

XXXI. Országos Tudományos Diákköri Konferencia
Műszaki Tudományi Szekció, 2013. április 24-26.

Forgácsolhatóság kísérleti vizsgálata

Biró István

Gépészmérnöki Szak MSc. III. évf.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar

Gyártástudomány és –technológia Tanszék

Témavezető: Dr. Markos Sándor, adjunktus
BME Gyártástudomány és –technológia Tanszék

A dolgozat bemutatását a TÁMOP - 4.2.2.B-10/1--2010-0009
"Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" című program
támogatta.

Tartalomjegyzék:

1. Bevezetés	2
2. Anyagok megmunkálhatósága és forgácsolhatósága.....	3
2.1. Forgácsolhatóság jellemzői	13
2.2. Forgácsolhatóság vizsgálati módszerei.....	20
3. Kísérlettervezés és előkészítés	23
3.1. Megmunkálási módok, vizsgálati lehetőségek.....	23
3.2. Homlokmarási kísérlet elméleti háttere	25
3.3. Homlokmarási kísérlet gyakorlati előkészítése (hardver környezet).....	37
3.4. Mérőprogram homlokmarási kísérletekhez (szoftver környezet).....	39
4. Kísérlet kivitelezés	41
5. Kiértékelés.....	42
5.1. Kiértékelés menete: példabemutató.....	43
6. Forgácsolhatóság a gyakorlatban: nagy szilárdságú acélok vizsgálata	50
7. Összegzés, konklúzió.....	57
8. Irodalomjegyzék	59
9. Melléklet	63
10. Ábrajegyzék	64

1. Bevezetés

A hatékony termelés az alapos folyamattervezéssel kezdődik. Ehhez rendelkezésünkre állnak bevált tapasztalati módszerek, tanácsok, de a legtöbb esetben szükségünk van konkrét becslésekre a folyamat jellemzőinek számszerűsítéséhez és így a folyamat optimálásához. Főként érvényes ez bármely anyagfeldolgozó tevékenységre, ahol az alapanyag feldolgozhatósága, megmunkálhatósága határozza meg az alkalmazható technológiai módszereket és konfigurációkat.

Egy anyag megmunkálhatósága megmutatja, hogy egy választott bázisanyaghoz képest mennyire „könnyű” vagy „nehéz” az adott anyagot megmunkálni. A forgácsolhatóság a megmunkálhatóság egyik jellemzője. Fémes anyagok forgácsolhatósági vizsgálatait tipikusan esztergálási és fúrási műveletek útján végzik, és a harmadik klasszikus megmunkálási módról: a marásról aránylag kevés szó esik.

A marás dinamikájában és energetikájában is különbözik a rokon forgácsolási módoktól: ez legszembetűnőbben a szekvenciálisan ingadozó igénybevételekben nyilvánul meg. A szerszám egészére és az egy-egy forgácsolóélre ható, időben változó terhelések nagymértékben befolyásolják a forgácsolással kialakított felület minőségét, miközben az anyagleválasztáshoz szükséges forgácsolási energia változása szokatlan tendenciát mutathat a forgácsolási paraméterek függvényében.

A homlokmarás a legtermelékenyebb marási technológia kiterjedt síkfelületek létrehozására. A vágósebesség, az előtolás és a fogásmélység módosítása eltérő súllyal befolyásolja a forgácsolási igénybevételeket. Hatásuk analitikus módszerekkel becsülhető, de az ehhez szükséges tényezők túlnyomó többsége empirikusan, kísérletek során határozható meg. A vizsgálatokat egy kitüntetett anyagminőségen és szerszámgeometria mellett célszerű végezni. Megfelelő hardverkörnyezet mellett mérhetők a megmunkálás során fellépő erőértékek, így ezekből energetikai és – az anyageltávolítás sebességét is figyelembe véve – termelékenységgel kapcsolatos következtetések vonhatók le.

A kapott eredmények kiértékeléséhez elengedhetetlen a megfelelő szoftverkörnyezet létrehozása: a mérési adatok regisztrálása, rendszerezése és a kapcsolódó számítások kivitelezése jól algoritmizálható műveletek, melyek elvégzése a felhasználó által megadott paraméterek alapján automatikusan történhet.

A dolgozat célja egy olyan mérési és kiértékelő program létrehozása és fejlesztése, ami lehetővé teszi a parametrikus homlokmarási kísérletekből származó adatok gyors és egyszerű feldolgozását, ezáltal segítve a tapasztalati ismeretek kiegészítését, bővítését és pontosítását.

2. Anyagok megmunkálhatósága és forgácsolhatósága

A forgácsolhatóság az anyagok megmunkálhatóságának egyik jellemzője. Megmunkálhatóság (workability) alatt az anyagoknak azon technológiai tulajdonságait értjük, melyek megmutatják, hogy a munkadarab alakítása, azaz alakadása és szerkezetadása adott feltételek mellett milyen könnyen v. nehezen kivitelezhető. Látható, hogy a fogalom elsősorban összehasonlításon alapszik, azaz egy anyag megmunkálhatósága csak egy másik anyaghoz, a bázisanyaghoz viszonyítva értelmezhető.

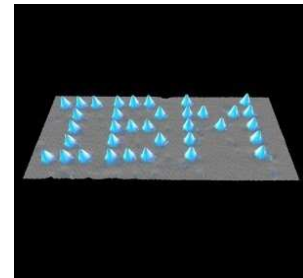
Alakadás alatt a munkadarab geometriájának változtatása értendő. Ez történhet anyagleválasztással (pl. forgácsolás, 1. ábra), képlékeny alakítással (pl. hajlítás, 2. ábra) és anyaghozzáadással (pl. atomi szinten történő geometriaépítés, 3. ábra).



1. ábra: Anyagleválasztás



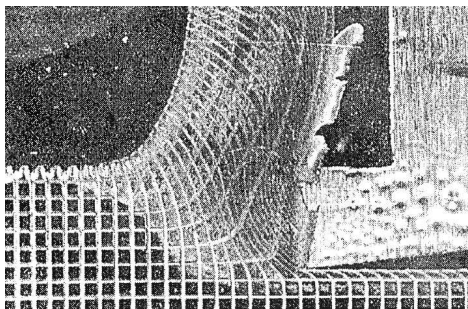
2. ábra: Képlékeny alakítás



3. ábra: Anyaghozzáadás

Az alakadás a hatástartományt tekintve lehet:

- felületi: Az alakadás a munkadarabnak csak egy adott vastagságú felületi rétegében történik pl. forgácsolás, polírozás, hegesztés esetén. A 4. ábrán a rácshálót megfigyelve látható, hogy deformáció csak a forgácsolással kialakított felület közvetlen közelben lép fel, a belső rétegek nem változnak.
- térfogati: Az alakadás hatása az anyagterjedelem egészében v. túlnyomó részében megfigyelhető. Pl. hengerlés, nyújtás, hajlítás esetén.

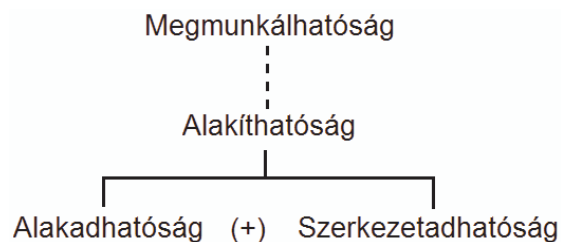


4. ábra: Felületi alakadás forgácsolással



5. ábra: Térfogati alakadás

Az anyagok alakíthatósága és alakadhatósága nem szinoním kifejezések egymással. Az alakíthatósághoz hozzá tartozik az anyagszerkezet változtathatósága, azaz a szerkezetadhatóság is. Utóbbira pl. esztergálás, marás esetén az alakadhatóságnak egyik kísérő jellemzőjeként lehet tekinteni, hiszen a megmunkált felület beedződése során az anyagszerkezetben történik változás (ausztenites-martenzites átalakulás). Ugyanez – tipikusan hőkezelési eljárásoknál – önálló technológiai szempont is lehet. A két példában a szerkezetadhatóság eltérő szereppel bír: hőkezelésnél azt tartjuk kedvezőnek, ha az anyag jól edzhető; esztergálás v. marás esetén viszont hátrányt jelenthet, mivel a könnyen beedződő kontúrfelületen a belső feszültségek miatt repedések alakulhatnak ki (ugyanakkor forgácskeletkezés szempontjából mindez kedvező lehet, mivel így a forgács jobban törik, nem jön létre folyóforgács).



6. ábra: Alakíthatóság értelmezése

Az alakíthatóság tehát egy zárt rendszert: a megmunkálandó anyagot jellemzi közvetlenül, „jósága” a munkadarab mechanikai és kémiai tulajdonságaitól függ, adott külső paraméterek mellett.

Bármely anyag alakításához energiaközlésre van szükség. Az energia forrását tekintve megkülönböztethető:

- erő alapú alakítás: A megmunkálás meghatározott irányú és nagyságú erőhatás mellett történik pl. esztergálás, hajlítás, vágás ollóval.
- hőközlésen alapuló alakítás: A megmunkálás hőközlés, általában a munkadarabba történő hőbevezetés mellett valósul meg pl. öntés, edzés, lángvágás.

Számos olyan megmunkálási technológia létezik, ahol e kettő energiaforrást együttesen alkalmazzuk pl. meleghengerlés, fröccsöntés, melegkovácsolás.

Néhány szakirodalomban az alakíthatóság fogalmi körébe csak a munkadarab alakadhatóság (formability) tartozik. Erre példa a [1] forrás, mely a befolyásoló tényezőket a következőképpen összegzi:

- anyagszerkezet („internal structure of the material”),

- anyagvastagság (lemezvastagság, „sheet thickness”),
- hőkezelési állapot („heat treatment”),
- felületi minőség („surface quality”).

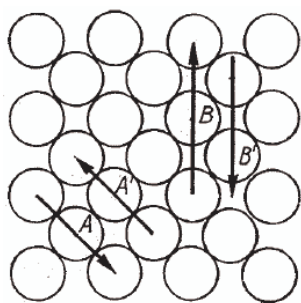
A megmunkálhatóság gyűjtő fogalom: számos, egymástól elkülöníthető, de ugyanakkor összekapcsolódó jellemzőből történő általános következtetés az anyag alakíthatóságára adott külső paraméterek mellett.

Jelen dolgozat központi témájának megfelelően a továbbiakban a vizsgált anyagok halmaza az acélokéra szűkül. Ennek megfelelően a megmunkálhatóság vizsgálata az alábbi, leglényegesebb (anyag)tulajdonságok tanulmányozása és rendszerezése alapján lehetséges:

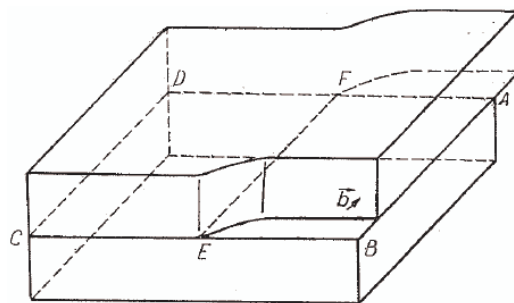
- Képlékeny alakíthatóság
- Edzhetőség (hőkezelhetőség)
- Hegeszthetőség
- Forgácsolhatóság
- Polírozhatóság

Képlékeny alakíthatóság:

A képlékeny alakváltozás irreverzibilis folyamat, melynek lefolyása alatt különbözően nagyszámú atom rezgésközéppontja sok rácsállandónyi távolságba helyeződik át, azaz az anyagban maradó alakváltozás jön létre. (A rácsállandó az anyag kristályrácsának pontjai, azaz az atomok közötti távolság.) A folyamat során egy kitüntetett síkban, a csúszási síkban (8. ábrán az ABEF sík) elhelyezkedő atomréteg elcsúszik a szomszédos atomrétegen úgy, hogy a rétegek atomjai ugyanazokkal – a saját síkjukhoz tartozó – atomokkal érintkeznek csúszás után, mint csúszás előtt. A csúszási sík valamely kristálytani sík mentén helyezkedhet el. [24]



7. ábra: Képlékeny alakváltozás



8. ábra: Csúszási sík

A képlékeny alakváltozás abban a síkban következik be a legkönnyebben, ahol a felületi atomsűrűség és a párhuzamos szomszéd síktól való távolság a legnagyobb. [26] Másképpen: az alakváltozás ott indul meg leghamarabb, ahol a legkisebb az alakítási ellenállás. Tehát az alakváltozás kétszeresen irányfüggő:

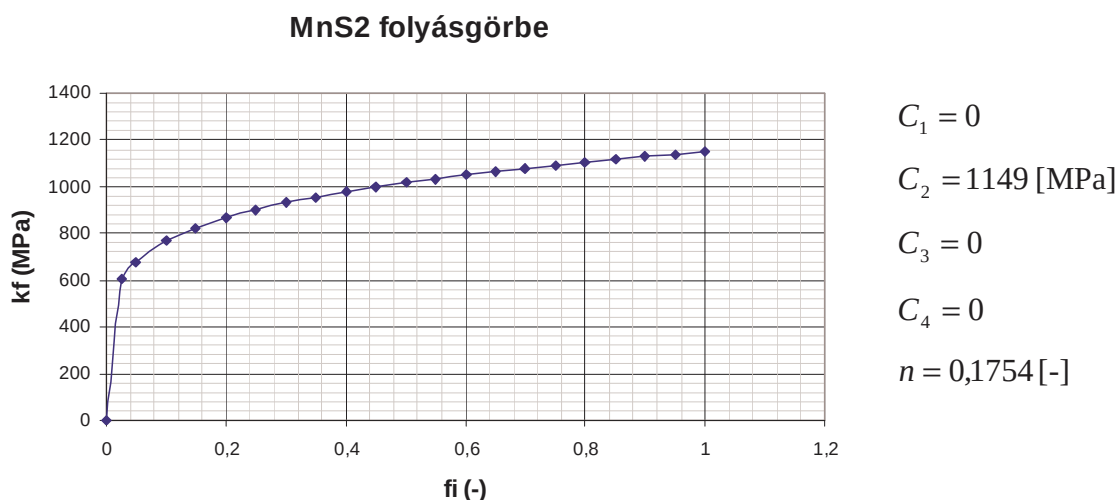
1. Csúszási sík csak az arra alkalmas kristálytani síkban jöhet létre (7. ábrán *A* és *B* síkok).
2. A kisebb alakítási ellenállású irányban indul meg az alakváltozási folyamat (7. ábrán az *A* sík).

A képlékeny alakváltozást minden esetben rugalmas deformáció előzi meg: ez reverzibilis folyamat, azaz ha megszüntetjük a deformációt okozó terhelést, az anyag adott időintervallumon belül visszanyeri eredeti alakját.

Az átlagos alakítási ellenállás kifejezhető az anyagra jellemző alakítási szilárdság (k_f) segítségével: megmutatja, hogy mekkora az a feszültség, melynek hatására a rugalmas alakváltozás maradóvá változik. Az alakítási szilárdság értéke az ún. folyásgörbe alapján határozható meg. Számos folyásgörbe egyenlet létezik, ezek közül példaként az (1) kifejezés látható. [23]

$$k_f(\varphi) = C_1 + C_2 \varphi^n + C_3 \cdot \exp(C_4 \varphi) \quad (1)$$

Ez egy közelítő modell az alakítási szilárdság meghatározására, ahol a C_1 , C_2 , C_3 és C_4 együtthatók, valamint az n kitevő anyagspecifikus, mérés útján meghatározott állandók.



1. diagram: MnS2 acél folyásgörbéje [23, 33. o.] alapján

Az 1. diagram görbájén jól megfigyelhető az alakítási felkeményedés jelensége: növekvő deformáció (φ) mellett nő az alakítási szilárdság értéke. Az (1) kifejezés esetében a φ deformáció pontos megnevezése: logaritmikus alakváltozás, mely a következőképpen értelmezendő:

$$\varphi = \ln \left(\frac{L_1}{L_0} \right) \quad (2)$$

ahol: L_1 (mm) – a deformálódó anyagrész jellemző mérete az alakváltozás után,

L_0 (mm) – a deformálódó anyagrész jellemző mérete az alakváltozás előtt.

A képlékeny alakíthatóság határának az alakváltozás azon mértékét tekintjük, amelynél az anyagban makroszkópikus károsodás (pl. törés) lép fel. [9] Ennek a határnak a megállapítására szolgál a lemezek hajlítópróbája.

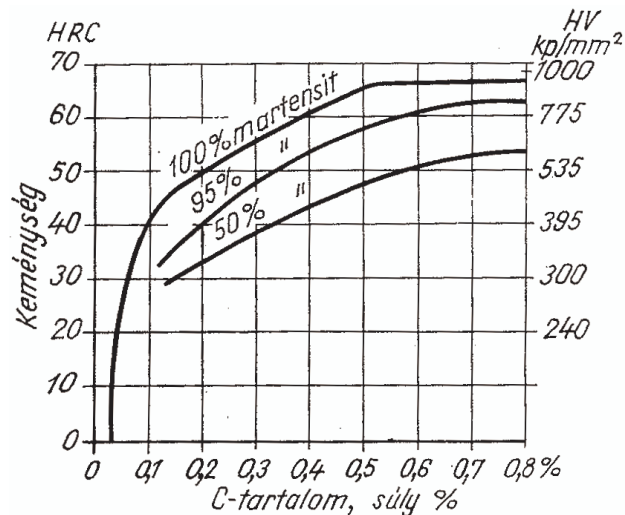
Összegezve, egy anyag képlékeny alakíthatóságát általánosságban az alakítási ellenállása jellemzi, mely függ:

- az alakítás irányától és mértékétől,
- az alakítási szilárdságtól.

Edzhetőség (hőkezelhetőség):

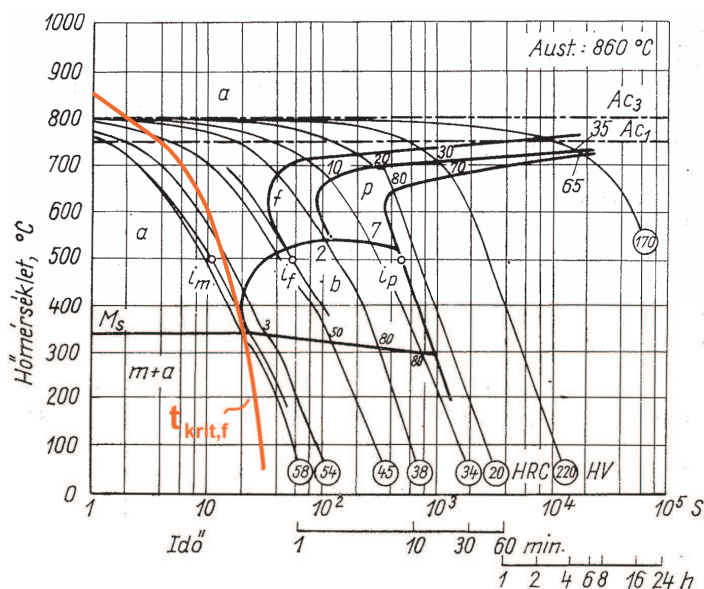
A folyamatos hűtésű edzésnek, mint hőkezelési eljárásnak a célja, hogy az acél szövetét a teljes keresztmetszetben martenzitessé alakítsa, így biztosítva az elérhető legnagyobb keménységet. Az edzés során az acélt ausztenites szerkezetűvé hevítik, majd az összetétele alapján meghatározott legkisebb hűtési sebességgel lehűtik. [24]

Az edzés következménye tehát az acél keménységének növekedése. Ez nagymértékben függ a karbontartalomtól: minél több szenet tartalmaz az acél, annál nagyobb keménység érhető el. Az edzett acélok keménységét a martenzites szövetszerkezet biztosítja, ez az acél legkeményebb állapota. Edzés során azonban nem alakul át a teljes ausztenites szerkezet, leggyakrabban 50% körüli arány valósul meg. [24] Ennek oka, hogy a hűlési sebesség gyakran alacsonyabb, mint a megfelelő átalakuláshoz szükséges sebesség, ezért bomlási szövet (bénit, perlit) is megjelenik. Minél több a bomlási szövet, annál kevesebb a martenzit, így az acél keménysége is alacsonyabb.



9. ábra: Edzéssel elérhető keménység a szénttartalom függvényében

Az edzés feltétele, hogy az acélt az ausztenitesítési hőmérséklet (A_3) fölé 20-50 [°C]-kal hevítsük, majd a kritikus felső hűtési sebességnél ($v_{krit,f}$) gyorsabban hűtsük vissza. [24] [14] A kritikus felső hűtési sebesség annak az időbeli hőmérsékletváltozási egyenesnek a meredeksége, ami mentén még tisztán ausztenites-martenzites átalakulás megy végbe a szövetszerkezetben.

