117
AS12	39	-0,635	0,751

A hatványfüggvény-regresszió során kapott konstansok értékeit tartalmazza a 15. táblázat.

A mérés során kapott előtolás irányú forgácsolóerőkből számított, valamint a (34) egyenlet alapján számított fajlagos forgácsolóerők összehasonlítása látható a 16. táblázatban.

16. táblázat: (34) egyenlettel becsült fajlagos előtolásirányú erők

Mérési pont	k_{f_C45} (N/mm ²)	k_{fsz_C45} (N/mm ²)	Hiba k_{f_C45} (%)	k_{f_KO36} (N/mm ²)	k_{fsz_KO36} (N/mm ²)	Hiba k_{f_KO36} (%)	k_{f_KO36} (N/mm ²)	$k_{fszám_KO36}$ (N/mm ²)	Hiba k_{f_KO36} (%)
1.	4393,33	4270,5	-2,80	5586,67	4642,5	-16,90	324,93	329,84	1,51
2.	2877,60	2938,2	2,11	3036,00	3139,9	3,42	246,64	245,24	-0,57
3.	2252,57	2318,2	2,91	2218,29	2458,0	10,81	203,89	203,58	-0,15
4.	1778,67	1955,1	9,92	1798,22	2066,0	14,89	177,33	178,29	0,54
5.	1459,64	1715,3	17,52	1473,45	1811,0	22,91	149,16	161,18	8,05
6.	1261,54	1544,7	22,45	1254,46	1632,2	30,11	136,15	148,79	9,28
7.	1130,13	1417,1	25,39	1099,73	1500,3	36,42	129,84	139,40	7,37
8.	4822,67	4456,1	-7,60	5486,67	5788,2	5,50	386,60	375,33	-2,92
9.	3242,00	3036,4	-6,34	3751,20	3863,5	2,99	291,16	276,47	-5,04
10.	2547,14	2373,5	-6,82	2920,00	2986,1	2,26	246,23	227,44	-7,63
11.	2087,56	1983,7	-4,98	2382,22	2478,9	4,06	211,02	197,45	-6,43
12.	1881,82	1725,1	-8,33	2003,64	2147,1	7,16	187,27	176,99	-5,49
13.	1701,54	1540,3	-9,48	1747,69	1912,6	9,44	162,00	162,04	0,02
14.	1566,67	1401,3	-10,56	1578,67	1738,1	10,10	144,53	150,60	4,20
15.	4399,05	4812,5	9,40	6547,62	6957,0	6,25	394,71	421,95	6,90
16.	3114,29	3266,0	4,87	4851,43	4618,1	-4,81	322,86	309,60	-4,11
17.	2489,80	2542,8	2,13	3773,47	3550,0	-5,92	264,69	253,72	-4,15
18.	2141,27	2117,0	-1,13	3292,06	2931,5	-10,95	223,49	219,44	-1,81
19.	1927,27	1834,1	-4,84	2857,14	2525,9	-11,59	191,82	195,98	2,17
20.	1695,60	1631,5	-3,78	2472,53	2238,7	-9,46	162,86	178,78	9,78
21.	1546,67	1478,8	-4,39	2514,29	2024,3	-19,49	151,90	165,57	9,00

A két vasalapú anyagféleség esetén elmondható, hogy néhány kiugró pontot leszámítva (C45 esetén az 5-6-7. mérési pont; KO36 esetén az 5-6-7-21.) a (34) egyenlet segítségével megfelelő pontossággal jósolható az előtolás irányú fajlagos forgácsolóerő értéke.

AS12 esetén a fajlagos forgácsolóerő előtolás irányú komponensének számított értéke mind a 21 mérési pont esetén a $\pm 10\%$ -os hibahatáron belül mozog.

A relatív hibák értékeinek statisztikai elemzését tartalmazza a 17. táblázat a fennálló hiba figyelembevételével.

