

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

## ELEKTROMOS (SEEBECK)-EFFEKTUSOK HATÁSÁNAK MATEMATIKAI MODELLEZÉSE FORGÁCSOLÁSNÁL

Pálmai Zoltán  
palmayz@t-online.hu

Csobod László  
veva43@freemail.hu

### Absztrakt

Ismert tény, hogy a forgács leválasztásánál a munkadarab-szerszám-forgács-gép rendszerben termoelektromos áramok keletkeznek, amelyek amper nagyságrendűek is lehetnek. Folyamatos forgácsolásnál, esztergálásnál és szakaszos forgácsolásnál, homlokmarásnál ezeknek az áramoknak a szerszámkopásra gyakorolt hatását vizsgálták kvalitatív matematikai modell segítségével, amelyben a kopás autonóm nemlineáris differenciálegyenlettel van leírva. A forgácsolási hőmérséklet mérése u.n. természetes termoelemmel történt, C60 acél illetve P35 keményfém anyagpárral, amelyeket a hitelesítésnél hevített Sn fürdőbe mártottak. A matematikai modell megoldása numerikus módszerrel történt, amelynél a kopás differenciálegyenletének inverzét alkalmazták. A számítással meghatározott kopásgörbék jól illeszkedtek a mérési eredményekre. A C45 minőségű acél munkadaraboknál P20 keményfémmeel végzett esztergálással és P35 keményfémmeel végrehajtott marási kísérletekkel megállapították, hogy a természetes termoelemként működő szerszám kopása szempontjából optimális az, ha külső áramforrás ezt kompenzálja. A modell szerint a termoelektromos rendszer egyes esetekben kaotikusan viselkedik. Annak eldöntéséhez, hogy ez a modell sajátossága csak, vagy a modell a valóságos folyamatokat mutatja, további kutatások szükségesek.

### Abstract

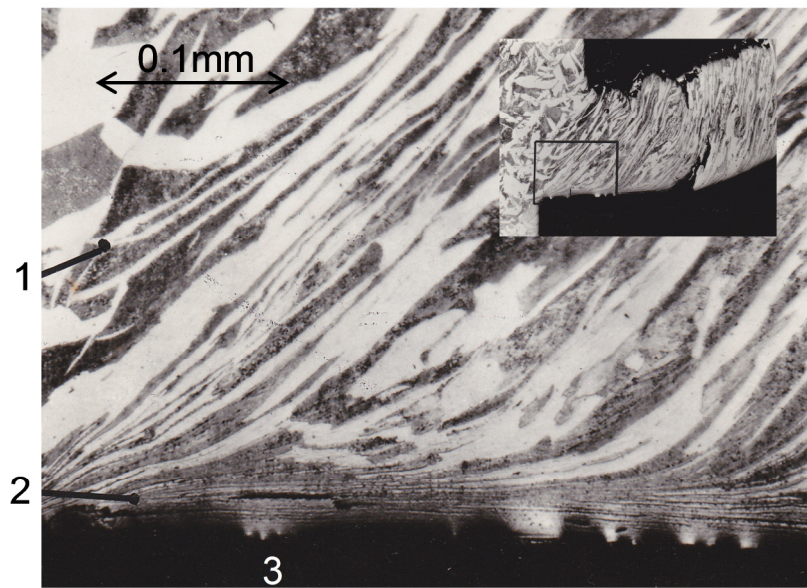
It is a well-known fact that thermoelectric currents, reaching even the scale of ampere, develop during chip formation in the workpiece-tool-chip-machine system. The impact of these currents on tool wear in continuous cutting, turning and intermittent cutting, end-milling was examined with a qualitative mathematical model, in which wear is described by an autonomous non-linear differential equation. Cutting temperature was measured by a so-called natural thermoelement with C60 and P35 carbide pair, which were submerged into heated Sn bath at validation. The mathematical model can be solved by a numerical method, where the inverse of the differential equation of wear was used. The wear curves determined by calculation fitted well with the measurement results. It was established by cutting experiments using P20 carbide and with milling experiments using P35 carbide conducted on the C45 quality steel workpiece that it is optimal with respect to the wear of the tool behaving as a natural thermoelement that this is compensated with an external power source. According to the model, the thermoelectric system behaves in a chaotic way in certain cases. Further research is necessary to decide if this is only a special characteristic of the model or the model shows the actual processes.