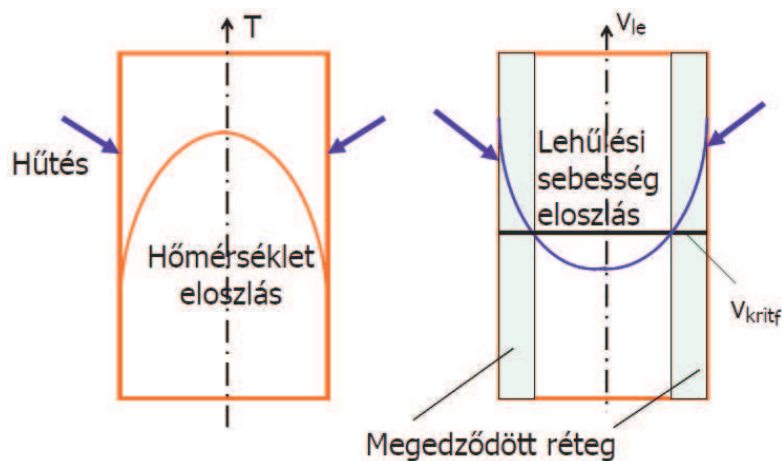


$$v_{krit,f} = \frac{dt_{krit,f}}{d\tau} [^\circ C/s]$$

$$v_{krit,f} \approx \text{áll.}$$

10. ábra: Cr135 acél átalakulási diagramja és a kritikus hűtési görbe

Az acél annál jobban átedződik, minél kisebb a kritikus hűtési sebessége: ekkor a hőmérsékletcsökkenés sebessége nagyobb tartományban haladja meg a kritikus értéket, melynek következtében megnő az átedzhető átmérő (ld. 11. ábrán a $v_{krit,f}$ határvonal „lentebb” tolódik).



11. ábra: Hűtési sebesség és átedzhető átmérő kapcsolata acélok edzése során

Amennyiben a kritikus felső hűtési sebességet túlságosan meghaladjuk, akkor a gyors hűtés következtében az acélban nagy feszültségek léphetnek fel, melyek okai [24]:

- kristályrács-feszültség,
- a beedződött kéreg és a lágyabb mag eltérő szövetszerkezetei közötti feszültség,
- zsugorodási feszültség.

Mindez utólagos deformációhoz, ridegedéshez, repedések kialakulásához, töréshez vezethet.

Az acél ötvözésével az átedzhetőség befolyásolható. Hőkezelhetőségi szempontból a főbb ötvözők és hatásaik [24]:

- Mangán: csökkenti a $v_{krit,f-t}$, de 10% feletti Mn-tartalom mellett gyors hűtés esetén is tiszta ausztenites szerkezet jön létre.
- Nikkel: hatására csökken az A_3 hőmérséklet, csökkenti a $v_{krit,f-t}$.
- Króm: az A_3 hőmérséklet és a $v_{krit,f}$ csökken, 0-12% Cr-tartalomnál nő a hőszilárdság (megeresztésállóság).
- Volfrám: hatása hasonló a króméhoz, de 600-700 (°C)-on a keletkező volfrám-karbid kiválik, és ezzel fokozza az acél keménységét.

Hegeszthetőség:

Az acélok hegeszthetősége szoros kapcsolatban áll az edzhetőséggel: hegesztésnél alapvető probléma az anyag beedzése a varrat mentén. Ez inhomogenitást okoz az anyagtulajdonságokban (eltérő szövetszerkezet, felkeményedés), ami belső feszültségekhez vezet. A hegesztési varrat sok esetben feszültséggyűjtő helyként is szolgál (főleg sarokvarratok esetén). Ezek együttesen repedés- és törésveszélyes zónákat eredményeznek.

Elmondható tehát, hogy a biztonságosan (azaz jól) hegeszthető acélok elég kedvezőtlen edzhetőségi tulajdonságokkal rendelkeznek. Az edzhetőség alapfeltétele a megfelelő szénttartalom, éppen ezért a jól hegeszthető acélok csoportjába az alacsony, számszerűen 0,2% alatti karbontartalmú ötvözeteket sorolják.

A hegeszthetőség jellemzésére szolgál az ún. karbonegyenérték (*CEV* – Carbon Equivalent Value vagy Carbon Equivalent Formula). [17] [7] Ennek segítségével lehet következtetni az ötvözött acélok megfelelő, hegesztést megelőző hőkezelési eljárására: adott *CEV*-vel rendelkező acél előmelegítésének ugyanúgy kell történnie, mint a *CEV*-vel megegyező szénttartalmú szénacélnál. A hegesztés előtti megfelelő hevítés azért lényeges, mert így csökkenthető a hűlési sebesség, és nem alakul ki a kemény martenzites szövetszerkezet.

A karbonegyenérték meghatározására több, nemzetközileg elfogadott módszer is érvényes (minden esetben a vegyjelek az adott ötvözők tömegszázalékát jelképezik az acélban) [7]:

a) International Insitute of Welding (IIW) ajánlása szerint (ez a leginkább elterjedt formula):

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}; [CEV] = \% \quad (3)$$

Az [7] forrás a $CEV < 0,41\%$ acélokat nagyon jól hegeszthetőnek minősíti ridegtörési szempontból. A (3) kifejezés nem alkalmazható 0,04% vagy ennél alacsonyabb szénttartalom esetén. [17]

b) Kiterjesztett formula:

$$P_{cm} = C + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B; [P_{cm}] = \% \quad (4)$$

c) Németországban használatos formula:

$$CET_G = C + \frac{Mn}{10} + \frac{Mo}{10} + \frac{Cr}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{40}; [CET_G] = \% \quad (5)$$

Az indexben alkalmazott *G* egyedi jelölés, megkülönböztetendő a (3) és (5) kifejezést. Mindegyik karbonegyenérték-számítás végeredményéhez jelentős hányaddal járulnak hozzá az edzhetőség bemutatásánál felsorolt ötvözőanyagok (Mn, Ni, Cr, V). Érdekes, hogy a volfrám, ami jellegzetesen kiváló karbidképző ötvöző, nem szerepel az (5) kifejezésben.

Forgácsolhatóság:

A forgácsolhatóságnak mint fogalomnak többféle megközelítése is lehetséges. A különböző megfogalmazások az alábbiakban olvashatók:

„A forgácsolhatóság az anyagok technológiai tulajdonsága, mely ilyen vagy olyan mértékben teszi őket alkalmassá a forgácsolással történő megmunkálásra. Forgácsolhatóság alatt a munkadarab anyaga mindazon tulajdonságainak összességét kell érteni, melyek befolyással vannak a forgácsolási folyamatra.” [3, 186. o.]

„A megmunkálhatóság nem egy általánosan elfogadott, valamiképpen szabványosított tulajdonság. Általában a munkadarab anyag megmunkálhatóságának képessége azt jelenti, hogy a munkadarab alakját könnyű vagy nehéz létrehozni egy adott forgácsoló szerszámmal.” [10, 4. o.]

A forgácsoló megmunkálásokra specializálódott ipari vállalatok szemléletmódjában az anyagok megmunkálhatóságának és forgácsolhatóságának fogalma összemosódik. Erre mutatnak példát az alábbiak:

a) Ruukki szemlélet [6]:

A forrás a forgácsolhatóságot nem fogalomként, hanem a forgácsoló megmunkálást jellemző vagy ehhez ajánlott paraméterek összességéként értelmezi pl. MKGS-rendszer statikus-dinamikus stabilitása, ajánlott forgácsolási paraméterek.

b) SANDVIK Coromant szemlélet [20]:

A megmunkálhatóság értelmezéséhez 3 szempontot vesz figyelembe: munkadarab anyaga, szerszámgeometria, szerszámanyag. A vizsgálat a forgácsolás során fellépő erők és egyéb általános (pl. dinamikus) hatások, a megmunkált felület hőterheltsége és minősége, illetve a szerszámot érő hatások megfigyelésén alapul. Ez mind forgácsolhatósági paraméter.

A fogalmat nem egzaktnak, de körülhatárolhatónak tekinti, és az összehasonlításokon alapuló értelmezést támogatja: erre példaként az alacsony ötvözőtartalmú szénacélok és a korrózióálló acélok forgácsolhatóságának egymáshoz viszonyítását hozza fel, ahol a folyamat „zavartalanását” (pl. rezgésektől mentes) és a szerszám éltartamot figyeli.

c) Plansee TIZIT szemlélet [16]:

A megmunkálhatóság annak függvénye, hogy az adott munkadarabot milyen „könnyű” megmunkálni. Ennek megállapítását 5 tulajdonság vizsgálatára alapozza: munkadarab anyaga, vágóerő, szerszám éltartam, felületi minőség, forgácstípus. Ezek mind a forgácsolhatóságot jellemzik.

Ezek alapján belátható, hogy a forgácsolhatóság értelmezéséhez a kulcsszó elsődlegesen az összehasonlítás: „ilyen vagy olyan”, „könnyű vagy nehéz” megmunkálásról értelmetlenség beszélni viszonyítási alap nélkül. Tehát a fogalom elsősorban nem egy önmagába is helyt álló definíció, hanem a megmunkálást jellemző paraméterek értékelése adott referenciákhoz

képest. Ezen referenciák többé-kevésbé már szabványosíthatók, de leginkább megegyezésen alapuló pl. C45 a legtöbbször alkalmazott bázisanyag forgácsolhatósági összehasonlításoknál.

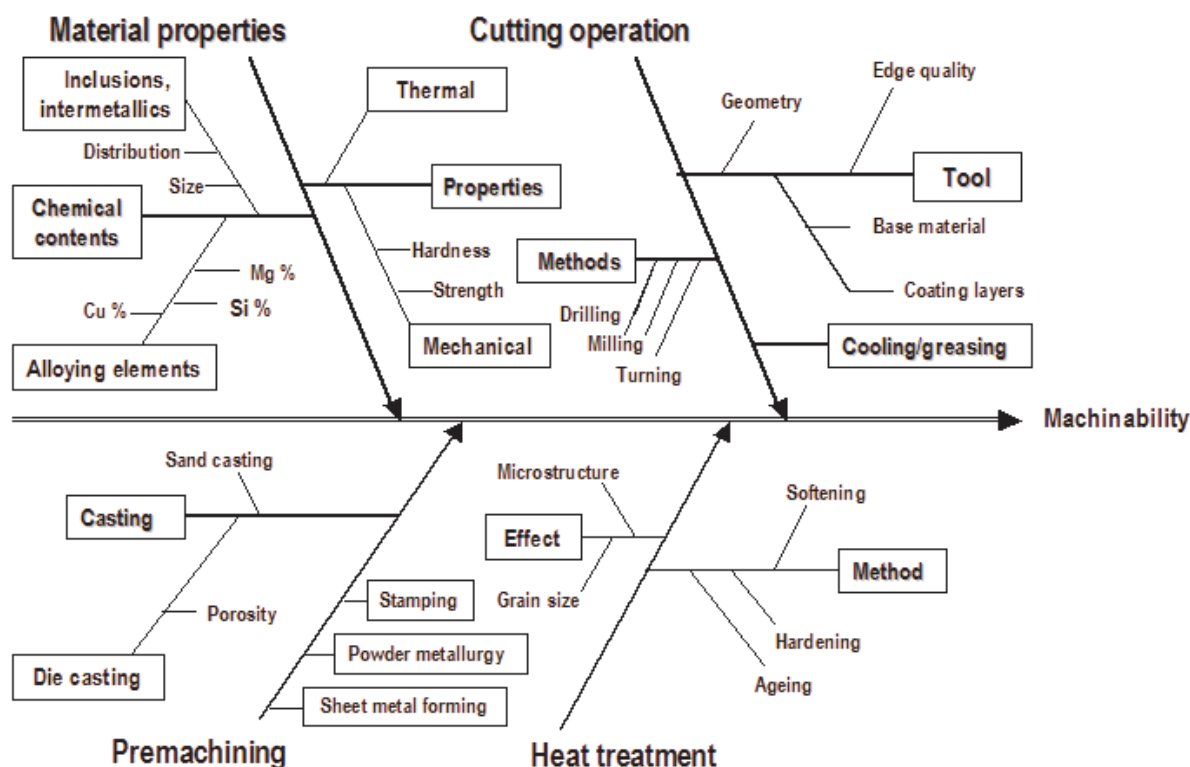
Polírozhatóság:

A polírozás olyan felületkikészítési eljárás, melynek célja a felület tisztítása, felületi minőség javítása és gyakorta a felület kémiai passziválása (korrózióvédelem, kémiai stabilitás). A művelet során a polírozó szerszám és a felület közötti súrlódásból származó hő megolvasztja a felületi csúcsokat, ezáltal csökkenti a felület érdességét. [12]

A polírozhatóság összetett jellemző, ami a felsorolt technológiai sajátosságokból adódónak függ:

- Anyagszerkezettől: a polírozás egyik jellegzetessége, hogy nem anyageltávolítással, hanem feszíni deformálással csökkenti az érdességet („elkeni” az anyagot). Ennek a deformációnak a létrehozási körülményeit (szükséges súrlódás, súrlódási hő) befolyásolja az anyagszerkezet.
- Edzhetőségtől: a munkadarab felülete a nagy hőhatás miatt beedződhet, és így a továbbiakban romlik a polírozhatóság (nehezebb a felületi deformációt előidézni). Ezért az a kedvező, ha a polírozandó felület anyaga nehezen edzhető.
- Kémiai affinitástól: polírozást követően a megmunkált felület kémiai stabilitása attól függ, hogy mennyire hajlamos kémiai reakcióra.

Belátható, hogy a megmunkálhatóság fogalma többféle szemléletmódot és egymással kölcsönös kapcsolatban álló anyag- és geometriai jellemzőt foglal magában. Ezen tulajdonságok rendszerezésére, a paraméterek és a folyamatjellemzők közötti ok-okozati viszonyok feltárására hatékony és szemléletes módszer az Ishikawa-diagram („halszáлка-modell”) megalkotása. Erre mutat példát a 12. ábra, ahol AlSi ötvözetek megmunkálhatóságának elemzése történt Ishikawa-diagram segítségével.



12. ábra: AlSi ötvözetek megmunkálhatósága (Ishikawa-diagram)

2.1. Forgácsolhatóság jellemzői

Az előző fejezetben bemutatott meghatározások már részben magukban foglalták a forgácsolhatóságot jellemző paramétereket is. Látható, hogy a fogalmi magyarázat és a vizsgálati módszerek szoros kapcsolatban állnak egymással.

Ahhoz, hogy minden mértékadó jellemzőt figyelembe lehessen venni, a forgácsolási folyamatot részleteiben kell megvizsgálni. Jelen dolgozat témája a hagyományos forgácsolási módok (pl. esztergálás, marás) elemzése, a különleges technológiákra (pl. szikraforgácsolás) nem tér ki.

Forgácsolhatóság minősítésére használható mennyiségek, módszerek:

a) Fajlagos paraméterek

Az eltérő tulajdonságú anyagok jellemzői között összehasonlítást tesz lehetővé a mennyiségek fajlagosítása, azaz valamilyen közös egységre történő redukálása. Ilyen mennyiségek:

- Fajlagos forgácsolóerő és a forgácskeresztmetszet hatását figyelembe vevő hatványkitevők [3]:

A fajlagos forgácsoló erő megmutatja, hogy adott minőségű anyagból az egységnyi vastagságú és egységnyi szélességű forgács leválasztásához mekkora erő szükséges. Jelölése:

k_{c11} . Alkalmazásának jelentősége a forgácsoló erő hatványalakú meghatározásában jelenik meg:

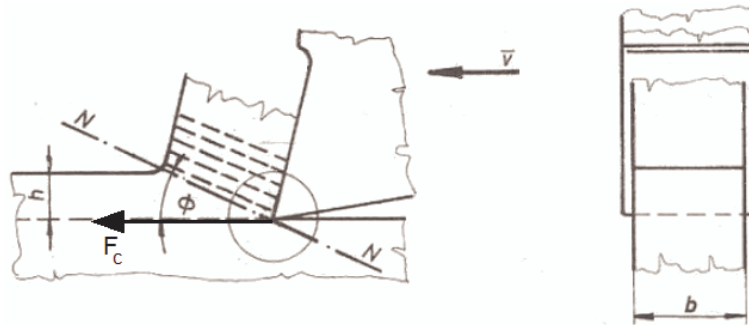
$$F_c = k_{c11} \cdot h^{x_F} \cdot b^{y_F} \quad (6)$$

ahol: F_c [N] - forgácsoló erő;

h [mm] - forgácsvastagság;

b [mm] - forgácsszélesség;

x_F, y_F [-] - forgácskeresztmetszet hatását figyelembe vevő hatványkitevők („forgácskitevők”).



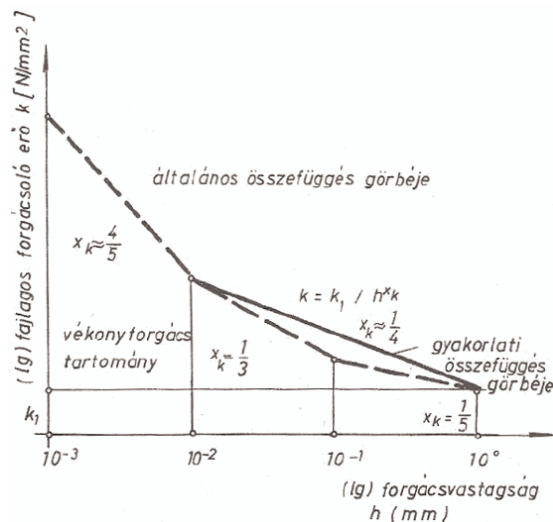
13. ábra: Forgácsoló erő

A (6) kifejezésből látható, hogy k_{c1} mértékegysége:

$$[k_{c11}] = \frac{N}{mm^{x_F + y_F}}$$

A forgácskitevők is anyagspecifikus jellemzők. Tehát a forgácsoló erőnek a különböző anyagokra történő egységes fajlagosítása nem tökéletes (gyakorlatilag anyagonként más mértékegysége lehet), de jó kiindulási alapot ad az összehasonlításra. Éppen ezért a mértékegység használata formálisnak tekinthető, a mérőszám alapján viszonyítunk.

A forgácsoló erő a forgácsszélesség növelésével közel lineárisan nő, ezért a gyakorlatban legtöbbször $y_F = 1$ érték lelhető fel. Tehát a forgácsoló erőt leginkább a forgácsvastagság befolyásolja. Ezért szokás a fajlagos forgácsoló erőt a forgácsvastagság függvényeként értelmezni. Ekkor jelölése: k_{c1} . A forgácsvastagsággal való kapcsolatát a 17. ábra mutatja be.



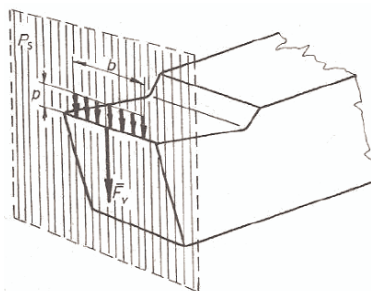
14. ábra: Fajlagos forgácsoló erő és forgácsvastagság kapcsolata

– Fajlagos éltérhelés:

Fajlagos éltérhelésnek nevezik a szerszám egységnyi élhosszára ható forgácsolóerőt [3, 86. o.] Ennek elsősorban szerszámválasztás során van szerepe, ebből következtetni lehet a szerszám ellenálló képességére a megmunkálás során fellépő igénybevételekkel szemben. Jelölése és mértékegysége: p (N/mm). Meghatározása:

$$p = \frac{F_c}{b} \quad (7)$$

ahol: F_c [N] - forgácsoló erő;
 b [mm] - forgácsszélesség.



15. ábra: Fajlagos éltérhelés értelmezése

– (Fajlagos) éltartam:

Az éltartam az az idő, amit a szerszám – az elfogadott kopáskritériumnak megfelelő kopásnagyság kialakulásáig – forgácsolásban eltölt. [3, 149. o.] Jelölése és mértékegysége: T [min]. Klasszikus meghatározása a Taylor-összefüggéssel történik:

$$T = \frac{C_T}{v_c^{z_T}} \quad (8)$$

ahol: $C_T [m^{z_T} \min^{1-z_T}]$ - éltartam állandó;

$v_c [m/min]$ - forgácsoló sebesség (vágósebesség);

$z_T [-]$ - sebességekitevő.

A (8) kifejezés szerint az éltartamot fel lehet írni kizárólag a forgácsoló sebesség függvényében. Ha a (6) összefüggéshez hasonlóan a forgácskeresztmetszet befolyásoló hatását is figyelembe kívánjuk venni, a (8) összefüggés a következőképpen módosul [3]:

$$T = \frac{C_T}{v_c^{z_T} \cdot h^{x_T} \cdot b^{y_T}} = \frac{C_T'}{v_c^{z_T}} \quad (9)$$

ahol: $x_T, y_T [-]$ - forgácsalak kitevők.

A Taylor-összefüggés gyakran alkalmazott, vágósebességre átrendezett alakja:

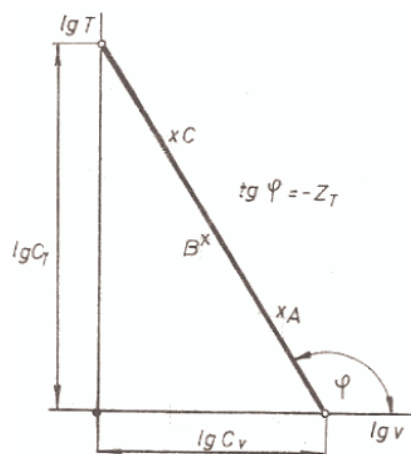
$$v_c = \frac{C_v}{T^{m_c}}, \text{ ahol } C_v = C_T^{m_c} \text{ és } m_c = \frac{1}{z_T}$$

Innen az éltartam:

$$T = m_c \sqrt{\frac{C_v}{v_c}} \quad (10)$$

ahol: $C_v [m^* \min^{1-m_c}]$ - sebesség állandó;

$m_c [-]$ - éltartam kitevő (reciprok sebesség kitevő).