17. táblázat: A (34) egyenlet statisztikai elemzésének eredménye

	C45	KO36	AS12
Szórás (%)	10,40	14,42	5,64
Minimum (%)	-10,56	-19,49	-7,63
Maximum (%)	25,39	36,42	9,78

Megállapítható, hogy a kiugró értékek feltehetőleg mérési hibának tekinthetők. A vizsgált tartományban elvárható pontossággal működik a (34) egyenlet, tehát alkalmazhatóak a felállított modellek.

$$k_{f_C45} = 249 \cdot h_{eq}^{-0,788} \cdot l_{eff}^{0,646} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (35)$$

$$k_{f_KO36} = 301 \cdot h_{eq}^{-0,843} \cdot l_{eff}^{1,117} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (36)$$

$$k_{f_AS12} = 39 \cdot h_{eq}^{-0,6347} \cdot l_{eff}^{0,7514} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (37)$$

Előtolás irányban, a technológiai sajátosságokból adódóan, szintén szükség van a fajlagos forgácsolóerő $l_{eff} = 1 \text{ (mm)}$ és $h_{eq} = 0,1 \text{ (mm)}$ értékekhez tartozó, $k_{f1,0,1}$ főértékének a meghatározására:

$$k_{f1,0,1_C45} = 249 \cdot 0,1^{-0,788} = 1529 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (38)$$

$$k_{f1,0,1_KO36} = 301 \cdot 0,1^{-0,843} = 2092 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (39)$$

$$k_{f1,0,1_AS12} = 39 \cdot 0,1^{-0,635} = 170 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (40)$$

A (18) erőmodellbe a kapott értékeket behelyettesítve kapjuk a konkrét erőmodellt a vizsgálatba vont három anyagféleségre vonatkozólag.

$$F_{f_C45} = 1529 \cdot 10^{-0,788} \cdot h_{eq}^{0,212} \cdot l_{eff}^{1,646} (N) \quad (41)$$

$$F_{f_KO36} = 2092 \cdot 10^{-0,843} \cdot h_{eq}^{0,157} \cdot l_{eff}^{2,117}(N) \quad (42)$$

$$F_{f_AS12} = 170 \cdot 10^{-0,635} \cdot h_{eq}^{0,365} \cdot l_{eff}^{1,751}(N) \quad (43)$$

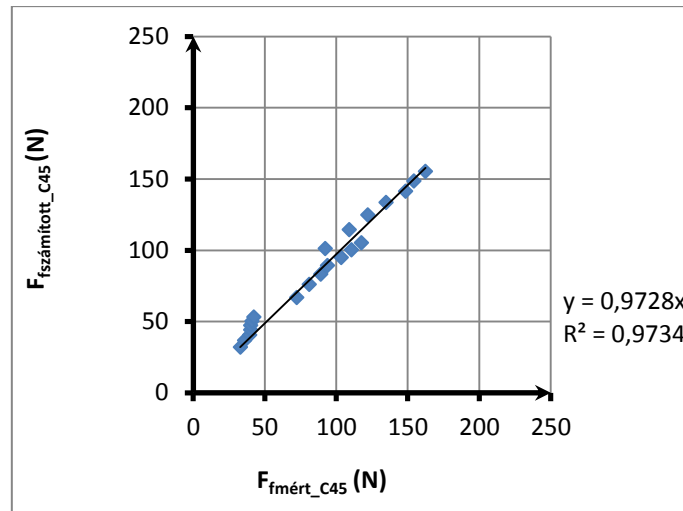
18. táblázat: (41), (42) és (43) egyenletek alapján számított előtolás irányú erők

Mérési pont	$F_{\text{fmért C45}}$ (N)	$F_{\text{fszám C45}}$ (N)	$F_{\text{fmért KO36}}$ (N)	$F_{\text{fszám KO36}}$ (N)	$F_{\text{fmért AS12}}$ (N)	$F_{\text{fszám AS12}}$ (N)
1.	33,0	32,1	41,9	34,8	2,44	2,47
2.	36,0	36,8	37,95	39,2	3,08	3,07
3.	39,4	40,6	38,82	43,0	3,57	3,56
4.	40,0	44,0	40,46	46,5	3,99	4,01
5.	40,1	47,2	40,52	49,8	4,10	4,43
6.	41,0	50,2	40,77	53,0	4,43	4,84
7.	42,4	53,2	41,24	56,3	4,87	5,23
8.	72,3	66,9	82,3	86,8	5,80	5,63
9.	81,1	76,0	93,78	96,6	7,28	6,91
10.	89,2	83,1	102,2	104,5	8,62	7,96
11.	93,9	89,3	107,2	111,6	9,50	8,89
12.	103,5	94,9	110,2	118,1	10,30	9,73
13.	110,6	100,2	113,6	124,3	10,53	10,53
14.	117,5	105,2	118,4	130,4	10,84	11,30
15.	92,4	101,2	137,5	146,1	8,29	8,86
16.	109,0	114,4	169,8	161,6	11,30	10,84
17.	122,0	124,7	184,9	174,0	12,97	12,43
18.	134,9	133,5	207,4	184,7	14,08	13,82
19.	148,4	141,3	220	194,5	14,77	15,09
20.	154,3	148,6	225	203,7	14,82	16,27
21.	162,4	155,4	264	212,6	15,95	17,39

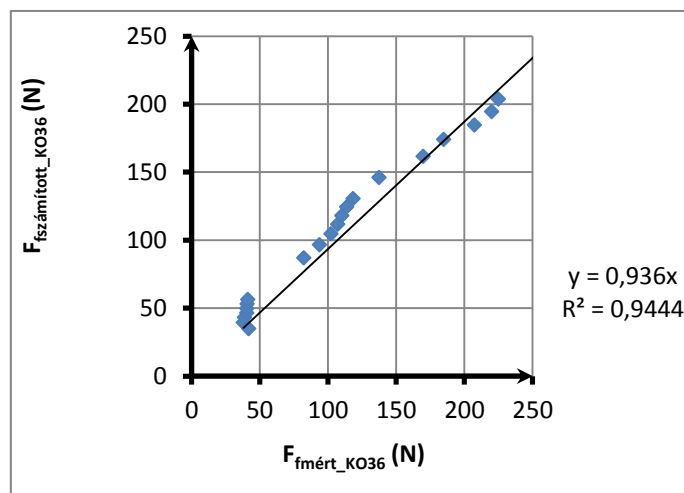
A fenti számítóképletek alapján meghatározott erők, illetve a mért értékek összehasonlítását tartalmazza a 18. táblázat.

Ha a méréskor felvett értékek függvényében ábrázoljuk a számított előtolás irányú erőket, akkor a kapott ponthalmazokra a 12. ábrán látható egyeneseket lehet ráilleszteni.

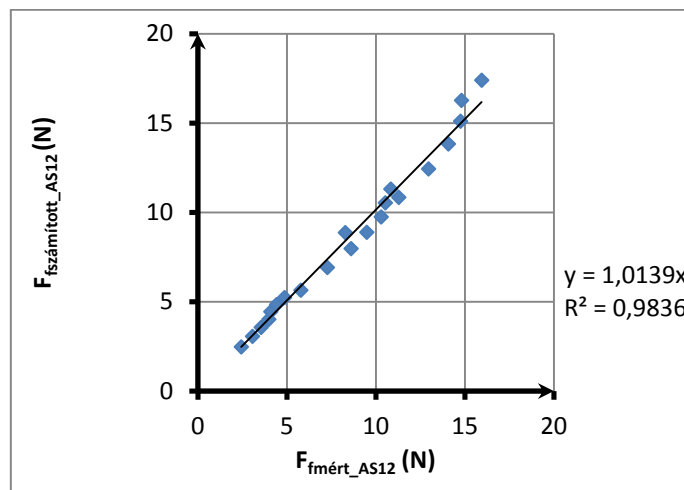
A 12./a. ábrán látható egyenes jól közelíti az $m=1$ meredekséget. A 12./b. ábrán látható függvény dőlésszöge is csupán kismértékben tér el a 45° -tól ($\alpha=43,1^\circ$), tehát pontossága az elvárt hibahatáron belül mozog.



a.



b.



c.