16. ábra: Éltartam egyenes

– Fajlagos anyagleválasztás:

Ez közvetlenül a forgácsolási folyamat termelékenységét jellemzi, de az anyag forgácsolhatóságától nagymértékben függ (minél könnyebben forgácsolható az anyag, annál jobb a termelékenység). A fajlagosítás jellemzően időre történik, ebben az esetben jelölése és mértékegysége: $q [cm^3/min]$. Szemléletes paraméter a szerszám éltartam alatt leválasztott

anyagmennyiség, ami közvetlenül a munkadarab-szerszám rendszert minősíti. Ez jelölhető: q_T , mértékegysége ($\text{cm}^3/\text{él}$).

– CEV:

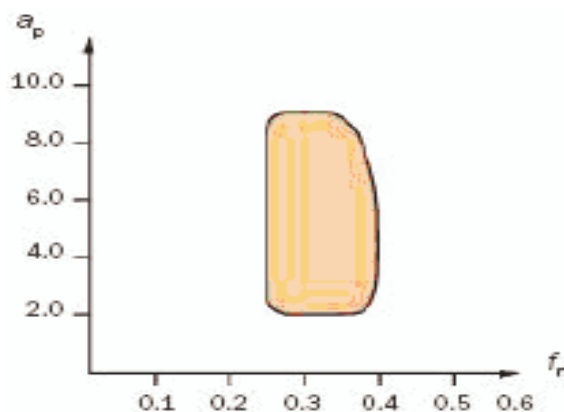
A karbonegyenérték is fajlagosított mennyiségnek tekinthető, mivel az acélok ötvözőtartalmát tisztán karbontartalomra redukálja, ezáltal lehetővé teszi az azonos alapon történő összehasonlítást. Forgácsolhatóság szempontjában a CEV a beedződési hajlamra utal.

b) Összehasonlító, összegző táblázatok

A forgácsolhatóságot jellemző fajlagos paramétereket táblázatba foglalva sokkal áttekinthetőbben lehet rendszerezni. Ilyen paraméter táblázatok találhatók pl. a szerszámkatalógusokban. A 5. melléklet egy ilyen katalógusrészletet mutat be.

c) Forgácsoló képesség (cutting ability)

A forgácsoló képesség elsősorban a forgácsoló szerszámot jellemzi: megmutatja, mely előtolás-fogásmélység paraméterpár esetén tekinthető optimálisnak a forgácskeletkezés és a forgácslefutás, azaz a szerszám milyen forgácsolási paraméterek mellett használható a gyártó által garantált minőségben. De ez alkalmazható a megmunkálandó anyagok forgácsolhatóságának jellemzésére is, amennyiben a vizsgálatot ugyanazzal a típusú szerszámmal végezzük több anyagminőségen.



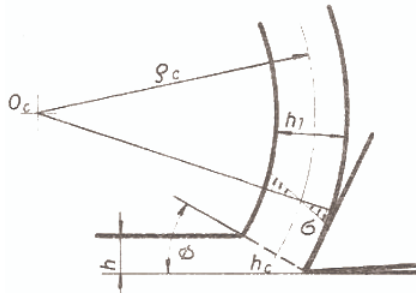
17. ábra: Forgácsoló képesség diagram CNMG 19 06 16-SR váltólapkára

d) Forgácsképződés

A forgácsképződés a forgácsolási folyamat egyik alaptényezője. A nem megfelelő alakú és méretű forgács kontrollálhatatlanná válhat, kárt téve ezzel az eszközökben és a munkadarabban egyaránt. Kulcskérdés a megfelelő forgácsstörés, ami kétféle módon jöhet létre:

I. természetes úton:

Ilyenkor a forgácsban a képlékeny alakítás miatt fellépő feszültségek repedéseket, végül törést hoznak létre. Ez egy kritikus forgácsgörbületi sugárral jellemezhető, melynek értéke az a legkisebb sugárhossz, ahol még a forgácstörés az előbb ismertetett módon valósul meg.



ρ_c [mm] - forgácsgörbületi sugár

σ [MPa] - húzófeszültség a forgácsban

h_1 [mm] - tényleges forgácsvastagság

h [mm] - elméleti forgácsvastagság

ϕ [rad] - nyírási szög

18. ábra: Forgácstörés mechanizmusa

A σ feszültség meghatározása az [3, 58. o.] alapján:

$$\sigma = E \frac{h\xi}{2\rho_c} \text{ és } \xi = \frac{h_1}{h} \quad (11), (12)$$

ahol: E [MPa] - az adott anyag rugalmassági modulusa;

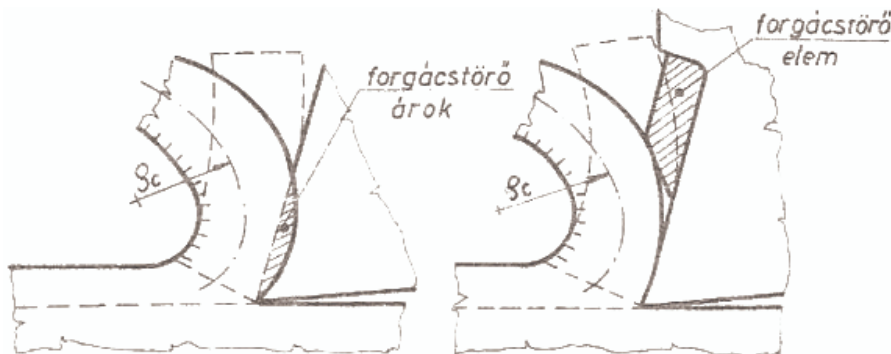
ξ [-] - a forgács alakváltozási tényező.

Tehát a forgácstörési kritérium:

$$\sigma = \sigma_{\max} \text{ és } \rho_c = \rho_{c,\min} \quad (13)$$

II. mesterségesen:

Amikor a forgács természetes úton nem deformálódik annyira, hogy a fellépő feszültségek szétszakítsák azt, a törési kritériumnak forgácstörő alkalmazásával teszünk eleget. Ekkor külső kényszer hatására következik be a szükséges alakváltozás.

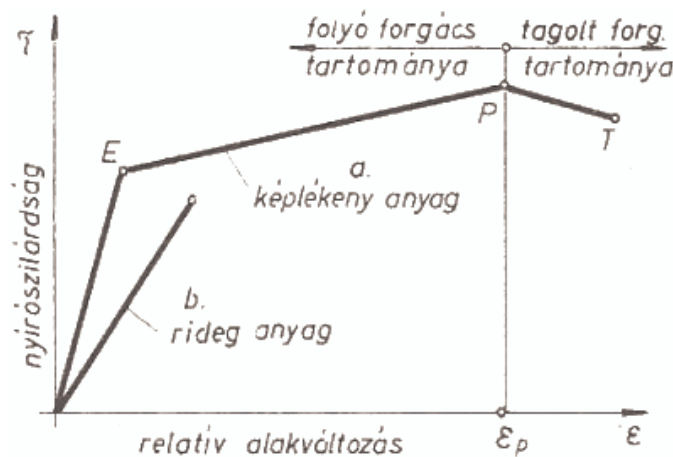


19. ábra: Mesterséges forgácstörés

A forgácstörés kialakulása együttesen függ:

- a munkadarab anyagától:

Elsősorban az anyag viselkedése a meghatározó: rideg vagy képlékeny jelleget mutat. A rideg anyag könnyebben törik, míg a képlékeny szívósabb, így nagyobb deformációkat is képes elviselni.



20. ábra: Képlékeny és rideg anyag szakítási diagram jellegzőgörbéi

- a forgácskeresztmetszettől:

A forgácskeresztmetszetet a forgácsolás módja (pl. esztergálás, marás), a technológiai paraméterek (előtolás, fogásmélység) és a szerszámgeometria (vágóél alakja, élelhelyezési szögek, terelőszög) befolyásolják.

Az előtolás (f) a forgácsszélességet (b), a fogásmélység (a) a forgácsvastagságot (h) (pontosabban az elméleti vastagságot és szélességet) határozza meg közvetlenül. E két értéket egy keresztmetszeti tényezővel szokás jellemezni [3, 208. o.], ami

$$G = \frac{b}{h} \quad (14)$$

Forgácstörési szempontból az a kedvezőbb, ha G minél kisebb értéket vesz fel, ugyanis ekkor nő a valószínűsége a természetes törésnek, így kevésbé terheljük a szerszámot. Viszont a túl alacsony G sem célszerű megoldás, mert ekkor apró, kiszámíthatatlan mozgású forgács keletkezik, vagy kenődik az anyag. (G optimális értéke technológia és anyagfüggő.)

- a forgácsleválasztási sebességtől:

A forgácsleválasztási sebesség a forgácsolósebességre (vágósebesség, v_c) vezethető vissza, ami meghatározza a forgácsként leválasztandó anyagrész deformációsebességét. Mind a deformáció, mind a deformációsebesség hatással van az anyag alakítási

felkeményedésére, ami egyrészt a forgácsolási erők növekedésében, másrészt a forgácsolás módosulásában (pl. alacsonyabb rugalmassági modulus miatt gyorsabb törés, így apróbb forgács keletkezik) nyilvánul meg. Az [12, 22. o.] forrás alapján egy lehetséges alakítási szilárdság egyenlet:

$$k_f = C_m \dot{\varphi}^m \quad (15)$$

ahol: k_f (MPa) - alakítási szilárdság;

C_m (MPa s^m) - konstans;

$\dot{\varphi}$ (1/s) - deformációsebesség;

m (-) - kitevő.

– a szerszámon alkalmazott forgácsoló geometriától.

e) Megmunkálhatósági index (machinability rate)

A megmunkálhatósági index pontrendszer vagy százalékos értékelés alapján minősít: egy referencianyagnál (a bázisanyagnál) tapasztalt jelenségekhez viszonyítja a vizsgált anyag jellemzőit. A 6. mellékletben pontrendszer alapú indexelés látható, ahol az osztályozás 1-5 pontig terjed: 1-es szám a legjobb, 5-ös a legkedvezőtlenebb forgácsolhatóságot jelenti a csoportban. A 7. melléklet a százalékos osztályozás mutat példát, ahol 100% jelzi a legjobb forgácsolhatóságot.

2.2. Forgácsolhatóság vizsgálati módszerei

Vizsgálati lehetőségek a forgácsolhatóság osztályozásához:

Két alapvető vizsgálati módszer különböztethető meg:

- „online” vizsgálat: Az adatgyűjtés a forgácsolási folyamattal párhuzamosan, azzal egyidőben történik. Ilyen módszerek:
 - Forgácsoló igénybevételek vizsgálata
 - Forgácsolás energiaigényének vizsgálata
- „offline” vizsgálat: Az adatgyűjtés a forgácsolást megelőzően vagy azt követően, a folyamat lefutásától függetlenül zajlik. Ilyen módszer:
 - Mechanikai igénybevételek vizsgálata
 - Forgácsolással létrehozott felület vizsgálata

Forgácsoló igénybevételek vizsgálata:

Erő, nyomaték mérése [2]:

a) Nyúlásmérő ellenállással:

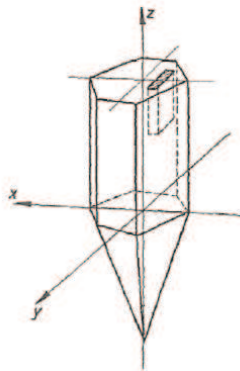
Az erő- és nyomatékmérés közvetett, a deformáció észlelésére visszavezethető módszer. Ennek fajtája a nyúlásmérő ellenállással történő mérés. Lényege, hogy a vizsgált test erő hatására deformálódik, melyet a testhez rögzített mérőeszköz ohmos ellenállásának változása kísér. Ilyen elven működnek a nyúlásmérő bélyegek. Ez passzív mérési módszer, azaz a műszer működtetéséhez külső energiaforrás szükséges, jelen esetben feszültségforrás, ami a műszer alapjelét generálja.



21. ábra: Nyúlásmérő bélyegek

b) Piezoelektromos szenzorral:

A piezokristály olyan egykristály, melyben adott deformáció hatására meghatározott mértékű villamos feszültség lép fel. Aktív mérőeszköz, mivel nincs szükség működtető energiaforrásra.



22. ábra: Piezoelektromos egykristály

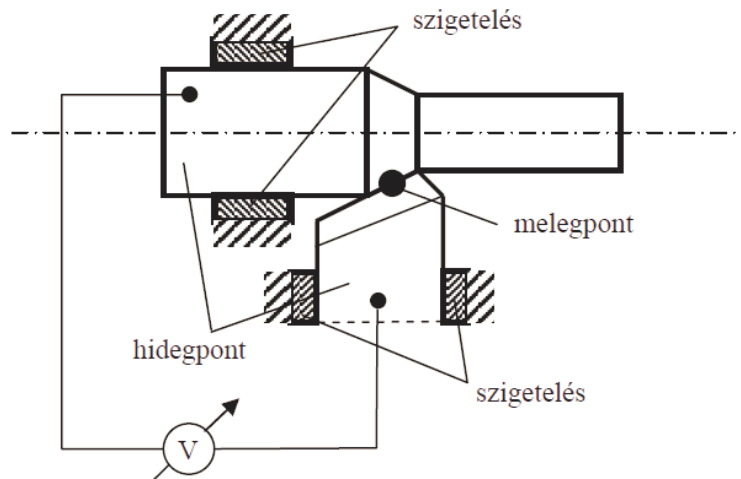
Hőmérséklet mérése [2]:

a) Hőmérsékletmérő ellenállással:

Ez a hőmérsékletváltozás mérésének közvetett módja. Elve, hogy hőmérsékletváltozás hatására megváltozik a mérőkör ohmos ellenállása, és ennek megfelelően változik a kimenő feszültségjel. Kalibrálást és jelátalakítást követően meghatározhatók az egyes hőmérséklet értékek. Ez passzív mérési módszer.

b) Termoelemmel:

Aktív hőmérsékletmérési módszer. Lényege, hogy két különböző anyagi minőségű, villamosan vezető anyag érintkezésénél potenciálkülönbség jön létre. Ez áramot



23. ábra: Egykéses, természetes termoelemes hőmérsékletmérés

Forgácsolás energiaigényének vizsgálata:

a) Teljesítményfelvétel mérésével:

A szerszámgép főorsójához kötött feszültség- és áramerősség mérő műszerrel egyszerűen meg lehet határozni a teljesítményfelvételt.

$$P = U \cdot I \quad (16)$$

ahol: P [W] - villamos teljesítmény;

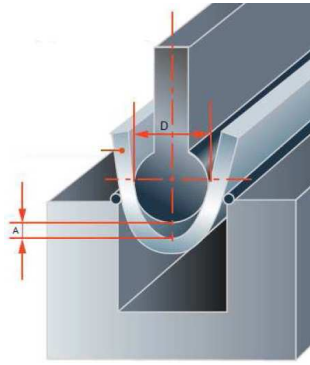
U [V] - villamos feszültség;

I [A] - áramerősség.

Mechanikai igénybevételek vizsgálata:

a) Hajlítópróbával:

A hajlítópróbából a próbatest szilárdságára és szívósságára lehet következtetni. Meghatározható a belső feszültség azon mértéke, amit az anyag már nem bír törés nélkül elviselni. Forgácsolás során ezt a feszültséget kell túllépni a forgácstőben, hogy az anyagleválasztás (nyírás) megtörténhessen.



24. ábra: Lemez hajlítópróba

b) Ütővizsgálat:

Az ütőmunka az anyagok szívósságának jellemzésére szolgál. Minél szívósabb az anyag, annál nagyobb deformációt képes elviselni repedés vagy törés nélkül. Forgácsolásnál ez befolyásolja pl. a legkisebb leválasztható forgácsvastagságot, a felület „kenődését” és a forgácstörést.

Forgácsolással létrehozott felület vizsgálata:

a) Felületi érdesség:

Felületi érdesség alatt a megmunkált felület mikrogeometriáját értjük. Vizsgálata történhet szemrevételezéssel, tapintással, tapintócsúcsos (tűs) érdességmérővel [2].

b) Keménység:

Az anyag keménysége a nyírással szembeni ellenálló képességét jelenti deformáció nélkül. A nagy keménység növeli a forgácsoló erőket, gyorsítja a szerszámkopást. A próbatest felületébe egy keményebb, meghatározott geometriájú mérőtestet préselünk, és a keletkezett lenyomattól lehet a keménységre következtetni. Több mérési módszer is létezik: Brinell, Rockwell-B, Rockwell-C, Vickers.

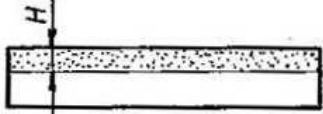
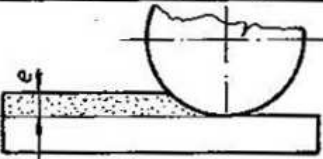
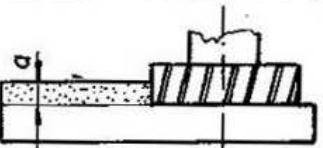
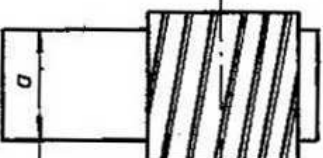
3. Kísérlettervezés és előkészítés

3.1. Megmunkálási módok, vizsgálati lehetőségek

Egy anyag forgácsolhatósági vizsgálatának többféle módja lehetséges. Az első és legalapvetőbb döntést a megmunkálási módok terén kell hozni: Milyen forgácsolási technológiával szeretnénk a kísérleteket elvégezni? Jelen dolgozat témája a hagyományos megmunkálási módokat érinti ó, ezért a lehetőségek: esztergálás, fúrás, marás. Az esztergálási és fúrási kísérletek széles körben elterjedtek, mivel eredmények jól általánosíthatók a kötött geometriával történő forgácsolási folyamatokra. A sorból kitűnik a marás: sajátos energetikai

és termelékenységi jellemzői miatt egyedi témakört képvisel a hagyományos forgácsoló megmunkálások csoportjában. Így a választás erre a technológia esett.

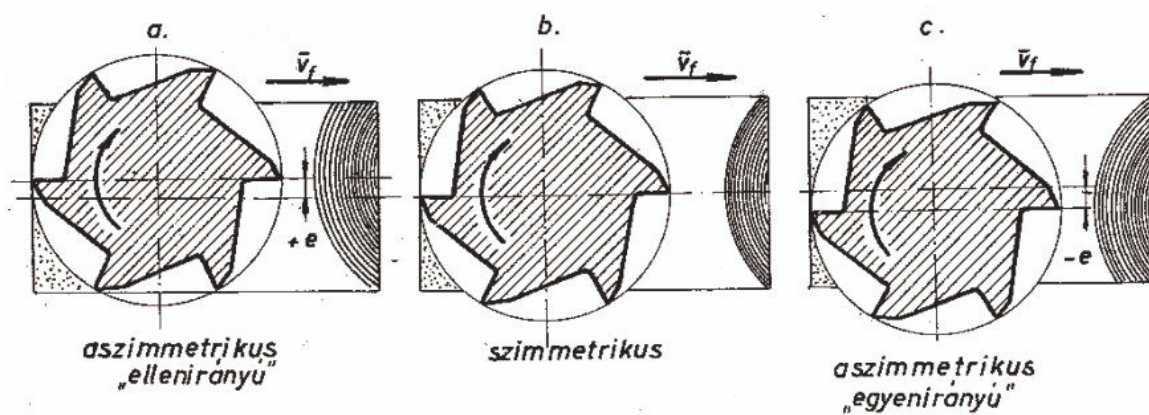
A maráson belül megkülönböztethető két alcsoport: a palástmarás és a homlokmarás. A palástmarás tipikusan keskeny oldalszakaszok, hornyok, furatok forgácsolási technológiája. Egy hétköznapi palásmaró esetén gyakorlatilag minden esetben egynél több forgácsolóél van fogásban, így az egy-egy élre ható terhelések megfigyelése nehéz vagy lehetetlen. Ezzel ellentétben a homlokmarásnál megoldható az egy szerszámmel történő forgácsolás. Ennek előnye, hogy a többi él zavaró hatása nélkül vizsgálható a forgácsleválasztás mechanizmusa a belépéstől egészen az él anyagból kilépéséig. Emellett a homlokmarás jellemzően kiterjedt síkfelületek gyors létrehozásához alkalmas módszer, így a termelékenységnek itt különösen nagy szerepe van. Tehát a döntés a homlokmarási jellegű kísérletek mellett szól.