12. ábra: Grafikus összehasonlítás F_f erőkomponens esetén

A 12./c. ábrán, AS12 mért és számított értékei esetén az egyenes meredeksége minimális mértékben meg is haladja 1-et.

Tehát mind a (41), mind pedig a (42) és (43) erőmodell alkalmas az előtolás irányú forgácsolóerő megfelelő pontosságú becslésére.

4.3. F_p erőkomponens vizsgálata

A forgácsoláskor fellépő passzív erő komponensének elemzésekor a (44) egyenlet alapján végeztem el a számításokat.

$$k_p = C_p \cdot h_{eq}^{q_p} \cdot l_{eff}^{y_p} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (44)$$

A háromparaméteres hatványfüggvény-regresszió során meghatározott állandók értékeit a 19. táblázat tartalmazza.

19. táblázat: (44) egyenlet konstans értékei

	C_p	q_p	y_p
C45	251	-0,545	-1,108
KO36	99	-0,808	-1,377
AS12	22	-0,443	-1,531

A vizsgálat során mért, valamint a (44) egyenletben szereplő képlettel számított fajlagos passzív erők anyagonkénti összehasonlítását tartalmazza a 20. táblázat.

20. táblázat: A (44) egyenlettel meghatározott fajlagos passzív erők értékei

Mérési pont	k_{p_C45} (N/mm ²)	k_{psz_C45} (N/mm ²)	Hiba k_{p_C45} (%)	k_{p_KO36} (N/mm ²)	k_{psz_KO36} (N/mm ²)	Hiba k_{p_KO36} (%)	k_{p_AS12} (N/mm ²)	k_{psz_AS12} (N/mm ²)	Hiba k_{p_AS12} (%)
1.	5482,67	5376,3	-1,94	7794,67	7713,0	-1,05	426,67	420,2	-1,52
2.	4016,00	4023,5	0,19	4868,80	5045,6	3,63	322,40	327,8	1,68
3.	3260,57	3312,0	1,58	3582,29	3801,1	6,11	274,74	276,4	0,61
4.	2835,56	2856,5	0,74	2942,22	3068,3	4,28	242,49	242,1	-0,15
5.	2406,18	2533,1	5,27	2711,27	2580,6	-4,82	214,29	217,0	1,25
6.	2202,15	2288,2	3,91	2367,08	2230,7	-5,76	193,60	197,4	1,97
7.	2015,47	2094,5	3,92	2118,40	1966,2	-7,19	190,19	181,6	-4,52
8.	2991,33	2923,8	-2,26	3754,67	3487,3	-7,12	186,47	197,7	6,03
9.	2189,20	2196,4	0,33	2393,60	2290,0	-4,33	154,24	155,4	0,74
10.	1821,71	1814,6	-0,39	1792,00	1731,6	-3,37	139,43	131,9	-5,37
11.	1622,89	1570,6	-3,22	1464,44	1402,8	-4,21	116,31	116,4	0,06
12.	1495,09	1397,6	-6,52	1227,27	1184,0	-3,53	104,98	105,0	0,00
13.	1463,38	1266,8	-13,44	1077,23	1026,9	-4,67	92,66	96,1	3,76
14.	1390,67	1163,3	-16,35	1054,40	908,1	-13,87	84,49	89,0	5,33
15.	1946,67	2127,8	9,31	2114,29	2319,8	9,72	129,00	131,4	1,85
16.	1469,43	1601,0	8,95	1348,57	1525,8	13,14	111,09	103,6	-6,76
17.	1218,37	1324,8	8,74	1026,53	1155,6	12,57	97,80	88,2	-9,79
18.	1118,89	1148,4	2,64	853,97	937,6	9,79	80,78	78,0	-3,39
19.	1048,31	1023,4	-2,37	718,18	792,5	10,35	72,53	70,6	-2,66
20.	1019,01	929,0	-8,84	647,25	688,4	6,35	64,09	64,8	1,17
21.	980,95	854,3	-12,91	618,10	609,6	-1,37	55,99	60,2	7,49

Mindkét acélra igaz, hogy a teljes vizsgált tartományban megfelelő pontossággal jósolható a fajlagos passzív erő a (44) egyenlet szerint. Ebben az esetben is vannak kiugró értékek, viszont ezek már kisebb mértékben lépik át a $\pm 10\%$ -os hibahatárt.

AS12 esetén a kiugró pontok relatív hibája is $\pm 10\%$ -on belül helyezkedik el.

Az értékek statisztikai elemzését tartalmazza a 21. táblázat a felmerülő hiba nagysága alapján. Ebből kiderül, hogy a (44) modell alkalmazása során kapott értékek jól közelítik a mért értékekből számított fajlagos passzív erőt.

21. táblázat: A (51)-(52)-(53) egyenletek alapján kapott fajlagos passzív erőértékek statisztikai vizsgálata

	C45	KO36	AS12
Szórás (%)	7,24	7,63	4,25
Minimum (%)	-16,35	-13,87	-9,79
Maximum (%)	9,31	13,14	7,49

A 21. táblázatból látszik, hogy a három anyagféleség közül legkisebb ingadozást és átlagtól való eltérést AS12 esetén tapasztalhatunk.

A fajlagos normál irányú erő becslésére alkalmas összefüggések az alábbi módon néznek ki:

$$k_{p_C45} = 251 \cdot h_{eq}^{-0,545} \cdot l_{eff}^{-1,108} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (45)$$

$$k_{p_KO36} = 99 \cdot h_{eq}^{-0,808} \cdot l_{eff}^{-1,138} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (46)$$

$$k_{p_AS12} = 22 \cdot h_{eq}^{-0,443} \cdot l_{eff}^{-1,531} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (47)$$

A fajlagos passzív erő finomesztorgálási tartományra vonatkozó főértékei láthatóak a (48), (49) és (50) egyenletben.

$$k_{p1,0,1_C45} = 251 \cdot 0,1^{-0,545} = 879 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (48)$$

$$k_{p1,0,1_KO36} = 99 \cdot 0,1^{-0,808} = 636 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (49)$$

$$k_{p1,0,1_AS12} = 22 \cdot 0,1^{-0,443} = 62 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (50)$$

A (18) erőmodell passzív erőre vonatkoztatott változatába ezt behelyettesítve jutunk a tényleges modellhez:

$$F_{p_C45} = 879 \cdot 10^{-0,545} \cdot h_{eq}^{0,455} \cdot l_{eff}^{-0,108} (N) \quad (51)$$

$$F_{p_KO36} = 636 \cdot 10^{-0,808} \cdot h_{eq}^{0,192} \cdot l_{eff}^{-0,138} (N) \quad (52)$$

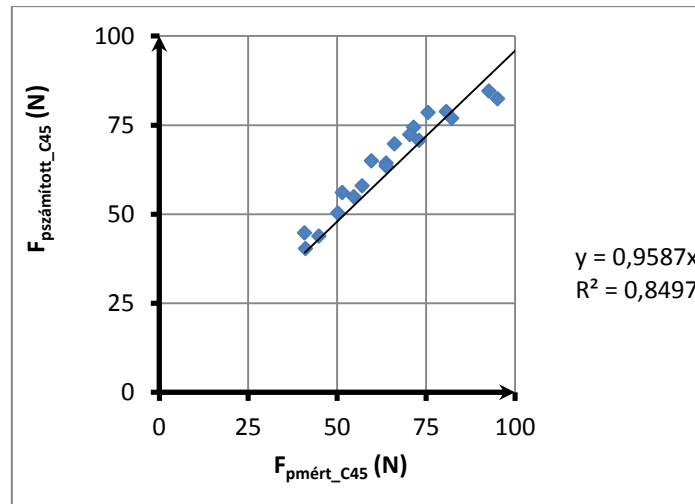
$$F_{p_AS12} = 62 \cdot 10^{-0,443} \cdot h_{eq}^{0,557} \cdot l_{eff}^{-0,531}(N) \quad (53)$$

A (51), (52) és (53) egyenletek alapján számított, valamint a mérés során kapott passzív erők értékeinek összehasonlítását tartalmazza a 22. táblázat.