Ráhagyás - vagy rétegméretetek		Fogás- és kapcsolási méretek	
		palástmarás	homlokmarás
vastagság v. mélység	 rétegvastagság	 kapcsolási mélység	 fogásmélység
szélesség	 rétegszélesség	 fogásszélesség	 kapcsolási szélesség

25. ábra: Palásmarás és homlokmarás összehasonlítása

Homlokmarás belül ismét szétválasztható két technológiai csoport: az egyenirányú és az ellenirányú marás. Az alapvető különbség a kettő között, hogy egyenirányú marás esetén a fokozatos bekezdés a szerszámot koptatja, míg az ellenirányú dinamikus, ütés jellegű igénybevételeknek teszi ki a forgácsolóélt. Jelen dolgozat témája az anyagok forgácsolhatóságának vizsgálata, nem pedig a szerszámtartam tanulmányozása, ezért

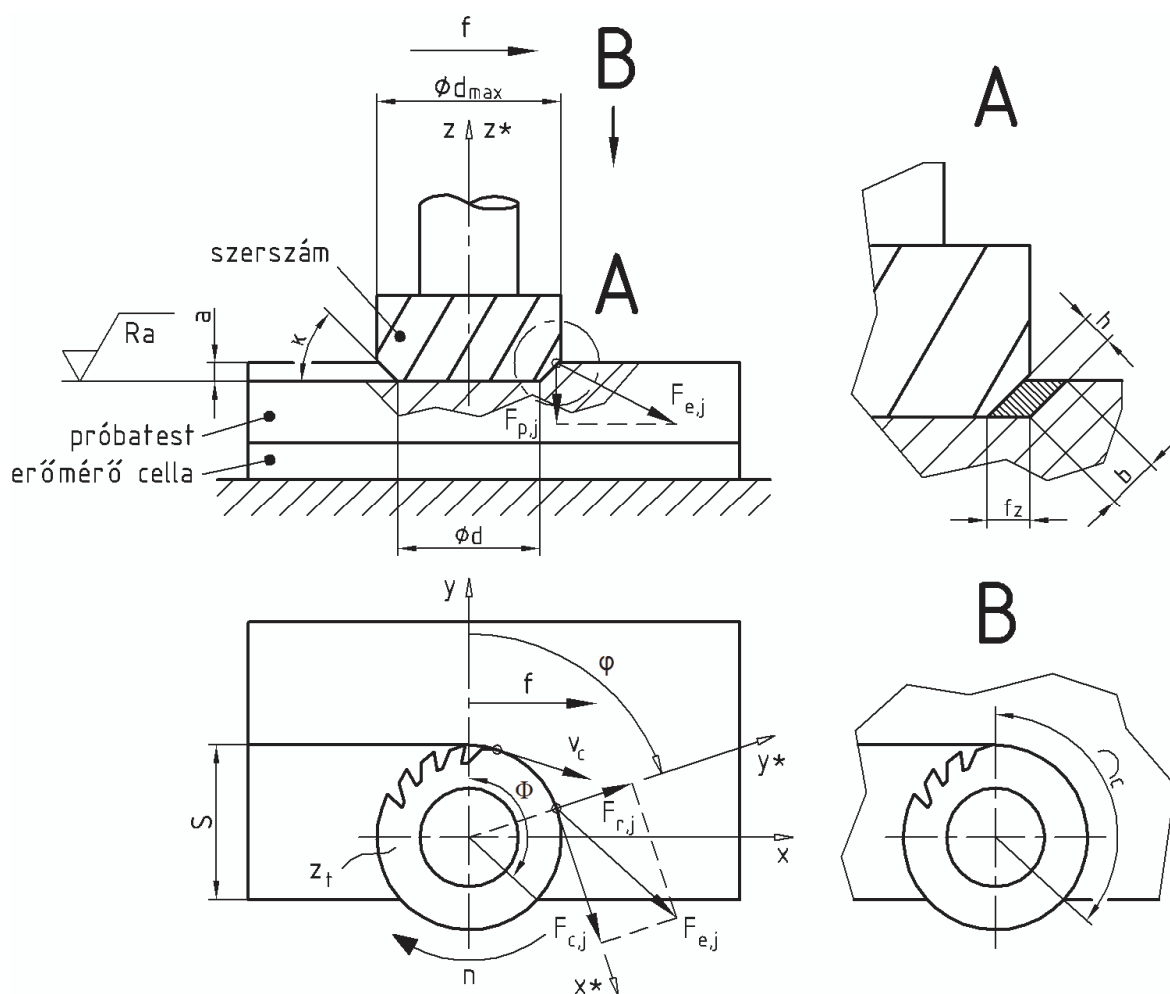
célszerű kerülni a dinamikus behatásokat. Így a kísérletek egyenirányú homlokmarással történnek.



26. ábra: Ellenirányú és egyenirányú homlokmarás összehasonlítása

3.2. Homlokmarási kísérlet elméleti háttere

A mérési összeállítás vázlata:



27. ábra: Homlokmarási kísérlet vázlata

A j -edik forgácsolóélre ható forgácsolóerő általános alakja [3, 80. o.]:

$$F_{c,j} = k \cdot A = k \cdot h \cdot b \quad (17)$$

ahol: k [N/mm²] - forgácskeresztmetszetre vonatkoztatott fajlagos forgácsolóerő;

A [mm²] - forgácskeresztmetszet;

h [mm] - forgácsvastagság;

b [mm] - forgácsszélesség;

A k értéke megmutatja, hogy az adott A keresztmetszetű forgács leválasztásához mekkora forgácsolóerő szükséges. Ez kifejezhető egységnyi forgácskeresztmetszetre fajlagosított értéként is, amit a forgácsolóerő hatványkitevős alakja tartalmaz [3, 81. o.]:

$$F_{c,j} = k_{c,1} \cdot h^{x_F} \cdot b^{y_F} \quad (18)$$

ahol: $k_{c,1}$ [N/mm^{x_F+y_F}] - erőállandó;

x_F, y_F [-] - empirikus kitevők.

Homlokmarásnál a közepes forgácsvastagság [3, 363. o.]:

$$h_k = \frac{f_z \cdot S}{c} \cdot \sin \kappa \quad (19)$$

ahol: f_z [mm] - szerszám fogankénti előtolása;

S [mm] - forgácsolási szélesség;

c [mm] - kapcsolódási ívhossz;

κ [fok] - szerszám főélelhelyezési szöge.

Továbbá megállapítható, hogy:

$$b = \frac{a}{\sin \kappa} \quad (20)$$

ahol: a [mm] - fogásmélység.

A j -edik forgácsolóélnél fellépő forgácsolóerő a (17) összefüggés alapján, amennyiben a forgácsvastagságot a közepes forgácsvastagsággal jellemezzük:

$$F_{c,j} = k \cdot h_k \cdot b = k \cdot \frac{f_z \cdot S}{c} \cdot \sin \kappa \cdot \frac{a}{\sin \kappa} = k \cdot \frac{f_z \cdot a \cdot S}{c} \quad (21)$$

A kapcsolódási ívhossz és a kapcsolószög kapcsolata:

$$c = \frac{d}{2} \phi \Leftrightarrow \phi = \frac{2c}{d} \quad (22)$$

ahol: d [mm] - szerszám névleges átmérője.

A kapcsolódási szám:

$$z_c = z_t \cdot \frac{\phi}{2\pi} = z_t \cdot \frac{2c}{2d\pi} = z_t \cdot \frac{c}{d\pi} \quad (23)$$

ahol: z_t [-] - szerszám fogszám.

A forgácsolóerő [3, 367. o.]:

$$F_c = F_{c,j} \cdot z_c = k \cdot \frac{f_z \cdot a \cdot S}{c} \cdot z_t \cdot \frac{c}{d\pi} = k \cdot \frac{f_z \cdot a \cdot S}{d\pi} \cdot z_t \quad (24)$$

A k kifejezhető a forgácsolási paraméterekkel is. A (17) és (18) kifejezések egyenlővé téve, kifejezhető a k és $k_{c,1}$ közötti kapcsolatot:

$$F_{c,j} = k \cdot h \cdot b = k_{c,1} \cdot h^{x_F} \cdot b^{y_F} \rightarrow k = \frac{k_{c,1} \cdot h^{x_F} \cdot b^{y_F}}{h \cdot b} = k_{c,1} \cdot h^{x_F-1} \cdot b^{y_F-1} \quad (25)$$

Amennyiben a forgácsvastagságot a közepes forgácsvastagsággal jellemezzük, és behelyettesítjük a (19) és (20) kifejezéseket a (25) kifejezésbe:

$$h = h_k \rightarrow k = k_{c,1} \cdot \left(\frac{f_z \cdot S}{c} \sin \kappa \right)^{x_F-1} \cdot \left(\frac{a}{\sin \kappa} \right)^{y_F-1} \quad (26)$$

Behelyettesítve a (26) kifejezést a (21) összefüggésbe:

$$F_c = k_{c,1} \cdot \left(\frac{f_z \cdot S}{c} \sin \kappa \right)^{x_F-1} \cdot \left(\frac{a}{\sin \kappa} \right)^{y_F-1} \cdot \frac{f_z \cdot a \cdot S}{d\pi} \cdot z_t \quad (27)$$

Rendezve a (27) összefüggést:

$$F_c = k_{c,1} \cdot \left(\frac{f_z \cdot S}{c} \right)^{x_F} \cdot a^{y_F} \cdot (\sin \kappa)^{x_F-y_F} \cdot \frac{c \cdot z_t}{d\pi}$$

Látható, hogy a rendezést követően a kifejezés utolsó tagjában visszakaptuk a kapcsolódási szám formuláját. Tehát homlokmarásnál a forgácsolóerő analitikus alakja a forgácsolási paraméterekkel kifejezve:

$$F_c = k_{c,1} \cdot \left(\frac{f_z \cdot S}{c} \right)^{x_F} \cdot a^{y_F} \cdot (\sin \kappa)^{x_F-y_F} \cdot z_c; \quad z_c = \frac{c \cdot z_t}{d\pi} \quad (28)$$

A kísérlet során az F_c erő értéke mérésel megállapítható, így a felírt formulában 3 ismeretlen szerepel: $k_{c,1}$, x_F és y_F . Ezek kifejezéséhez 3 egyenletet tartalmazó egyenletrendszerre van szükség. Szemléletesen a (26) kifejezés egy olyan elméleti görbét jelent, melynek közelében helyezkednek el a mérési pontok úgy, hogy azok átlagos abszolút eltérése az elméleti értékektől minimális. Ezt figyelembe véve, az elméleti görbe paraméterei a *legkisebb négyzetek módszerével* (továbbiakban: LNM) kiszámíthatók.

Logaritmizálva a (28) kifejezést, a függvénykapcsolat lineárisra transzformálható:

$$\lg F_c = \lg k_{c,1} + x_F \cdot (\lg f_z + \lg S + \lg \sin \kappa - \lg c) + y_F \cdot (\lg a - \lg \sin \kappa) + \lg z_c$$

Alkalmazzuk az alábbi jelöléseket:

$$E = \lg F_c \quad - \text{forgácsolóerő paraméter;}$$

$$\begin{aligned}
K &= \lg k_{c,1} && - \text{erőállandó paraméter;} \\
H &= \lg f_z + \lg S + \lg \sin \kappa - \lg c && - \text{forgácsvastagság paraméter;} \\
B &= \lg a - \lg \sin \kappa && - \text{forgácsszélesség paraméter;} \\
Z &= \lg z_c && - \text{kapcsolódás szám paraméter.}
\end{aligned}$$

Így a (28) kifejezés linearizált alakja:

$$E = K + x_F H + y_F B + Z \quad (29)$$

A (29) kifejezésre alkalmazva az LNM-t:

$$D = \sum_{i=1}^N (E_i - K - x_F H_i - y_F B_i - Z_i)^2 \rightarrow \min$$

ahol: D - az elméleti görbétől való eltérések négyzetösszege;

i - az adott mérés sorszáma;

N - mérések száma.

A K paraméter kizárólag a $k_{c,1}$ erőállandótól függ, ami közvetlenül a próbatest anyagjellemzőiből származtatható, így – tekintve, hogy a kísérlet ugyanarra az anyagminőségre vonatkozik – K értéke minden mérésen megegyezik és állandó. Hasonlóan változatlan marad a Z paraméter, ami geometriai paraméterekből származik. Ezért felírható:

$$K_i = K \text{ és } Z_i = Z, i = 1, 2, 3, \dots, N$$

Így a (29) kifejezésre alkalmazott LNM végleges alakja:

$$D(K, x_F, y_F) = \sum_{i=1}^N (E_i - K - x_F H_i - y_F B_i - Z)^2 \rightarrow \min \quad (30)$$

A eltérések négyzetösszegének minimuma a D függvény minimumában található:

$$\begin{aligned}
\text{I. } \frac{\partial D}{\partial K} &= 0 = -2 \sum_{i=1}^N (E_i - K - x_F H_i - y_F B_i - Z) \\
\text{II. } \frac{\partial D}{\partial x_F} &= 0 = -2 \sum_{i=1}^N (E_i - K - x_F H_i - y_F B_i - Z) \cdot H_i \\
\text{III. } \frac{\partial D}{\partial y_F} &= 0 = -2 \sum_{i=1}^N (E_i - K - x_F H_i - y_F B_i - Z) \cdot B_i
\end{aligned}$$

Elvégezve a lehetséges összevonásokat és egyszerűsítéseket:

$$\begin{aligned}
\text{I. } \frac{\partial D}{\partial K} &= 0 = \sum_{i=1}^N E_i - N \cdot K - x_F \sum_{i=1}^N H_i - y_F \sum_{i=1}^N B_i - N \cdot Z \\
\text{II. } \frac{\partial D}{\partial x_F} &= 0 = \sum_{i=1}^N E_i H_i - K \sum_{i=1}^N H_i - x_F \sum_{i=1}^N H_i^2 - y_F \sum_{i=1}^N H_i B_i - Z \sum_{i=1}^N H_i
\end{aligned}$$

$$\text{III. } \frac{\partial D}{\partial y_F} = 0 = \sum_{i=1}^N E_i B_i - K \sum_{i=1}^N B_i - x_F \sum_{i=1}^N H_i B_i - y_F \sum_{i=1}^N B_i^2 - Z \sum_{i=1}^N H_i$$

Az egyenletrendszert a változók szerint rendezve:

$$\begin{aligned} \text{I. } \sum_{i=1}^N E_i - N \cdot C &= N \cdot K + x_F \sum_{i=1}^N H_i + y_F \sum_{i=1}^N B_i \\ \text{II. } \sum_{i=1}^N E_i H_i - Z \sum_{i=1}^N H_i &= K \sum_{i=1}^N H_i + x_F \sum_{i=1}^N H_i^2 + y_F \sum_{i=1}^N H_i B_i \\ \text{III. } \sum_{i=1}^N E_i B_i - Z \sum_{i=1}^N H_i &= K \sum_{i=1}^N B_i + x_F \sum_{i=1}^N H_i B_i + y_F \sum_{i=1}^N B_i^2 \end{aligned}$$

Az egyenletrendszert célszerű vektoriális alakban is felírni, mivel az ismeretlenek kiszámításához alkalmazható numerikus megoldóprogramokban ezt könnyebben és áttekinthetőbben lehet algoritmizálni. A keresett alak:

$$\underline{\underline{A}} \underline{x} = \underline{b} \quad (31)$$

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^N H_i & \sum_{i=1}^N B_i \\ \sum_{i=1}^N H_i & \sum_{i=1}^N H_i^2 & \sum_{i=1}^N H_i B_i \\ \sum_{i=1}^N B_i & \sum_{i=1}^N H_i B_i & \sum_{i=1}^N B_i^2 \end{bmatrix}; \underline{x} = \begin{bmatrix} K \\ x_F \\ y_F \end{bmatrix}; \underline{b} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N E_i - N \cdot Z \\ \sum_{i=1}^N E_i H_i - Z \sum_{i=1}^N H_i \\ \sum_{i=1}^N E_i B_i - Z \sum_{i=1}^N B_i \end{bmatrix}$$

A (31) egyenlet analitikusan is megoldható, melyből megkapjuk $lgk_{c,1}$, x_F és y_F értékét.

Amennyiben csak 1 forgácsolóélel dolgozunk, a (28) kifejezés az alábbira egyszerűsödik:

$$F_{c,1} = k_{c,1} \cdot \left(\frac{f_z \cdot S}{c} \right)^{x_F} \cdot a^{y_F} \cdot (\sin \kappa)^{x_F - y_F} \quad (32)$$

Ebben az esetben a kapcsolószámnak nincs értelme, mivel csak két eset fordulhat elő:

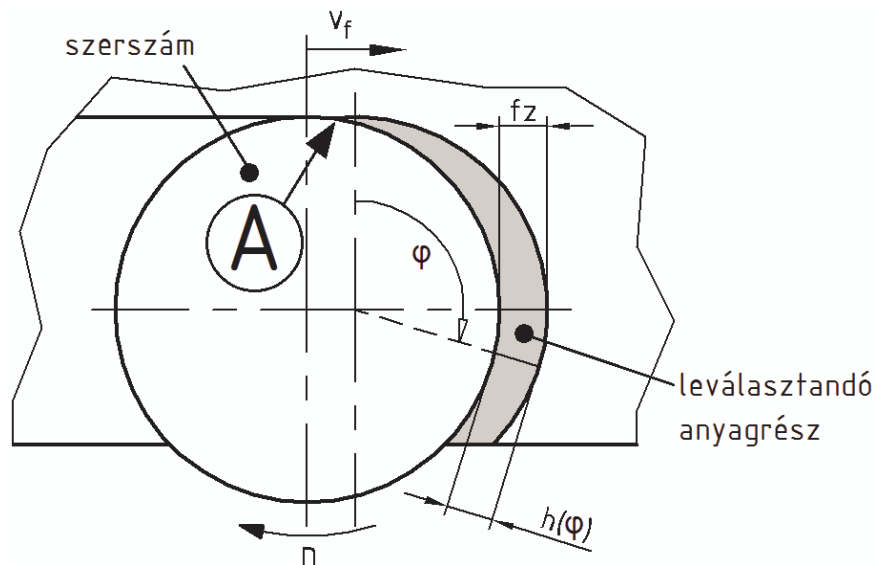
- a) a szerszám éle fogásban van, így hat erő a szerszámra és a munkadarabra;
- b) nincs fogásban az él, tehát nem lép fel igénybevétel.

Ezért a kiértékelés (31) egyenletében a Z kapcsolószám paraméter értéke zérus:

$$\underline{\underline{A}} \underline{x} = \underline{b} \quad (33)$$

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^N H_i & \sum_{i=1}^N B_i \\ \sum_{i=1}^N H_i & \sum_{i=1}^N H_i^2 & \sum_{i=1}^N H_i B_i \\ \sum_{i=1}^N B_i & \sum_{i=1}^N H_i B_i & \sum_{i=1}^N B_i^2 \end{bmatrix}; \underline{x} = \begin{bmatrix} K \\ x_F \\ y_F \end{bmatrix}; \underline{b} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N E_i \\ \sum_{i=1}^N E_i H_i \\ \sum_{i=1}^N E_i B_i \end{bmatrix}$$

Ilyen vizsgálat során lehetőség nyílik az egy fogáson belül fellépő erőváltozás mérésére is, ugyanis nem jelennek meg a többfogú marásra jellemző dinamikus torzulások. Az erőváltozás a forgácsvastagság folyamatos módosulása miatt lép fel, ami a szerszám szögelfordulásával van közvetlen kapcsolatban. A 28. ábra szemlélteti a h forgácsvastagság változását a φ elfordulás hatására. Látható, hogy h maximuma a $\varphi = 90^\circ$ helyzetben található, ekkor értéke megegyezik az f_z fogankénti előtolással.



28. ábra: Forgácsvastagság változása homlokmarásnál

A forgácsolóél a valóságban ciklois pályát ír le a munkadarab felületén. Amennyiben kellően kicsi f_z értéke, élhetünk a közelítéssel, hogy a ciklois ívét körívvel helyettesítsük. Mivel a későbbiekben ismertetett mérés során a jellemző arány:

$$\frac{f_{z,\max}}{d} = \frac{0,27}{125} = 2,16 \cdot 10^{-3}, \quad (34)$$

megteremti a lehetőséget erre az egyszerűsítésre.

A forgácsolóerő jellemzéséhez meg kell határozni a $h(\varphi)$ függvényt. Ehhez először ismerni kell, milyen peremfeltételeket lehet alkalmazni. Két nevezetes szöghelyzetet célszerű vizsgálni:

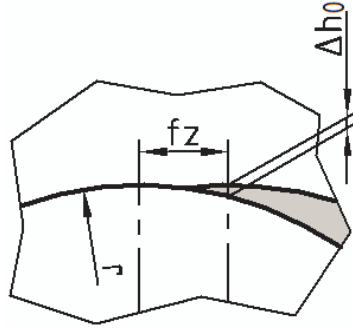
1. $\varphi = 90^\circ$

Ebben az esetben a 28. ábra alapján egyértelmű a megoldás: $h(\varphi = 90^\circ) = f_z$.

2. $\varphi = 0^\circ$

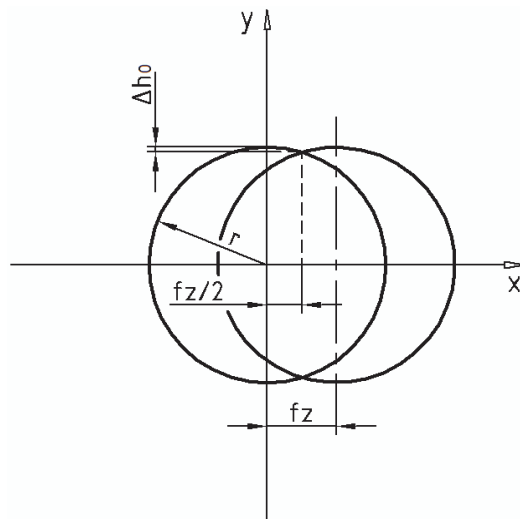
Ebben a szöghelyzetben a forgácsvastagság elméletileg nem zérus, mert az előtolás miatt a forgácsolóél pályája önmagát metszi, tehát az anyagleválasztás már előbb megkezdődik.

A 28. ábrán A-val jelzett belépési tartomány a következőképpen néz ki:



29. ábra: Belépési tartomány

A 29. ábrán látható, hogy a $\varphi = 0^\circ$ szöghelyzetben megjelenik egy Δh_0 forgácsvastagság. Ennek méretét koordináta geometriai megfontolások útján analitikusan is ki lehet fejezni. A szerszámot és a leválasztandó anyagrész határát egyaránt egy-egy r sugarú körrel vesszük figyelembe, melyek középpontja x irányban f_z értékével el vannak tolva egymástól. A szimmetria miatt a metszéspon az $x = f_z/2$ koordinátánál található.



30. ábra: A belépési tartomány koordináta geometriai vizsgálata

A kör egyenlete:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (35)$$

A két kör metszésponja a P_m pont, melynek koordinátái x_m és y_m . A 30. ábra alapján a következő megállításokat lehet tenni:

$$x_m = \frac{f_z}{2} \text{ és } \Delta h_0 = r - y_m \quad (36) \quad (37)$$

A (35) kifejezést felírva a P_m pontra:

$$x_m^2 + y_m^2 = r^2 \rightarrow y_m = \sqrt{r^2 - x_m^2} \quad (38)$$

Behelyettesítve a (36) és (38) kifejezéseket a (37) összefüggésbe, és figyelembe véve, hogy $r = d/2$:

$$\Delta h_0 = \frac{d}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{d^2 - f_z^2} \quad (39)$$

ahol: d – a szerszám névleges átmérője.

Erre tekintettel a mértékadó adatok ismét a (34) arányszámnál alkalmazottak:

$$d = 125 [\text{mm}], \quad f_{z,\max} = 0,27 [\text{mm/fog}]$$

$$\Delta h_{0,\max} = \frac{d}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{d^2 - f_{z,\max}^2} = \frac{125}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{125^2 - 0,27^2} = 1,46 \cdot 10^{-4} [\text{mm}] \quad (40)$$

Ez nagyságrendileg $[\mu\text{m}]$ alatti tartomány. A kísérlet során alkalmazott berendezések és eszközök nem tesznek lehetővé ilyen kicsi forgácsvastagsággal történő anyagleválasztást (ez a mikromarás témaköre), ezért élhetünk az alábbi egyszerűsítéssel:

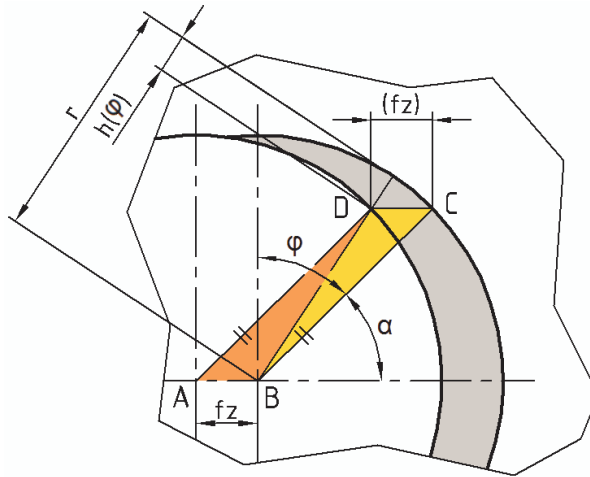
$$h(\varphi = 0^\circ) = 0$$

Összegezve az alkalmazandó peremfeltételeket:

$$\text{I. } \varphi = 0^\circ \rightarrow h(\varphi = 0^\circ) = 0$$

$$\text{II. } \varphi = 90^\circ \rightarrow h(\varphi = 90^\circ) = f_z$$

A $h(\varphi)$ adott φ szögelforduláshoz tartozó értékét az 31. ábra alapján meg lehet határozni.



31. ábra: A $h(\varphi)$ meghatározása

Az α dőlésszög:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad (41)$$

A BD szakasz hossza az ABD háromszögre alkalmazott *Koszinusz-tétellel* meghatározható:

$$\overline{BD} = \sqrt{f_z^2 + r^2 - 2 f_z r \cos \alpha} \quad (42)$$

A $h(\varphi)$ mindenkori értéke:

$$h = r - \overline{BD} \quad (43)$$

Összevonva a (41)-(43) kifejezéseket, és figyelembe véve, hogy $r = d/2$:

$$h(\varphi) = \frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4} - f_z d \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} \quad (44)$$

A (44) kifejezés vizsgálata a peremfeltételi helyekre:

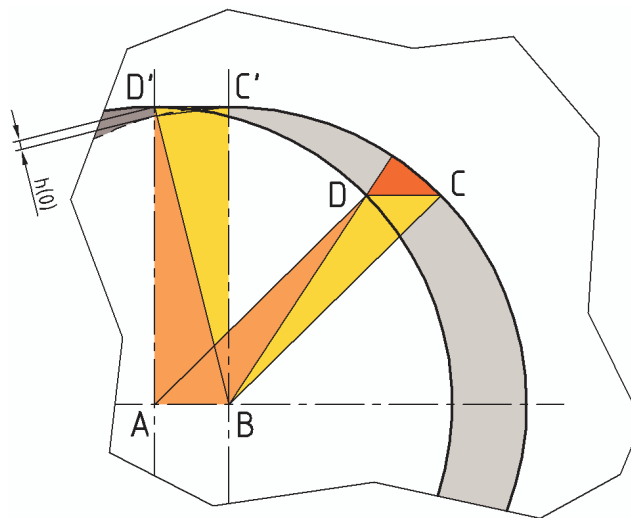
$$\text{I. } \varphi = 0^\circ \rightarrow h(0) = \frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4} - f_z d \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)} = \frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4}} \neq 0$$

$$\begin{aligned} \text{II. } \varphi = 90^\circ \rightarrow h\left(\frac{\pi}{2}\right) &= \frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4} - f_z d \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2}\right)} = \frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4} - f_z d} = \\ &= \frac{d}{2} - \sqrt{\left(\frac{d}{2} - f_z\right)^2} = \frac{d}{2} - \left(\frac{d}{2} - f_z\right) = f_z \end{aligned}$$

A II. peremfeltétel teljesül. Az I. feltételt viszont nem igazolja vissza a (44) kifejezés. Tovább elemezve ez utóbbi esetet:

$$h(0) = \frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4}} < 0, \text{ mivel } \frac{d}{2} < \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4}}$$

A negatív előjel miatt ez értelmetlen eredmény. A zérustól eltérő érték oka, hogy az ABCD rombusz C csúcsát a leválasztandó anyagréssz kontúrján csúsztatjuk végig, és így a $\varphi = 0^\circ$ helyzetben matematikailag negatív irányban adódik ki a $h(0)$ értékét megadó szakasz hossza. A 32. ábra alapján ez szemléletesen annyit jelent, hogy a piros tartomány „átfordul” a világossárga mögé.



32. ábra: A $h(0)$ ellentmondás forrása

A hiba kiküszöbölése az alábbi formulával történik:

$$h^*(\varphi) = h(\varphi) + \Delta h(\varphi) \quad (45)$$

ahol: h^* - módosított forgácsvastagság;

Δh - forgácsvastagság módosító tényező.

Δh összefüggését a következő alakban keressük:

$$\Delta h(\varphi) = \sum_{i=0}^n C_i \varphi^i$$

A 2 db peremfeltétel 2 szabadságfokot eredményez, ezért $n = 2$.

Tehát a módosító tényező formulája:

$$\Delta h(\varphi) = C_0 + C_1 \varphi \quad (46)$$

A (45) kifejezést megvizsgálva a peremfeltételeken:

$$\text{I. } \varphi = 0^\circ \rightarrow h^*(0) = 0 \rightarrow 0 = h(0) + C_0$$

$$\text{II. } \varphi = 90^\circ \rightarrow h^*\left(\frac{\pi}{2}\right) = h\left(\frac{\pi}{2}\right) \rightarrow h\left(\frac{\pi}{2}\right) = h\left(\frac{\pi}{2}\right) + C_0 + C_1 \cdot \frac{\pi}{2}$$

Az I. peremfeltételből következően:

$$0 = h(0) + C_0 \rightarrow C_0 = -h(0)$$

A II. peremfeltételből következően:

$$h\left(\frac{\pi}{2}\right) = h\left(\frac{\pi}{2}\right) + C_0 + C_1 \cdot \frac{\pi}{2}$$

$$0 = C_0 + C_1 \cdot \frac{\pi}{2} = -h(0) + C_1 \cdot \frac{\pi}{2} \rightarrow C_1 = \frac{2}{\pi} \cdot h(0)$$

Behelyettesítve C_0 -t és C_1 -t a (46) formulába:

$$\Delta h(\varphi) = -h(0) + \frac{2}{\pi} \varphi \cdot h(0) = \left(\frac{2}{\pi} \varphi - 1\right) \cdot h(0) \quad (47)$$

A korrekció lineáris jellegű, tehát a módosító tényező változásának mértéke közvetlenül a φ szög változásával van arányban.

Így a módosított forgácsvastagság függvény:

$$h^*(\varphi) = h(\varphi) + \Delta h(\varphi) = \frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4} - f_z d \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} + \left(\frac{2}{\pi} \varphi - 1\right) \cdot h(0) \quad (48)$$

$$h(0) = \frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4}}$$

Ellenőrzés peremfeltételekre:

$$\text{I. } \varphi = 0^\circ \rightarrow h^*(0) = \frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4}} - \left(\frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4}} \right) = 0$$

$$\begin{aligned} \text{II. } \varphi = 90^\circ \rightarrow h^*\left(\frac{\pi}{2}\right) &= \frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4}} - f_z d \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2}\right) + \left(\frac{2}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2} - 1\right) \cdot h(0) = \\ &= \frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4}} - f_z d = \frac{d}{2} - \sqrt{\left(\frac{d}{2} - f_z\right)^2} = f_z \end{aligned}$$

A peremfeltételek tehát teljesülnek. Érdekes még köztes szögállásokban is megvizsgálni az összefüggést, ennek egy lehetséges módja a szerkesztéses összehasonlítás. **AutoCAD 2007** programmal kirajzoltatva az adott helyzeteket, viszonyíthatók egymáshoz a számított és a „valós” értékek. A 1. táblázatban alkalmazott jelölések:

AutoCAD-del meghatározott forgácsvastagság:

$$h_A(\varphi) [\text{mm}]$$

Abszolút eltérések:

$$\delta_{h,A}(\varphi) = h_A(\varphi) - h(\varphi) [\text{mm}], \text{ illetve } \delta_{h^*,A}(\varphi) = h_A(\varphi) - h^*(\varphi) [\text{mm}]$$

Relatív eltérések:

$$\delta_{h,A}^{rel}(\varphi) = \left| \frac{h_A(\varphi) - h(\varphi)}{h_A(\varphi)} \right| \cdot 100 [\%], \text{ illetve } \delta_{h^*,A}^{rel}(\varphi) = \left| \frac{h_A(\varphi) - h^*(\varphi)}{h_A(\varphi)} \right| \cdot 100 [\%]$$

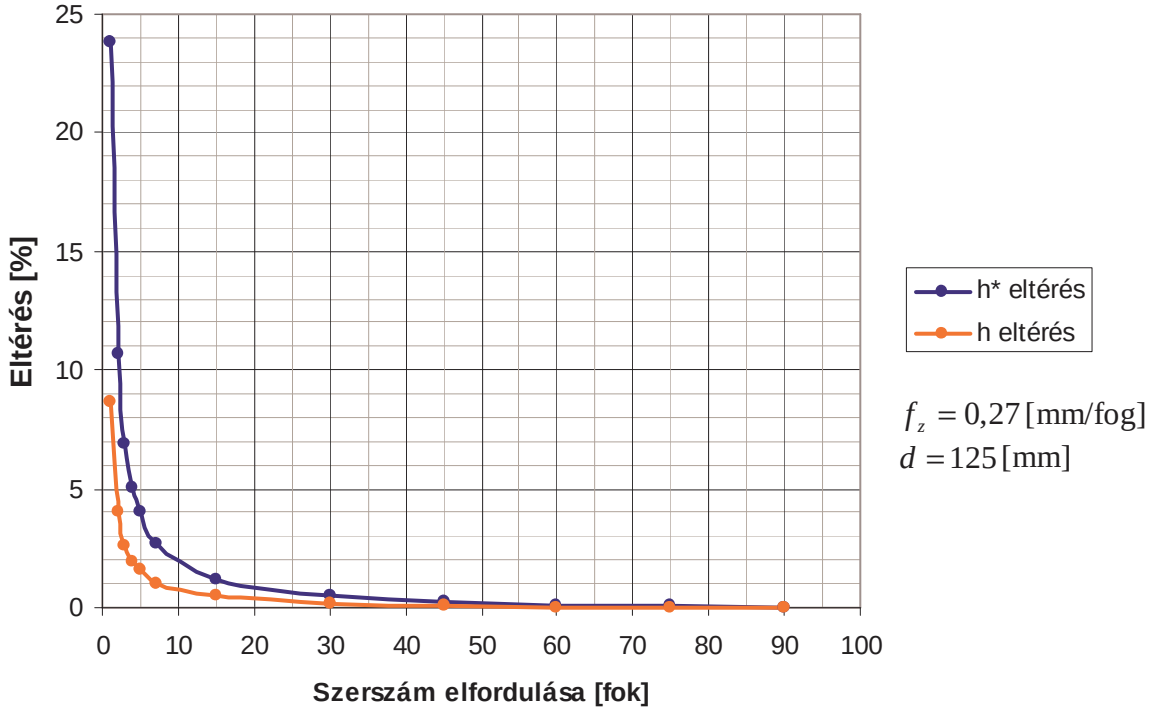
A mértékadó paraméterek továbbra is:

$$d = 125 [\text{mm}], \quad f_{z,\max} = 0,27 [\text{mm/fog}]$$

1. táblázat: Forgácsvastagság eltérés									
Ssz.	φ [fok]	Számított			AutoCAD	Eltérés			
		h [mm]	Δh [μm]	h* [mm]	h _A [mm]	$\delta_{h,A}$ [μm]	$\delta_{h,A}^{rel}$ [%]	$\delta_{h^*,A}$ [μm]	$\delta_{h^*,A}^{rel}$ [%]
1.	1	0,0041	0,5767	0,0047	0,0038	-0,9058	23,84	-0,3291	8,66
2.	2	0,0088	0,5702	0,0094	0,0085	-0,9105	10,71	-0,3403	4,00
3.	3	0,0135	0,5638	0,0141	0,0132	-0,9127	6,91	-0,3490	2,64
4.	4	0,0183	0,5573	0,0188	0,0179	-0,9110	5,09	-0,3537	1,98
5.	5	0,0230	0,5508	0,0235	0,0226	-0,9039	4,00	-0,3531	1,56
6.	7	0,0323	0,5378	0,0329	0,0320	-0,8677	2,71	-0,3299	1,03
7.	15	0,0693	0,4860	0,0698	0,0690	-0,8224	1,19	-0,3364	0,49
8.	30	0,1346	0,3888	0,1350	0,1343	-0,6505	0,48	-0,2617	0,19
9.	45	0,1906	0,2916	0,1909	0,1905	-0,4179	0,22	-0,1263	0,07
10.	60	0,2337	0,1944	0,2339	0,2336	-0,2749	0,12	-0,0805	0,03
11.	75	0,2608	0,0972	0,2609	0,2607	-0,1579	0,06	-0,0607	0,02
12.	90	0,2700	0,0000	0,2700	0,2700	0,0000	0,00	0,0000	0,00

A relatív eltérések alakulását az 2. diagram ábrázolja:

2. diagram: Relatív eltérések a számított és szerkesztett forgácsvastagságok között



Látható, hogy a módosított forgácsvastagság függvény esetében nagyobb a relatív eltérés, mint az eredeti összefüggés ugyanazon pontjainál. Ezért célszerűbb inkább a φ értéktartományára kikötést tenni: az 1. diagramon látható, hogy a $\delta_{h,A}^{rel}$ eltérés értéke már $\varphi = 2^\circ$ -nál 5% alá süllyed. Az f_z csökkentésével a hiba értéke is csökken: ez a 32. ábra alapján belátható. Mivel a forgácsvastagság változása szimmetrikus a v_f előtolással párhuzamos szerszámtengelyre (ld. 28. ábra, 30. oldal), felírható az alábbi alkalmazási kritérium:

$$2^\circ \leq \varphi \leq 178^\circ$$

Tehát a $h(\varphi)$ forgácsvastagság φ szerinti analitikus meghatározására alkalmazható függvény:

$$h(\varphi) = \frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4} - f_z d \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} \quad (49)$$

$$\text{ha } 2^\circ \leq \varphi \leq 178^\circ \text{ és } f_z \leq 0,27 \text{ [mm/fog] és } d = 125 \text{ [mm]}$$

Mivel a származtatás f_z -ből történt, a κ főélelhelyezési szög itt is befolyásolja h valós értékét. Ezt ld. a (50) összefüggésnél.

A forgácsolóerő kifejezhető a szögelfordulás függvényében is. Ezt a (49) kifejezés (18)-ba történő behelyettesítésével lehet felírni:

$$F_{c,1} = k_{c,1} \cdot h^{x_F}(\varphi) \cdot b^{y_F} = k_{c,1} \cdot \left(\frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4} - f_z d \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} \right)^{x_F} \cdot b^{y_F}$$

Figyelembe véve a κ főélelhelyezési szöget:

$$F_{c,1} = k_{c,1} \cdot \left[\left(\frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4} - f_z d \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} \right) \cdot \sin \kappa \right]^{x_F} \cdot \left(\frac{a}{\sin \kappa} \right)^{y_F}$$

$$F_{c,1} = k_{c,1} \cdot \left(\frac{d}{2} - \sqrt{f_z^2 + \frac{d^2}{4} - f_z d \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} \right)^{x_F} \cdot a^{y_F} \cdot (\sin \kappa)^{x_F - y_F} \quad (50)$$

3.3. Homlokmarási kísérlet gyakorlati előkészítése (hardver környezet)

A végleges kísérletterv összeállítása előtt célszerű megvizsgálni, milyen feltételek adottak a kívánt kísérletsorozathoz. A vizsgálatok a BME Gyártástudomány és –technológia Tanszék G épületi műhelyében történtek a 32. és 33. ábrán látható berendezésekkel.