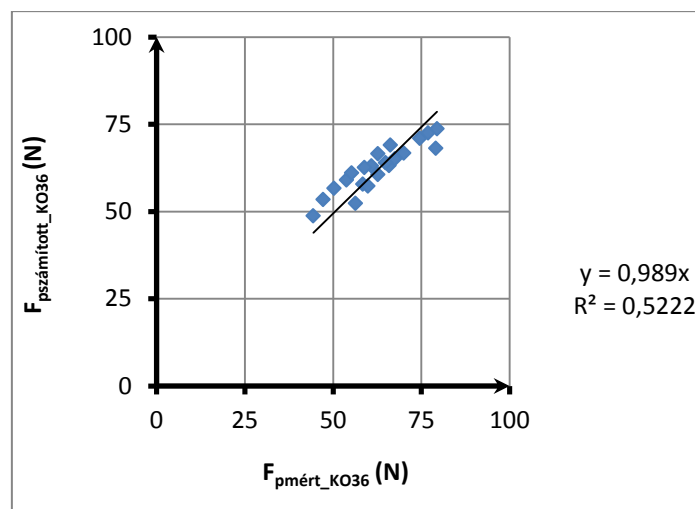
22. táblázat: (51), (52) és (53) számítóképletekkel kapott passzív erőértékek

Mérési pont	$F_{\text{pmért C45}}$ (N)	$F_{\text{pszám C45}}$ (N)	$F_{\text{pmért KO36}}$ (N)	$F_{\text{pszám KO36}}$ (N)	$F_{\text{pmért AS12}}$ (N)	$F_{\text{pszám AS12}}$ (N)
1.	41,1	40,3	58,5	57,8	3,20	3,15
2.	50,2	50,3	60,9	63,1	4,03	4,10
3.	57,1	58,0	62,7	66,5	4,81	4,84
4.	63,8	64,3	66,2	69,0	5,46	5,45
5.	66,2	69,7	74,6	71,0	5,89	5,97
6.	71,6	74,4	76,9	72,5	6,29	6,42
7.	75,6	78,5	79,4	73,7	7,13	6,81
8.	44,9	43,9	56,3	52,3	2,80	2,97
9.	54,7	54,9	59,8	57,3	3,86	3,88
10.	63,8	63,5	62,7	60,6	4,88	4,62
11.	73,0	70,7	65,9	63,1	5,23	5,24
12.	82,2	76,9	67,5	65,1	5,77	5,77
13.	95,1	82,3	70,0	66,7	6,02	6,25
14.	104,3	87,2	79,1	68,1	6,34	6,67
15.	40,9	44,7	44,4	48,7	2,71	2,76
16.	51,4	56,0	47,2	53,4	3,89	3,63
17.	59,7	64,9	50,3	56,6	4,79	4,32
18.	70,5	72,3	53,8	59,1	5,09	4,92
19.	80,7	78,8	55,3	61,0	5,59	5,44
20.	92,7	84,5	58,9	62,6	5,83	5,90
21.	103,0	89,7	64,9	64,0	5,88	6,32

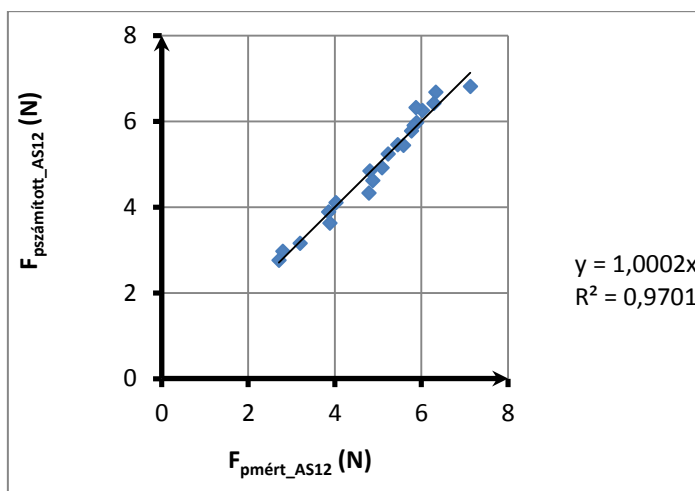
A 22. táblázatban szereplő passzív forgácsolóerő értékek grafikus összehasonlítása látható a 13. ábrán.



a.



b.



c.