33. ábra: VF-22 függőleges marógép és KISTLER 9281B piezoelektromos erőmérő



34. ábra: VF-22 marógéphez rendelt mérőhely KISTLER 9863A feszültségjel erősítővel



35. ábra: Widia 125 R-6 szerszámtest



36. ábra: Kennametal TPCN1603PPTN KC725M keménymét lapkák

A VF-22 marógép főbb adatai:

- Főorsó teljesítmény: $P_{max} = 7$ [kW]
- Munkatér:
 - o X irányban: 260 [mm]
 - o Y irányban: 130 [mm]
 - o Z irányban: 130 [mm]
- A beállítható paraméterek:
 - o Fordulatszám [ford/min]: 19, 23, 30, 37, 47, 60, 75, 95, 118, 150, 190, 235, 360, 375, 475, 600, 750, 950, 1180, 1500
 - o Előtolás [mm/min]: 9.8, 12.5, 16.5, 19, 25, 33, 39, 50, 66, 78, 100, 125, 157, 198, 250, 315, 397, 500
- Szerszámbe fogás: ISO50 kúp

Szerszám:

- Szerszámtest: Widia 125 R-6
 - Névleges átmérő: $d = 125$ [mm]
 - Fogság: $z_{t,max} = 6$
 - Befogás: ISO50 kúp

- Lapka: Kennametal TPCN1603PPTN KC725M

A marógépre felszerelt KISTLER 9281B piezoelektromos erőmérő főbb adatai:

- Mérőfelület: 600x400 [mm]
- Mérési tartomány:
 - o X irányban: -10...+10 [kN]
 - o Y irányban: -10...+10 [kN]
 - o Z irányban: -10...+20 [kN]

Az erőmérőhöz csatlakoztatott KISTLER 9863A feszültégjel erősítő főbb adatai:

- Beállítható erősítések:
 - o X és Y irányban [kN/V]: 0.05, 0.2, 1, 5, 20
 - o Z irányban [kN/V]: 0.1, 0.4, 2, 10, 40

A mérési jeleket feldolgozó számítógép főbb adatai:

- Processzor: Intel Pentium 4, 2,66 GHz
- RAM: 1,25 GB
- Operációs rendszer: Windows XP (SP3 32-bit)
- Egyéb programok: LabView 7, Microsoft Office csomag

Tesztméréshez készleten lévő próbadarab:

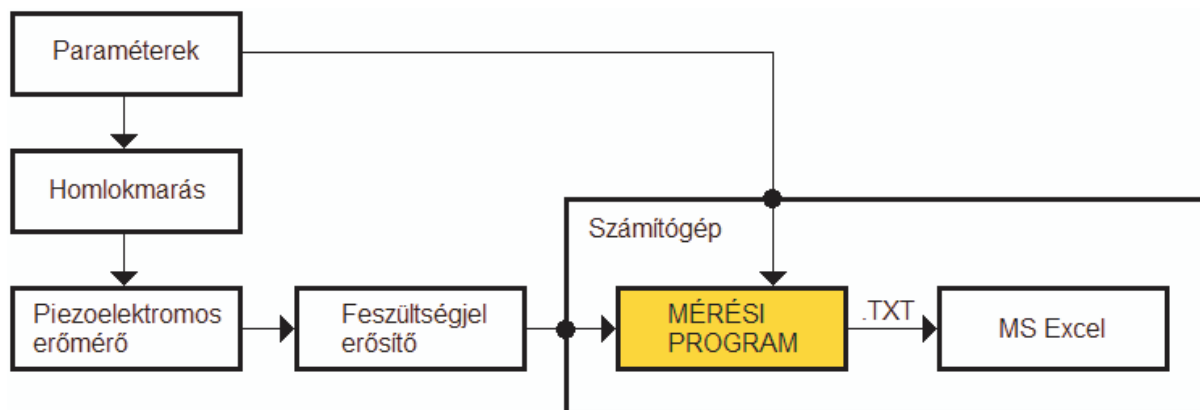
- Anyaga: C60
- Befoglaló méretek: 250x75x60 [mm]

3.4. Mérőprogram homlokmarási kísérletekhez (szoftver környezet)

Az erősítőtől érkező jeleket a kiértékelés érdekében fel kell dolgozni és archiválni. A számítógépre telepített **LabView 7** programkörnyezete megfelel egy olyan alkalmazás létrehozásához, mellyel a felsorolt feladatok könnyen megoldhatók. A készítendő szoftverrel szemben támasztott követelmények:

1. Mérési adatok kezelése: regisztrálás, rendszerezés, archiválás
2. Homlokmarási kísérletekhez optimált felépítés
3. Előzetes kiértékelési funkciók: blokkosítás, adatnormálás (ld. 39. ábra)
4. Parametrikus felépítés a szélesebb körű alkalmazhatóság érdekében
5. Felhasználóbarát kezelőfelület

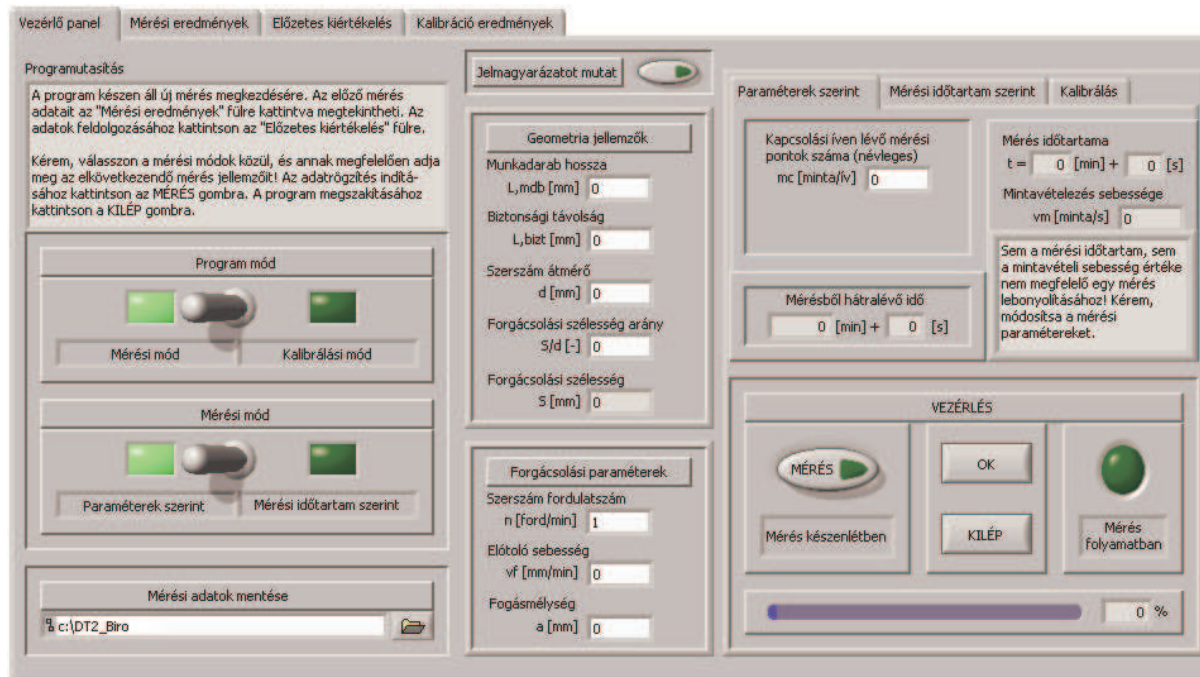
Az adatmentés legegyszerűbb módja „.txt” formátumú szöveges fájlok létrehozása: ez a formátum a legtöbb táblázatkezelő és matematikai szoftverrel kompatibilis, az adatok könnyen hozzáférhetők. A mérőprogram által feldolgozott adatok részletes kiértékelésére a **Microsoft Excel** táblázatkezelő megfelel. Ezek alapján a teljes mérési rendszer felépítése:



37. ábra: A mérőprogram helye a mérési és kiértékelési láncban

Az eddigiekben ismertetett szempontok alapján létrehozott és a kritériumoknak eleget tevő mérőprogramhoz dokumentációja és a felhasználói útmutató az 1. mellékletben található.

A program kezelőfelülete:



38. ábra: Mérőprogram felhasználói felülete

4. Kísérlet kivitelezés

A tesztmérésekre 2012. október 24-én került sor.

A kísérletsorozat állandó jellemzői:

– Próbatétel anyaga: C60

– Szerszám: Widia 125 R-6

Névleges átmérő: $d = 125$ [mm]

Fogsorszám: $z_t = 1$

Lapka: Kennametal TPCN1603PPTN KC725M

– Geometria:

Forgácsolási szélesség: $S = 87,5$ [mm] ($S/d = 0,7$)

Kapcsolódási szög: $\Phi = 113,58^\circ$

Az alkalmazott paramétersor és mintavételezési beállítások:

2. táblázat: Tesztmérés paramétersor				
Ssz.	n [ford/min]	vf [mm/min]	a [mm]	mc [minta/ív]
1.	475	50	2,1	390
2.	475	66	1,8	390
3.	475	78	1,5	390
4.	475	100	1,2	390
5.	475	125	0,8	390
6.	300	50	2,1	600
7.	375	66	1,8	500
8.	475	78	1,5	390
9.	600	100	1,2	310
10.	750	125	0,8	250
11.	300	39	1,5	630
12.	375	50	1,5	500

Az m_c értéke megmutatja, hogy a c kapcsolódási íven hány darab mérési pont helyezkedik el.

Tapasztalatok a mérés közben:

- A mérőprogram az elvártaknak megfelelően működik.
- A 2. táblázatban felsorolt paraméter variációk által szolgáltatott adatsorok mindegyike alkalmas további értékelésre.
- A kopás mértéke miatt egy alkalommal: a 4. és 5. sz. mérés között kellett cserélni a lapkát.



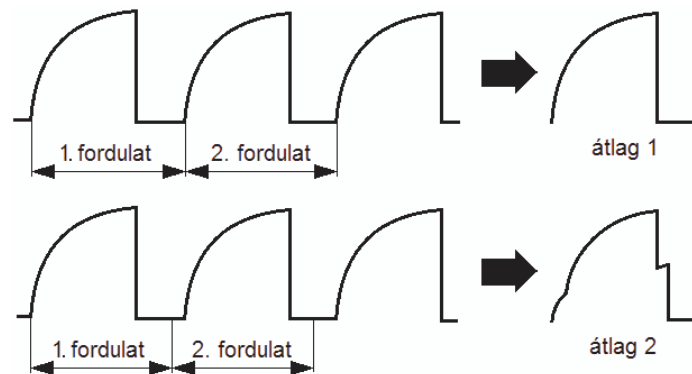
39. ábra: Próbatétel a kísérletsorozatot követően

5. Kiértékelés

A mérési adatok helyes kiértékelésének két feltétele van:

1. Szinkronitás:

Az adatok normálása alatt az egymást követő szerszámfordulatokhoz tartozó adatsorok egymással történő átlagolása értendő, ezáltal csökkenthető a mérési adatokat terhelő zajhiba (ld. 39. ábrán az „átlag 1”-et). Amennyiben az 1 szerszámfordulathoz tartozó mérési pontok száma pontatlan, az átlagolás „elcsúszik”, és így a normált görbe torzul (átlag 2). A szinkronitás finomhangolása manuálisan történik a mérőprogram kiértékelő moduljában. Hatékony módszer, ha az erőgörbék jellegzetességeit megfigyeljük, és ezekhez viszonyítjuk a beállításokat pl. hirtelen élkilépésnél az erők megszűnnek, tehát a grafikonokon ebben a szöghelyzetben elméletileg függőleges vonalat kell látnunk.



40. ábra: Normálás és szinkronitási hiba

2. Kezdő szöghelyzet megállapítása:

A forgácsolási erők értékeit vektortranszformációval kapjuk az erőmérő x,y,z koordináta rendszerében mért adatokból (ld. (56) kifejezés). A helyes transzformáció feltétele, hogy a $\varphi = 0^\circ$ pozíciót, azaz a forgácsleválasztás elméleti kezdőpontjának helyzetét pontosan meghatározzuk (ld. 27. ábra). Az esetleges eltérés a transzformációs szögfüggvények miatt hamis és értelmezhetetlen eredményeket produkálhat. A kezdő szöghelyzet megállapítása manuálisan történik a mérőprogram kiértékelő moduljában: cél, hogy a 3 koordináta tengely mentén felvett adatsorban a szerszám és a próbatest kontaktját megelőző utolsó mérési pont kerüljön a grafikon origójába. Hogy ez mennyire sikerülhet és sikerült, a program kezelőjének belátásán múlik.

5.1. Kiértékelés menete: példabemutató

A mérések kiértékelésének menetének bemutatása az 1. sz. mérésen keresztül történik, melynek specifikus jellemzői:

- Forgácsolási paraméterek: $n = 475$ [ford/min]
 $v_f = 50$ [mm/min]
 $a = 2,1$ [mm]
- Mintavételi jellemzők:
 - Pontok száma a kapcsolási ívhosszon: $m_c = 390$ [minta/ív]
 - Mintavételi sebesség: $v_m = 9792,92$ [minta/s]
 - Erősítés:
 - X irányban: $\varepsilon_x = 5$ [kN/V]
 - Y irányban: $\varepsilon_y = 5$ [kN/V]
 - Z irányban: $\varepsilon_z = 2$ [kN/V]

Egy szerszámfordulat névleges időtartama:

$$t_{n1} = \frac{60}{n} = \frac{60}{475} = 0,126 \text{ [s]} \quad (51)$$

Egy fordulat alatt rögzített mérési pontok névleges száma:

$$m_{n1} = t_{n1} \cdot v_m = 0,126 \cdot 9792,92 = 1237 \text{ [minta/ford]} \quad (52)$$

Két mérési pont közötti névleges szerszám szögelfordulás:

$$\varphi_{n1} = \frac{360}{m_{n1}} = \frac{360}{1237} = 0,291^\circ \quad (53)$$

A kiértékelés során az $m_{n1}^* = 1217$ [minta/ford] érték bizonyult megfelelőnek az adatok normálásához szükséges szinkronizáláshoz. Amennyiben v_m értékét pontosnak és állandónak tekintjük, a valós szerszám fordulatszám:

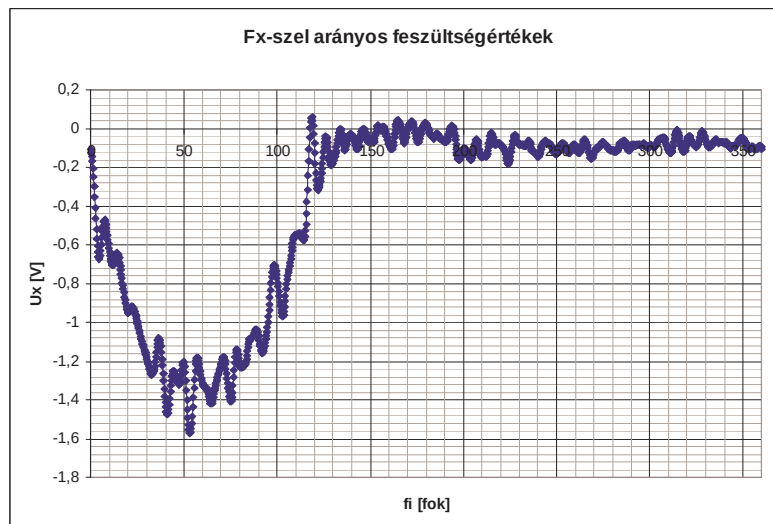
$$n^* = \frac{60v_m}{m_{n1}^*} = \frac{60 \cdot 9792,92}{1217} = 482,8 [\text{ford/min}] \quad (54)$$

A fordulatszámok relatív eltérése:

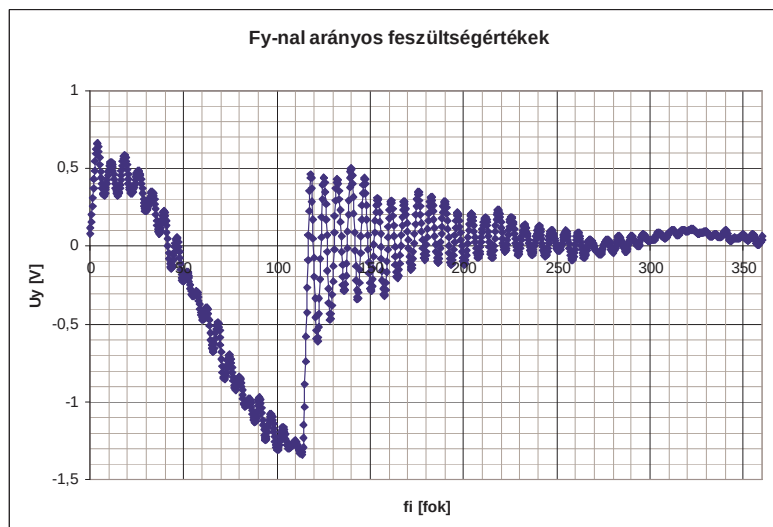
$$\delta_n = \left| \frac{n - n^*}{n} \right| \cdot 100 = \left| \frac{475 - 482,8}{475} \right| \cdot 100 = 1,52 [\%] \quad (55)$$

Ez az eltérés abból adódhat, hogy a főorsó tényleges fordulatszáma eltér a névlegestől.

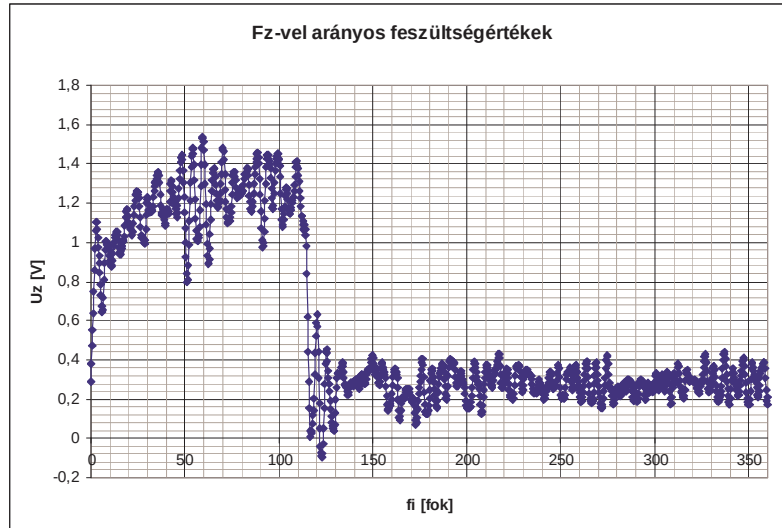
A mérési adatok normálása 20 szerszámfordulathoz tartozó értékek átlagolásával történt. Így a normált adatsorok diagramon ábrázolva:



41. ábra: X irányú erőértékekkel arányos feszültségjel (1. sz. mérés)



42. ábra: Y irányú erőértékekkel arányos feszültségjel (1. sz. mérés)



43. ábra: Z irányú erőértékekkel arányos feszültségjel (1. sz. mérés)

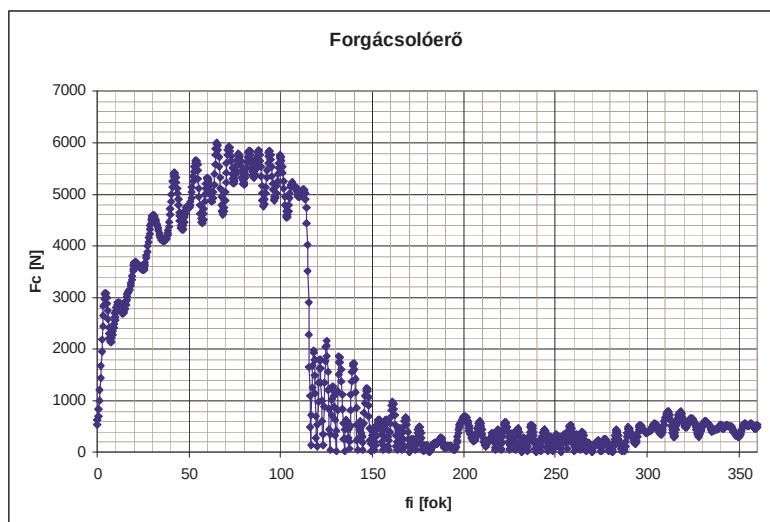
Az $U_y(\varphi)$ grafikonon jól megfigyelhető a próbatest rezgése, miután a forgácsolóél kilépett az anyagból. Ahhoz, hogy eldöntsük, megfelelő eredményekkel szolgálhat a mérés, a következő jellemzőt célszerű megvizsgálni:

A kapcsolódási szög értékénél az U feszültséggörbében törésnek kell lennie. Ez az a szögállás, ahol a forgácsolóél kilép a próbatest anyagából, tehát a forgácsolás miatt fellépő erőkomponenseknek „azonnal” zérus közeli értékre kell esniük. A diagramokon ez a $\varphi \approx 113...119^\circ$ értékek közelében található. Ez a leolvasott értéktartomány elfogadható, tehát a mérés megfelelő lehet.