13. ábra: Grafikus összehasonlítás F_p erőkomponens esetén

Mind a 13./a., mind pedig a 13./b. ábrán látható, hogy a (43) és (44) erőmodell alapján számított értékeket a mérés során felvettek függvényében ábrázoljuk, akkor a pontthalmazra

illesztett egyenesek jól közelítik, míg a (45) erőmodell esetében a 13./c. ábra egyenese tökéletesen kielégíti a (33) egyenletben elvártat értéket.

Tehát a felállított modell alkalmas finomesztergálás esetén a passzív erő kalkulálására.

5. Konklúzió

Szakdolgozatom keretein belül finomesztergálás technológiájára dolgoztam ki egy új erőmodellt, mely a hagyományos mechanikai analógián alapuló Kienzle-Victor formulából indul ki, de figyelembe veszi a finomesztergáláskor kialakuló forgácskeresztmetszet (Kienzle-Victor modelltől eltérő) jellegét.

A modellbe bevezettem a h_{eq} és l_{eff} forgácskeresztmetszet jellemzőket, melyekkel pontosan leírhatóak a finomesztergáláskor kialakuló forgács geometriai jellemzői. A forgácskeresztmetszetek ennél a technológiánál lényegesen kisebbek ezért bevezetésre került az ún. $k_{c1.0,1}$, $k_{f1.0,1}$, és $k_{p1.0,1}$, a térbeli erőkomponensek fajlagos főértékei (mely $l_{eff} = 1$ mm; és $h_{eq} = 0,1$ mm forgácskeresztmetszethez tartozik).

Munkám során háromféle az iparban gyakran használt anyagféleségen (C45, Ko36, AS12) végeztem erőtani vizsgálatokat, melyeknél mindhárom erőkomponensre kidolgoztam az új erőmodellt.

A 20. táblázat tartalmazza a különböző irányokba ható erőkomponensek vizsgálata során kapott konstansok értékeit.

20. táblázat: Regressziók során kapott konstansok összehasonlítása

		C45	KO36	AS12
F_c	C_c	1015	1107	358
	q_c	-0,399	-0,416	-0,259
	y_c	0,095	0,234	0,125
	$k_{c1.0,1}$	2542	2889	650
F_f	C_f	249	301	39
	q_f	-0,789	-0,843	-0,635
	y_f	0,646	1,117	0,751
	$k_{f1.0,1}$	1529	2092	170
F_p	C_p	251	99	22
	q_p	-0,545	-0,808	-0,443
	y_p	-1,108	-1,377	-1,531
	$k_{p1.0,1}$	879	636	62

A C konstansok értékei alapján kijelenthető, hogy az egységnyi keresztmetszetű forgács leválasztásának erőszükséglete KO36 esetén a legnagyobb, vagyis a három anyagféleség közül ez a legnehezebben forgácsolható. AS12 alumínium megmunkálása igényli a legkisebb

erőbefektetést, C konstansai az acélokéhoz képest F_c -nél csupán a harmada, valamint egy nagyságrenddel kisebbek F_f és F_p komponensek esetén.

Továbbá megállapítható, hogy a forgácsolóerő különböző irányú összetevői közötti arányok lényegében megegyeznek a C állandók esetén felírható arányosságokkal (lásd 2. ábra).

Az ekvivalens forgácsvastagság hatványkitevőinek - a q állandóknak - az értéke mindegyik anyagféleség, valamint mindhárom erőkomponens esetén negatív, ami a Kienzle-Victor erőmodellben szereplő fajlagos forgácsolóerő (7) egyenletben szereplő alakjából következik:

$$k_c = \frac{k_{c1.1}}{h^{q_c}} = \frac{C_c}{h^{q_c}} = C_c \cdot h^{-q_c} \quad (54)$$

$$k_f = \frac{k_{f1.1}}{h^{q_f}} = \frac{C_f}{h^{q_f}} = C_f \cdot h^{-q_f} \quad (55)$$

$$k_p = \frac{k_{p1.1}}{h^{q_p}} = \frac{C_p}{h^{q_p}} = C_p \cdot h^{-q_p} \quad (56)$$

A vizsgálatok szerint a fajlagos forgácsoló erő összetevőire (k_c , k_f , k_p) és a forgácsolóerő komponensekre (F_c , F_f , F_p) felépített erőmodellek nagy pontossággal leírják és modellezik a mérések során meghatározott erőértékeket.

Egyértelműen megállapítható, hogy a létrehozott egyenletek a főforgácsolóerő esetén bizonyultak a legpontosabbnak, az elötolás irányú, valamint a passzív erőkomponensek esetében nagyobb mértékű eltérés tapasztalható a mért és a számított értékek között. Összességében mégis kijelenthető, hogy a felállított modellek az elvárható pontossággal leírják a forgácsolási folyamatok során fellépő erőhatások mindhárom összetevőjének várható nagyságát a finomesztergálás eljárásának paraméter tartományán belül. Ennek köszönhetően jól alkalmazhatók a várható erőértékek előzetes becslésére, így felhasználhatók olyan technológiai tervezésére ahol pl.: a munkadarab geometriai méreteire a forgácsoló erő komponenseinek komoly hatása lehet.

A reziduum vizsgálatok bizonyították, hogy az épített új modellek jó közelítéssel írják le a várható forgácsoló erőértékeket a vizsgált paraméter tartományon.

6. Irodalomjegyzék

- [1]: Merchant ME: Basic mechanics of the metal cutting process, Journal of Applied Mechanics 1944;11:A168–75
- [2]: Dr Mikó Balázs – Dr Sipos Sándor – Hervay Péter – Dr Zentay Péter: Forgácsolás technológia alapjai, ÓE-BGK-6055, Budapest, (2014)
- [3]: 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
- [4]: Süleyman Yaldiz, Faruk Ünsacar, Hacı Saglam, 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
- [5]: Horváth Richárd, Pálincás Tibor, Mátyási Gyula: Erőmérő rendszer tervezése, kivitelezése és adaptációja finomsztergáláskor fellépő kis erők méréséhez, GÉP 59:(6) pp. 48-53. (2013)
- [6]: O. Kienzle, H. Victor: Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugmaschinen, VDI-Z 94 (1952) 299–305.
- [7]: Horváth Richárd, Dr. Sipos Sándor, Dr. Mátyási Gyula: ÚJ ERŐMODELL FINOMSZTERGÁLÁS ESETÉN, GÉP 65:(6-7) pp. 50-55. (2014)
- [8]: Biró Szabolcs: Különleges technológiák, ÓE-BGK elektronikus jegyzet
- [9]: S.R. Frey: Repetitorium: Spanende Formung Schweizer Maschinenmarkt, Nr. 32/1980. 26-29.
- [10]: C. Bus, N. A. L. Touwen, P. C. Veenstra, A. C. H. Van Der Wolf: On the Significance of Equivalent Chip Thickness, Annals of the CIRP, Vol. XXIV. (1971) 121-124.
- [11]: Dudás Illés: Gépgyártás-technológia II., Műszaki Könyvkiadó, Budapest, (2007)
- [12]: Dr. C. J. Rao, Dr. D. Nageswara Rao, P. Srihari: Influence of cutting parameters on cutting force and surface finish in turning operation, Procedia Engineering 64 (2013) 1405-1415
- [13]: Y. S. Tarng and T. S. Hwang: AN INVESTIGATION OF THE SPECIFIC CUTTING FORCE AND ITS DIRECTION FACTORS IN TURNING, Department of Mechanical Engineering, National Taiwan Institute of Technology, Taipei, Taiwan, 10672, Republic of China (1993)
- [14]: Hamdi 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

[15]: B. de Agustina, C. Bernal, A.M. Camacho, E.M. Rubio: Experimental Analysis of the Cutting Forces Obtained in Dry Turning Processes of UNS A97075 Aluminium Alloys, Procedia Engineering 63 (2013) 694 – 699