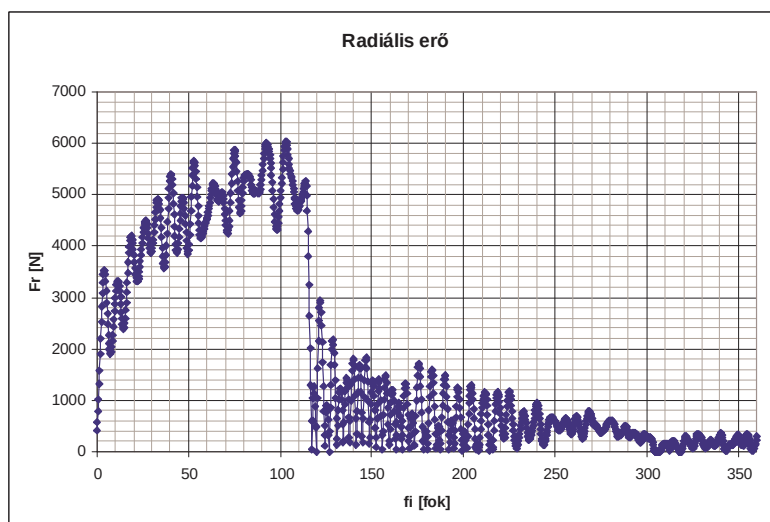
A fenti szempontok alapján a mérési adatok alkalmasnak tűnnek további kiértékeléshez. A forgácsolásnál fellépő erők megállapításához az alábbi transzformációt szükséges elvégezni:

$$\begin{bmatrix} F_c \\ F_r \\ F_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & -\cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x U_x \\ \varepsilon_y U_y \\ \varepsilon_z F_z \end{bmatrix} \rightarrow \begin{aligned} F_c &= \varepsilon_x U_x \cos \varphi + \varepsilon_y U_y \sin \varphi \\ F_r &= \varepsilon_x U_x \sin \varphi - \varepsilon_y U_y \cos \varphi \\ F_p &= \varepsilon_z U_z \end{aligned} \quad (56)$$

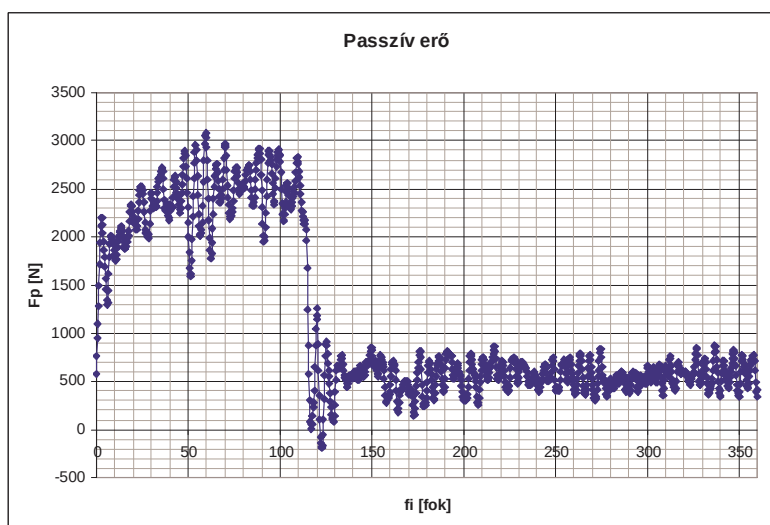
Így a forgácsolásnál fellépő erők görbéje:



44. ábra: Forgácsolóerő (1. sz. mérés)



45. ábra: Radiális erő (1. sz. mérés)



46. ábra: Passzív erő (1. sz. mérés)

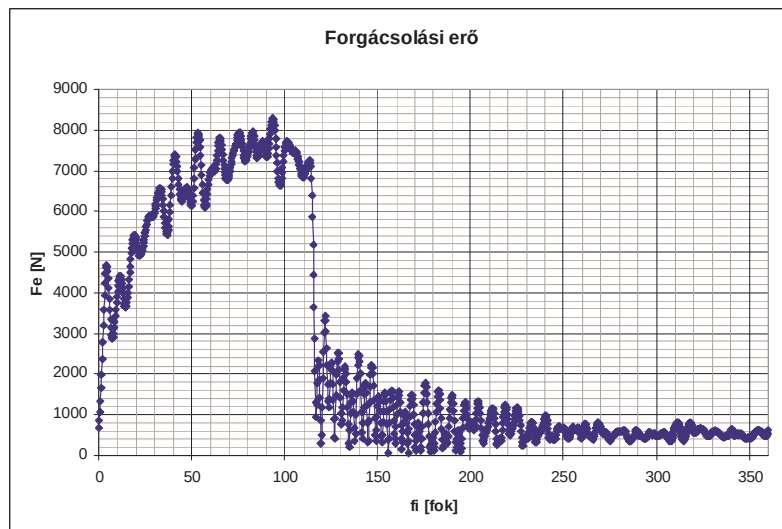
A forgácsolási erő:

$$F_e = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (57)$$

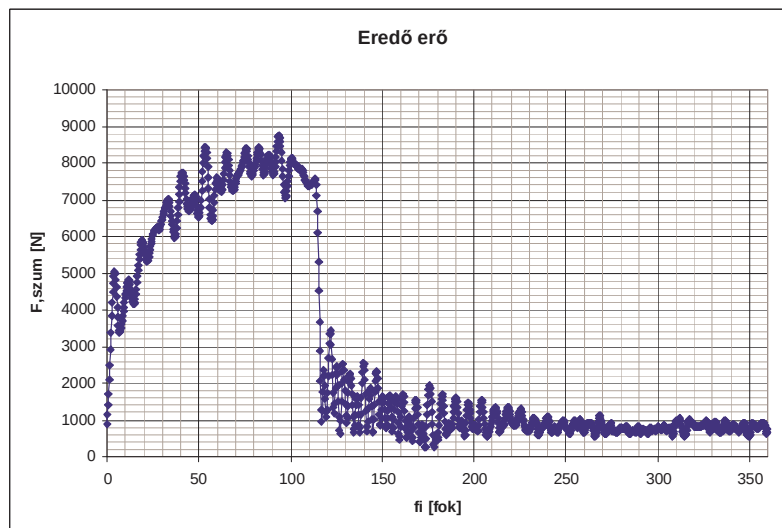
Az eredő erő:

$$F_\Sigma = \sqrt{F_e^2 + F_p^2} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (58)$$

A forgácsolási és az eredő erő grafikonon ábrázolva:



47. ábra: Forgácsolási erő (1. sz. mérés)



48. ábra: Eredő erő (1. sz. mérés)

Látható, hogy az eredő erő görbéjének vízszintes tengelye 600-800 [N] körüli eltolódással rendelkezik a zérus értéktől. Ez két komponens összegéből ered: a passzív erő és a forgácsolási erő is egyaránt kb. 500 [N] eltolással jelenik meg. Ez a feltételezés a (58) összefüggés segítségével igazolható:

$$F_{e,eltol\acute{a}s} = F_{p,eltol\acute{a}s} = 500 \text{ [N]}$$

$$F_{\Sigma,eltol\acute{a}s} = \sqrt{F_{e,eltol\acute{a}s}^2 + F_{p,eltol\acute{a}s}^2} = \sqrt{500^2 + 500^2} = 707 \text{ [N]}$$

Ekkora hibája az erőmérőnek nem lehet, mivel terheletlen állapotban mindig zérus közeli értékeket mér. Tehát a mérést valamilyen külső tényező konstans jelleggel torzította.

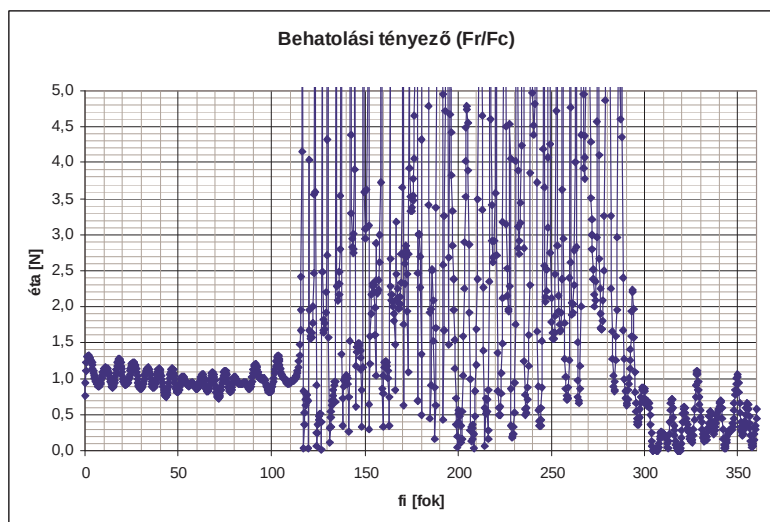
A forgácsolási folyamat két jellemző értéke a k fajlagos forgácsolóerő és a η behatolási tényező, melyek az alábbi módon értelmezendők:

$$k = \frac{F_c}{A}, \text{ ahol } A = h \cdot b \text{ a forgácskeresztmetszet;} \quad (59)$$

$$\eta = \frac{F_r}{F_c} \quad (60)$$

A k megmutatja, hogy egységnyi keresztmetszetű forgács leválasztásához mekkora erő szükséges. Az η erőhányados a forgácsoló- és radiális erő viszonyát mutatja meg, utalva az anyag felhasítással szembeni ellenállására.

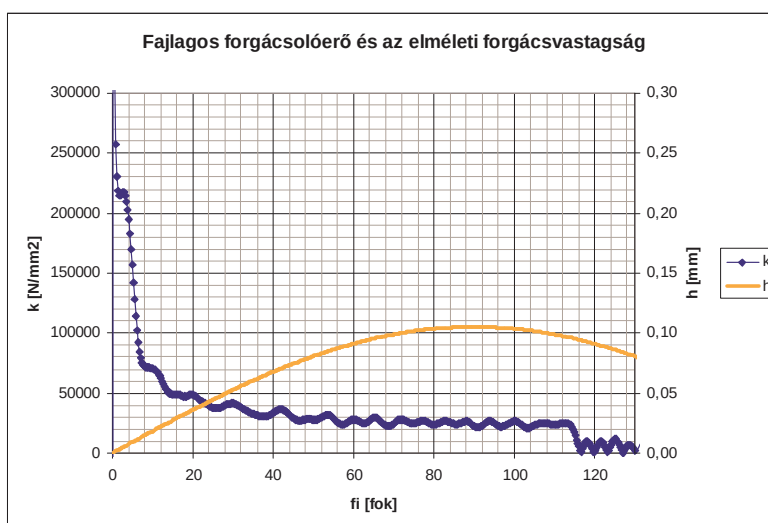
Az η alakulása grafikonon ábrázolva:



49. ábra: Behatolási tényező (1. sz. mérés)

A behatolási tényező grafikonján több, valószínűtlenül kiugró pont v. pontthalmaz is látható. A $\varphi = 0 \dots 113^\circ$ tartományon (ahol a szerszám fogásban van) stabil képet mutat az η alakulása. A szerszám kilépést követően ez a rend felbomlik, és kb. 180° szögelfordulást követően csillapodik az adatok oszcillálása. A nagymértékű ingadozás oka a próbatest rezgése és az ebből származó, kontrollálatlan erőhatások lehetnek. A stabil szakasznál jól látszódik, hogy a behatolási tényező az $\eta \approx 1$ értéket veszi fel. Ez reális, mivel ez a mérés kopott lapka mellett történt.

A k alakulása grafikonon ábrázolva:



50. ábra: Fajlagos forgácsolóerő (1. sz. mérés)

A fajlagos forgácsolóerő grafikonja jól visszaadja a várt jelleget. Bár a rezgés hatása itt is jelen van, megfigyelhető a kis forgácsvastagságoknál jellemző fajlagos erő növekedése, és a $\varphi = 60 \dots 113^\circ$ tartományokon belüli stabilitás, ahol $k = 20000 \dots 30000$ [N/mm²] nagyságrendben mozog.

A forgácsolóerő analitikus alakjának meghatározásához szükség van minden egyes mérés pontra. Egy mérési pont 3 elemből áll:

1. Mérési adatokból megállapított forgácsolóerő ($F_{c,mért}$)
2. Forgácsvastagság (h)
3. Forgácsszélesség (b)

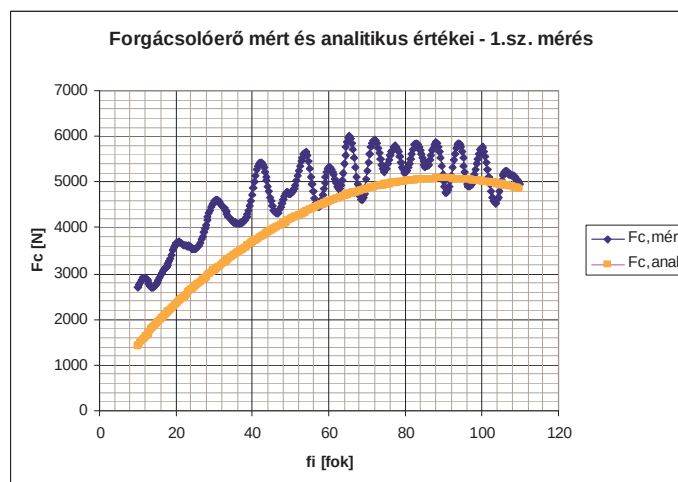
Az analitikus alak meghatározásához nem alkalmas a teljes, 113° kapcsolószöghöz tartozó adatsor. Több mérés (pl. 4. sz. mérés) grafikonjainál is megfigyelő, hogy a bekezdő és kilépő szakaszban jelentős zajhiba jelentkezik még az adatok normálását követően is. Ez legkönnyebben a behatolási tényező grafikonokon vehető észre. Ezért a legkisebb négyzetek módszeréhez felhasznált adatok a $\varphi = 10 \dots 110^\circ$ tartományon belülre esnek. Ezekkel az adatokkal **Microsoft Excel 2003** és **Maple 13** programok segítségével a (33) egyenlet megoldása:

$$F_{c,anal} = k_{c,1} \cdot h^{x_F} \cdot b^{y_F} \text{ [N]} \quad \text{ahol: } k_{c,1} = 14124,9 \text{ [N/mm}^{(x_F+y_F)}]$$

$$x_F = 0,726 \text{ [-]}$$

$$y_F = 0,825 \text{ [-]}$$

Összehasonlítva a mért és a számított erőgörbéket:



51. ábra: Mért és analitikus erőgörbék összehasonlítása

Látható, hogy az értéktartomány elején jelentős, 1000 [N] körüli eltérés tapasztalható a két görbe között. Ez azonban nem a kiértékelési módszer hibája, mivel több mérésnél (pl. 2., 4. és 12. sz. mérések) jól egybeesnek az értékek. Az eltérés leginkább a különböző mérések során kialakuló rezgések és a szinkronitási hiba torzító hatásának tudható be.

6. Forgácsolhatóság a gyakorlatban: nagy szilárdságú acélok vizsgálata

A bemutatott vizsgálati módszer elsődleges célja, hogy a gyakorlatban is hatékony segítséget adjon a homlokmarási műveletek optimalizálásához. Mint az a korábbi fejezetekben már kifejtett, egy anyag forgácsolhatóságának jellemzése egy bázisanyaggal való összehasonlításából származik. A tesztmérés C60-as acélja bázisanyagnak megfelel, mivel forgácsolási jellemzői (viszonylag nagy értékű paraméterek, forgácstörés, szerszám éltartam) kedvezőnek mondhatók. A vizsgálati módszer igazi próbáját egy, az iparban egyre szélesebb körben alkalmazott, de tulajdonságai miatt különleges acélminőség mellett célszerű elvégezni. A választott anyagminőség: S960QL melegen hengerelt acél.

Az S960QL mérésekre 2012. október 31-én került sor. A kísérletsorozat állandó jellemzői:

- Próbatétel anyaga: S960QL
- Szerszám: Widia 125 R-6

Névleges átmérő: $d = 125$ [mm]

Fogszám: $z_t = 1$

Lapka: Kennametal TPCN1603PPTN KC725M

– Geometria:

Forgácsolási szélesség: $S = 125$ [mm] ($S/d = 1$)

Kapcsolódási szög: $\Phi = 180^\circ$

Időhiány miatt nem volt lehetőség a C60-nál alkalmazott $S/d = 0,7$ viszony biztosítására, mivel ehhez a próbatest előkészítésére az időbeli korlátok miatt nem volt lehetőség. Módosítások történtek a paraméterek tekintetében is:

- A tesztforgácsolások rámutattak arra, hogy az S960QL próbatestnél az $n = 750$ [ford/min] és $v_f = 125$ [mm/min] előtolás paraméterpár a szerszám szempontjából kedvezőtlen (200 [mm] úthosszon történő forgácsolás során kitört a lapka éle). Ezért további mérési pontok lettek felvéve.
- A fogásmélységek értéke feleannyi, mint a C60-nál, ugyancsak szerszám éltartammal kapcsolatos megfontolások miatt.
- A $v_f = 66$ [mm/min] előtolás értékek a szerszámgép mechanikai hibája miatt nem megvalósítható. A helyettesítő paraméter: $v_f = 78$ [mm/min]

Az alkalmazott paramétersor és mintavételezési beállítások:

3. táblázat: S960QL mérés paramétersor									
Ssz.	n [ford/min]	v_f [mm/min]	a [mm]	mc [minta/ív]	mn1 [minta]	mn1* [minta]	$\varphi n1$ [fok]	n^* [ford/min]	δn [%]
1.	475	50	1,2	790	1580	1550	0,228	484,19	1,94
2.	475	78	1	790	1580	1550	0,228	484,19	1,94
3.	475	78	0,8	790	1580	1550	0,228	484,19	1,94
4.	475	100	0,6	790	1580	1536	0,228	488,61	2,86
5.	475	125	0,4	790	1580	1550	0,228	484,19	1,94
6.	300	50	1,2	960	1920	1880	0,188	306,38	2,13
7.	375	78	1	790	1580	1547	0,228	383,00	2,13
8.	475	78	0,8	790	1580	1547	0,228	485,13	2,13
9.	600	100	0,6	600	1200	1187	0,300	606,57	1,10
10.	300	39	0,8	960	1920	1880	0,188	306,38	2,13
11.	375	50	0,8	790	1580	1547	0,228	383,00	2,13
12.	600	125	0,8	600	1200	1187	0,300	606,57	1,10
13.	375	100	0,8	790	1580	1547	0,228	383,00	2,13
14.	600	78	0,8	600	1200	1187	0,300	606,57	1,10
15.	300	36	1,2	960	1920	1873	0,188	307,53	2,51
16.	375	50	1	790	1580	1536	0,228	385,74	2,86



52. ábra: Forgácsolás



53. ábra: Forgácsolt felület



54. ábra: Mérés közben

Az adatok kiértékelése az 5.1 fejezetben leírtak alapján történt. A kapcsolódó grafikonok a 3. mellékletben láthatók. A mérésekkel kapcsolatban a következő megállapítások tehetők:

- Az 1., 6., 9., 11. és 14. sz. méréseknél ismeretlen forrású erőhatás konstans jelleggel torzítja az adatokat: az adatsor eltolódása 0,4...0,6 [V] a zérus tengelytől, ami relatív nagy eltérés. A feszültséggörbék jellege megfelelő, de az eltolódás miatt nem értékelhető az eredmény. A hiba kiküszöböléséhez meg kell ismételni ezeket a méréseket.
- Az 5. és 12. sz. méréseknél a radiális erő alakulása instabilitást mutat. Ennek ellenére a forgácsolóerő görbéje megfelelő.
- A 16. sz. mérésnél viszonylag nagy, kb. 1000 [N] nagyságú tartományban ingadoznak az erőkomponensek a $\varphi = 180...360^\circ$ tartományban. Ekkor a forgácsolóél elméletileg nincs fogásban, de elképzelhető, hogy a szerszámtengely ferdesége miatt visszametsz a már forgácsolt felületbe.

A forgácsolóerő (33) egyenletének megoldása erre a kísérletsorozatra:

$$F_{c,anal} = k_{c,1} \cdot h^{x_F} \cdot b^{y_F} \text{ [N]} \quad \text{ahol: } k_{c,1} = 16429 \text{ [N/mm}^{(x_F+y_F)}]$$

$$x_F = 0,734 \text{ [-]}$$

$$y_F = 0,879 \text{ [-]}$$

Sajnos a kényszerű paraméter módosítások miatt nem lehet érdemben összehasonlítani a C60 és S960QL méréseket, de néhány általános jellegzetesség így is megfigyelhető:

1. A forgácsolóerő egyenletében szereplő konstansok összehasonlítása:

4. táblázat: Forgácsolóerő paraméterek összehasonlítása		
	C60	S960QL
$k_{c,1} \text{ [N/mm}^{(x_F+y_F)}]$	14125	16429
$x_F \text{ [-]}$	0,726	0,734
$y_F \text{ [-]}$	0,825	0,879

Látható, hogy a vártaknak megfelelően az S960QL esetében magasabb az erőállandó értéke. Ennek hatása a fajlagos forgácsolóerőben válik nyilvánvalóvá. A forgácsgeometria hatását figyelembe vevő x_F és y_F hatványkitevők nagyságrendileg azonos tartományban mozognak.

2. Fajlagos forgácsolóerő:

Két jellemzőt érdemes összehasonlítani: a k görbe értéktartományát és változásának minőségét. Az értéktartománnyal kapcsolatban megállapítható, hogy a maximális forgácsvastagság (h_{max}) közeli tartományokban k értéke jellemzően:

5. táblázat: Fajlagos forgácsolóerő értéktartományának összehasonlítása		
	C60	S960QL
k [N/mm ²]	10000...20000	20000...30000

Ez azt jelenti, hogy S960QL esetében átlagosan 10 [kN]-al nagyobb forgácsolóerő szükséges egységnyi keresztmetszetű forgács leválasztására, mint C60-nál.

A k görbe változásának mértéke a görbe első deriváltjával jellemezhető. A két kísérletsorozat ilyen szemléletű összehasonlítása a deriváltak egyenleteinek segítségével történhet. A kiértékelt mérések: C60 / 11. sz. mérés és S960QL / 2. sz. mérés. Ezek jellegükben jól tükrözik az átlagot, és viszonylag mentesek a zavaró tényezőktől, mint pl. rezgés, szinkronitási hiba. A vizsgálat lépései:

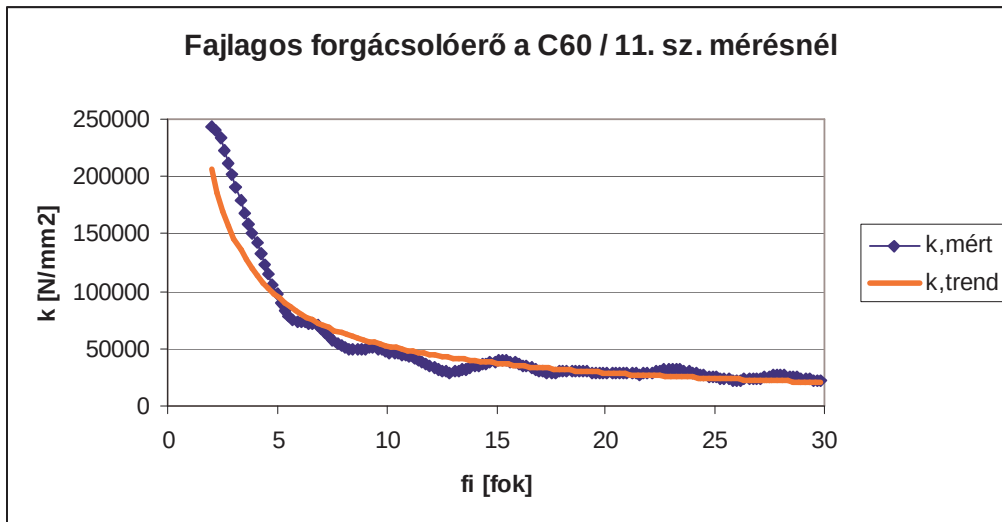
I. Jelleggörbe felvétele:

A k görbékre **Microsoft Excel** segítségével trendvonal illeszthető. A 2. és 3. melléklet $k(\varphi)$ grafikonjai alapján sejthető, hogy a legjobban illeszkedő közelítő görbe

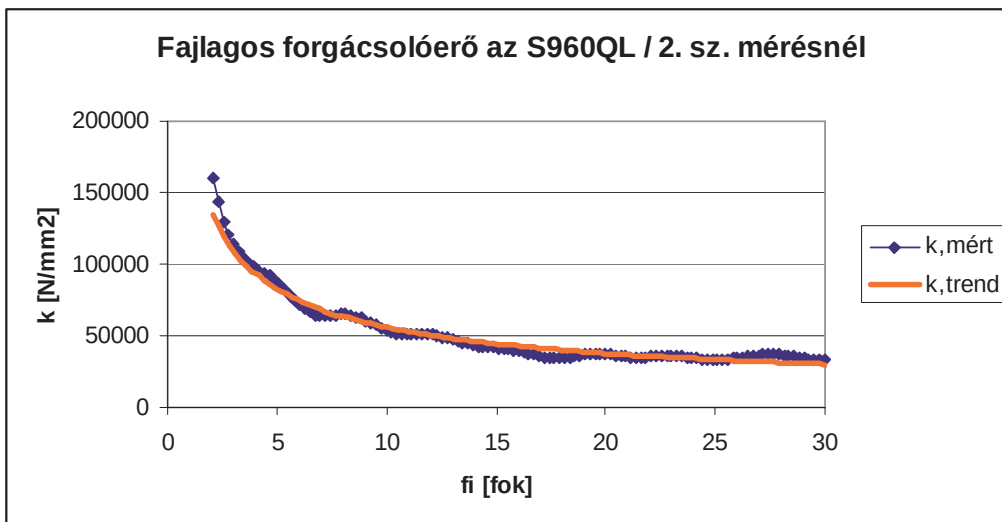
$$k(\varphi) = C_k \cdot \varphi^\lambda \quad (61)$$

alakban keresendő, ahol C_k és λ konstans. Ez Excelben a hatvány-trendvonallal oldható meg. A vizsgált szögtartomány minden esetben: $\varphi = 2^\circ \dots 40^\circ$. Magyarázat a szögtartományhoz:

- A 2° -os kezdőszög a h forgácsvastagság analitikus becslésére szolgáló (49) összefüggés és az ott ismertett kritérium miatt szükséges.
- A k értéke $\varphi = 60^\circ \dots 90^\circ$ között jó közelítéssel állandónak tekinthető. Minél hosszabb ez a relatíve konstans szakasz a vizsgált tartományban, annál inkább „eltéríti” a görbét a lényeges k változást mutató $\varphi = 2^\circ \dots 30^\circ$ közötti tartományon. Ezért $\varphi = 30^\circ$ -ig tart a vizsgálati tér.



55. ábra: Fajlagos forgácsolóerő változása a C60 / 11. sz. mérésnél



56. ábra: Fajlagos forgácsolóerő változása a S960QL / 2. sz. mérésnél

Az így kapott jelleggörbék (φ fokban értendő!):

$$k_{C60}(\varphi) = 377088 \cdot \varphi^{-0,8532}$$

$$k_{S960}(\varphi) = 204702 \cdot \varphi^{-0,5638}$$

Összehasonlításként:

6. táblázat: $k(\varphi)$ paraméterek		
	C60	S960QL
C_k	377088	204702
λ	-0,8532	-0,5638

II. Jelleggörbe deriváltjának meghatározása:

A derivált függvény szemlélteti a k görbe meredekségének változását φ függvényében, ami a deriválás matematikai szabályainak megfelelően, az alábbi módon meghatározható:

$$dk(\varphi) = C_k \cdot \lambda \cdot \varphi^{\lambda-1} \quad (62)$$

Így a k görbék derivált függvényei:

$$dk_{C60}(\varphi) = 377088 \cdot (-0,8532) \cdot \varphi^{-0,8532-1} = -321731,5 \cdot \varphi^{-1,8532}$$

$$dk_{S960}(\varphi) = 204702 \cdot (-0,5638) \cdot \varphi^{-0,5638-1} = -115411 \cdot \varphi^{-1,5638}$$

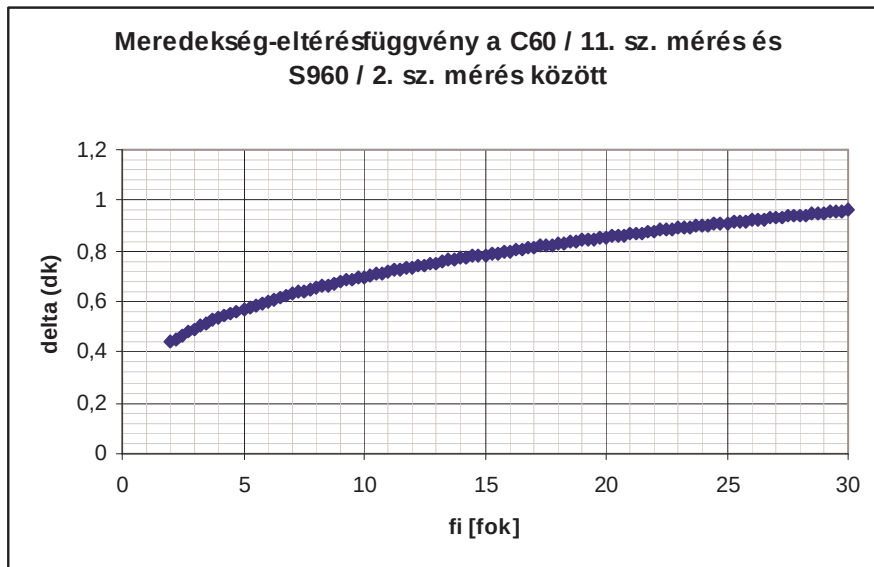
III. A derivált függvények összehasonlítása:

Két derivált függvény hányadosa: a meredekség-eltérésfüggvény megmutatja, hogy az 1-es görbe változása hogyan és milyen mértékben tér el a 2-eshez képest.

$$\delta(dk) = \frac{dk_1}{dk_2} \quad (63)$$

Jelen példára alkalmazva: a $\delta(dk)$ megmutatja, a C60-nál tapasztalt k tendenciához képest hogyan és milyen mértékben tér el az S960QL-re jellemző változás.

$$\delta(dk) = \frac{dk_{S960}(\varphi)}{dk_{C60}(\varphi)} = \frac{-115411 \cdot \varphi^{-1,5638}}{-321731,5 \cdot \varphi^{-1,8532}} = 0,3587 \cdot \varphi^{0,2894}$$



57. ábra: Meredekség-eltérésfüggvény a C60/11. sz. mérés és S960QL/2. sz. mérés között

Szemléletesen ez annyit jelent, hogy S960QL esetében a k görbe „lassabban” csökken a C60-hoz képest. Tehát a h forgácsvastagság növekedésével, ugyanazon a szögtartományon belül kisebb mértékben csökken a fajlagos forgácsolóerő értéke S960QL-nél, mint C60-nál. Látható, hogy a görbe h_{max} felé haladva közelít az 1-hez, ami megfelel annak a tulajdonságnak, miszerint k értéke a $\varphi = 60 \dots 90^\circ$ között jó közelítéssel állandóként viselkedik.

3. Behatolási tényező:

Az η behatolási tényezőt a kapcsolási ív mentén lehet értelmezni. Az ezen kívül eső tartományokon az F_r/F_c hányados erős instabilitást mutat, melynek oka lehet a felületre nem tökéletesen merőleges szerszámtengely, rezgések, ami miatt a lapka hozzáér (súrlódik) a mér forgácsolt felületen.

S960QL esetén a behatolási tényező viszonylag nagy szórással rendelkezik: tipikus értéktartománya 0,5...1 között van, míg C60-nál ez az érték 0,6...0,8 közé sorolható. A forgácsolóél belépésénél jellemző, átlagnál magasabb η markánsabban jelenik meg, mint C60-nál, de jellege és lecsengése ahhoz nagyon hasonló. A magasabb kezdeti érték ($\eta = 1...1,5$) az anyagba történő nehezebb behatolásra utal, ami a magasabb folyáshatár hatását tükrözi. C60-nál a bekezdésnél $\eta = 0,8...1$ jellemző.

7. **Összegzés, konklúzió**

Az anyagok megmunkálhatósága több, fogalmilag jól körülhatárolható és egymással fizikailag (kémiailag) összefüggő tulajdonság összessége. A forgácsolhatóság a megmunkálhatóság egyik jellemzője. Értelmezése összehasonlításokon keresztül lehetséges: egy bázisanyaghoz – melynek tulajdonságait „jónak”, kedvezőnek tekintjük az adott megmunkálási körülményekhez képest – viszonyítva értékelhetők a technológiai jellemzők által kiváltott hatások, és ezek alapján következtetések vonhatók le: elméleti észrevételek, ok-okozati összefüggések és folyamatoptimalizációs lehetőségek tárhatók fel.

Egy anyag forgácsolhatóságáról kísérleti úton lehet véleményt alkotni. A vizsgálandó anyag, a kívánt geometriai és technológiai paraméterek és a megfelelő bázisanyag együttesen határozzák meg a forgácsolhatóság gyakorlati értelmezését, ezáltal némiképp akadályozva a szélesebb körű általánosítást. A vizsgálatok tehát specializáltak egy meghatározott forgácsolási környezethez.

A kísérletek (és így a mérések) végrehajthatók, amennyiben rendelkezésre állnak a megfelelő hardver és szoftver elemek. Utóbbiak lehetővé teszik a hardver elemek által biztosított konfigurációk magasabb szintű illesztését a mérési környezethez, ezáltal egyszerűbbé és gyorsabbá téve a mérési és kiértékelési folyamatot. Az elméletében kevésbé bonyolult, de mennyiségénél fogva annál inkább erőforrás igényes számítások és adatkezelési módszerek jól automatizálható műveletek; parametrikus formában pedig felhasználhatósági körük is nagymértékben bővíthető.

E dolgozat célja a homlokmarási forgácsolhatósági kísérletekhez alkalmazható mérési módszer kidolgozása és az ehhez szükséges szoftver elemek kifejlesztése. A tesztmérések és kiértékelések alapján kijelenthető: az algoritmusok megfelelő alapot szolgáltatnak az esetleges későbbi fejlesztésekhez. De bármennyire automatikus egy kiértékelés, akármilyen gyors és pontos is az adatfeldolgozás, a mérnöknek: az embernek mindig ott lennie a program mögött, hogy megállapítsa: az eredmény megfelel-e a kívánalmaknak, és milyen tanulságok vonhatók le a lezajlott folyamatokból.

Budapest, 2012. november 5.

Biró István

Irodalom

[1] Aho, M.; Videnoja, T.: Special steel training
Ruukki Materials, 2011.06.13.

[2] Dr. Alpek Ferenc: Méréstechnológia és mérésautomatizálás a gépgyártásban
Egyetemi jegyzet
2008.

[3] Dr. Bali János: Forgácsolás
Tankönyvkiadó, Budapest, 1985.

[4] Falcon Metals Group – Stainless Mashinability Ratings
Forgácsolhatósági minősítés korrózióálló acélokra
Elérhetőség: <http://www.falcon-metals.com/stainlessandalloys/stainlesssteel/stainless-machinability-ratings.htm>
Letöltés dátuma: 2012.05.25.

[5] Horváth Richárd, dr. Sipos Sándor: Gyémántszerszámmal esztergált alumínium felületek mikrogeometriai jellemzőinek vizsgálata
Óbuda University e-Bulletin, 1. évfolyam, 1. szám
2010.

[6] Hot-rolled Steel Plates, Sheets and Coils Machining
Forgácsolási paraméter ajánlás melegen hengerelt acéltermékekre
Ruukki Metals, 2011.

[7] Hot-rolled steel sheets, plates and coils welding
Termékismertető brossúra
Ruukki Metals, 2011.

[8] IBM Research (Archive), originally:
D.M. Eigler, E.K. Schweizer: Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope
Nature 344, 524-526, 1990.

Elérhetőség: <http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/atomo.html>

Letöltés dátuma: 2012.03.24.

[9] Dr. Krállics György: Fémek képlékeny alakítása

Előadás diasor, Fémek technológiája (BMEGEMTAGA2) c. tárgyhoz

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gyártástudomány és –technológia Tanszék, 2008.

Elérhetőség: <http://www.att.bme.hu>

Letöltés dátuma: 2008.12.22.

[10] Dr. Markos Sándor: Anyagok megmunkálhatósága, forgácsolhatóság, forgácsoló képesség

Előadás diasor, Forgácsolási folyamatok (BMEGEGTMG01) c. tárgyhoz

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gyártástudomány és –technológia Tanszék, 2011.

Elérhetőség: <http://www.manuf.bme.hu>

Letöltés dátuma: 2012.01.09.

[11] Dr. Markos Sándor: Integrált „mill-turn” megmunkálások

Előadás diasor, Forgácsolási folyamatok (BMEGEGTMG01) c. tárgyhoz

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gyártástudomány és –technológia Tanszék, 2011.

Elérhetőség: <http://www.manuf.bme.hu> (letöltés dátuma: 2012.01.09.)

[12] Dr. Markos Sándor: Felületkikészítés, polírozás

Előadás diasor, Különleges gyártási technológiák (BMEGEGTMG11) c. tárgyhoz

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gyártástudomány és –technológia Tanszék, 2012.

Elérhetőség: <http://www.manuf.bme.hu>

Letöltés dátuma: 2012.03.25.

[13] Dr. Mészáros Imre: Forgácsoló megmunkálások

Előadás diasor, Forgácsoló megmunkálások (BMEGEGTAG51) c. tárgyhoz

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gyártástudomány és –technológia
Tanszék, 2009.

Elérhetőség: <http://www.manuf.bme.hu>

Letöltés dátuma: 2009.09.07.

[14] Dr. Németh Árpád, Dr. Palotás Béla: Acélok átedzhetősége

Előadás diáor, Fémek technológiája c. tantárgyhoz

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gyártástudomány és –technológia
Tanszék, 2011.09.22.

Elérhetőség: <http://www.att.bme.hu>

Letöltés dátuma: 2012.04.04.

[15] Dr. Németh György: Tartószerkezetek III. – Acélszerkezetek méretezésének alapjai
Jegyzet

Szent István Egyetem, 2008.

[16] Plansee TIZIT – Tools for aluminium machining

Szerszámkatalógus

Plansee TIZIT, 2003.

[17] Porter, David: Developments in hot-rolled high-strength structural steels

Ruukki Production - Nordic welding conference 06, Tampere, 2006.11.08-09.

[18] Ruukki céginformáció és termékadatlapok

Elérhetőség: <http://www.ruukki.com> és <http://www.ruukki.hu>

[19] SANDVIK Coromant – Corokey

Váltólapka katalógus és útmutató

SANDVIK Coromant, 2010.

[20] SANDVIK Coromant – Technical Guide: Machinability definition

Elérhetőség: http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/technical_guide/materials/workpiece_materials/machinability_definition/pages/default.aspx

Letöltés dátuma: 2012.05.24.

[21] SANDVIK Coromant – Technical Guide: Materials

Szerszám- és munkadarabanyag prospektus

SANDVIK Comomant, 2012.

Egyéb elérhetőség: http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/technical_guide/materials/workpiece_materials/Pages/default.aspx#

Letöltés dátuma: 2012.03.31.

[22] Savola, Jaako; Kesti, Vili: Special Steel Training – Blending Module

Ruukki Materials, Raahe, 2011.06.15.

[23] Dr. Ziaja György: Alakítástechnika I.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 2004.

[24] Dr. Zorkóczy Béla: Metallográfia és anyagvizsgálat

Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1968.

8. Melléklet

Mellékletek jegyzéke:

1. Mérőprogram felhasználói útmutató és dokumentáció
2. Kiértékelési diagramok a C60 1-12. sz. mérésekhez
3. Kiértékelési diagramok az S960QL 1-16. sz. mérésekhez
4. S960QL műbizonylat
5. Összefoglaló paramétertáblázat munkadarab anyaga és szerszámminőség szerint [19, „A” fejezet, 518. o.]
6. Pontrendszer alapú megmunkálhatósági indexelés [16, 3. o.]
7. Százalékos osztályozású megmunkálhatósági indexelés [4]

9. Ábrajegyzék

1. ábra: Anyagleválasztás [11]	3
2. ábra: Képlékeny alakítás [22]	3
3. ábra: Anyaghozzáadás [8]	3
4. ábra: Felületi alakadás forgácsolással [13]	3
5. ábra: Térfogati alakadás [1]	3
6. ábra: Alakíthatóság értelmezése	4
7. ábra: Képlékeny alakváltozás [24, 40. o.]	5
8. ábra: Csúszási sík [24, 44. o.]	5
9. ábra: Edzéssel elérhető keménység a szénttartalom függvényében [24, 246. o.]	8
10. ábra: Cr135 acél átalakulási diagramja és a kritikus hűtési görbe [24, 148.o. alapján]	8
11. ábra: Hűtési sebesség és átedzhető átmérő kapcsolata acélok edzése során [14]	9
12. ábra: AlSi ötvözetek megmunkálhatósága (Ishikawa-diagram) [5, 326. o.]	13
13. ábra: Forgácsoló erő [3, 48. o. alapján]	14
14. ábra: Fajlagos forgácsoló erő és forgácsvastagság kapcsolata [3, 96. o.]	15
15. ábra: Fajlagos éltérhelés értelmezése [3, 86. o.]	15
16. ábra: Éltartam egyenes [3, 153. o.]	16
17. ábra: Forgácsoló képesség diagram CNMG 19 06 16-SR váltólapkára [21]	17
18. ábra: Forgácsolás mechanizmusa [3, 58. o.]	18
19. ábra: Mesterséges forgácsolás [3, 59. o.]	18
20. ábra: Képlékeny és rideg anyag szakítódíagram jelleggörbéi [3, 56. o.]	19
21. ábra: Nyúlásmérő bélyegek [2, 95. o.]	21
22. ábra: Piezoelektromos egykritály [2, 36. o.]	21
23. ábra: Egykéses, természetes termoelemes hőmérsékletmérés [28, 32. o.]	22
24. ábra: Lemez hajlítópróba [1, 19. o.]	23
25. ábra: Palásmarás és homlokmarás összehasonlítása [3, 358. o.]	24
26. ábra: Ellenirányú és egyenirányú homlokmarás összehasonlítása [3, 374. o.]	25
27. ábra: Homlokmarási kísérlet vázlata	25
28. ábra: Forgácsvastagság változása homlokmarásnál	30
29. ábra: Belépési tartomány	31
30. ábra: A belépési tartomány koordináta geometriai vizsgálata	31
31. ábra: A $h(\varphi)$ meghatározása	32
32. ábra: A $h(0)$ ellentmondás forrása	33

33. ábra: VF-22 függőleges marógép és KISTLER 9281B piezoelektromos erőmérő.....	37
34. ábra: VF-22 marógéphez rendelt mérőhely KISTLER 9863A feszültségjel erősítővel	37
35. ábra: Widia 125 R-6 szerszámtest	38
36. ábra: Kennametal TPCN1603PPTN KC725M keményfém lapkák	38
37. ábra: A mérőprogram helye a mérési és kiértékelési láncban.....	40
38. ábra: Mérőprogram felhasználói felülete	40
39. ábra: Próbatest a kísérletsorozatot követően.....	42
40. ábra: Normálás és szinkronitási hiba	42
41. ábra: X irányú erőértékekkel arányos feszültségjel (1. sz. mérés)	44
42. ábra: Y irányú erőértékekkel arányos feszültségjel (1. sz. mérés)	44
43. ábra: Z irányú erőértékekkel arányos feszültségjel (1. sz. mérés).....	45
44. ábra: Forgácsolóerő (1. sz. mérés).....	46
45. ábra: Radiális erő (1. sz. mérés)	46
46. ábra: Passzív erő (1. sz. mérés)	46
47. ábra: Forgácsolási erő (1. sz. mérés)	47
48. ábra: Eredő erő (1. sz. mérés).....	47
49. ábra: Behatolási tényező (1. sz. mérés).....	48
50. ábra: Fajlagos forgácsolóerő (1. sz. mérés).....	49
51. ábra: Mért és analitikus erőgörbék összehasonlítása	50
52. ábra: Forgácsolás	52
53. ábra: Forgácsolt felület	52
54. ábra: Mérés közben.....	52
55. ábra: Fajlagos forgácsolóerő változása a C60 / 11. sz. mérésnél	55
56. ábra: Fajlagos forgácsolóerő változása a S960QL / 2. sz. mérésnél	55
57. ábra: Meredekség-eltérésfüggvény a C60/11. sz. mérés és S960QL/2. sz. mérés között...	56