**Keywords:** cutting, electrical current, mathematical model, wear, face-milling,

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

## 1. Bevezetés

Annak ellenére, hogy a forgácsoláselméletet már több, mint 130 éve művelik, ennél a tradicionálisnak mondható technológiánál mégis egyre új gyakorlati feladatok jelentkeznek, amelyek megoldása az eddig ismert és elfogadott elmélet újra- és továbbgondolását igénylik. Ismeretes, hogy a fémek forgácsolását extrém állapotváltozások jellemzik. Az 1. ábrán látható forgácstón jól látható, hogy a megmunkált fémnek milyen nagy deformációja vezet a forgács leválasztásához.



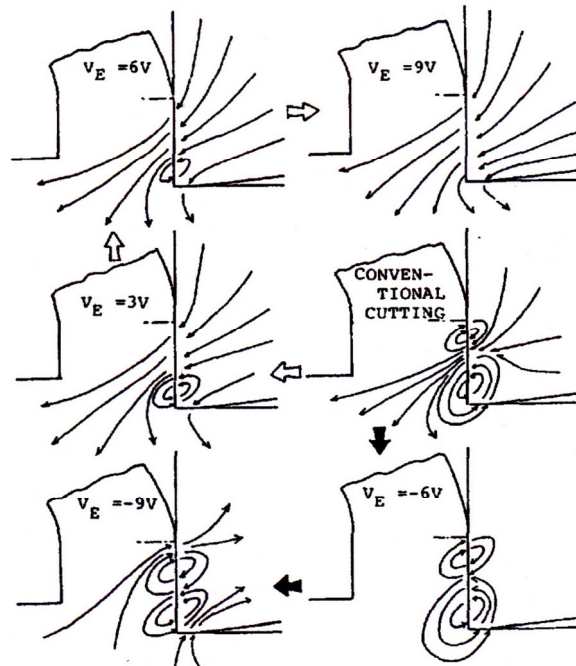
1. ábra. C-acél forgácstő.  
(1: forgács, 2: áramlási zóna, 3: hegedések nyomai)

Az alakváltozás mértéke az u.n. nyírási zónában (1) a szögtorzulás tangensével kifejezve 2.5-4, a szerszámmal érintkező u.n. áramlási zónában pedig akár 50 is lehet. Ez utóbbi vizsgálata már nem is annyira a képlékenységelmélet, mint a reológia eszközeit igényli. Az alakváltozási sebesség mindkét zónában akár  $10^4 \text{s}^{-1}$  nagyságrendű is lehet. A munkadarab-szerszám-forgács érintkezési zónában  $1000^\circ\text{C}$  nagyságrendű hőmérséklet igen gyorsan,  $10^5\text{-}10^6 \text{ }^\circ\text{Ks}^{-1}$  sebességgel alakul ki, amelyet a munkadarab felületi rétegében  $10^3\text{-}10^4 \text{ }^\circ\text{Cs}^{-1}$  sebességű lehűlés követ. E dinamikus folyamatok forgácsképződésre [1] és a szerszám degradációjára [2] gyakorolt hatásának vizsgálata után az itt bemutatott munka célja annak a speciális jelenségsoportnak az analizálása, amely a Seebeck-effektus, illetve külső elektromos áram következtében bekövetkezik.

Annak ellenére, hogy a hő- és elektromos vezetőképességet az anyagok u.n. szerkezetfüggetlen tulajdonságai közé szokás sorolni, a forgácsképződés extrém körülményei között ez a kategorizálás nem állja meg a helyét. Ilyen tág hőmérsékleti határok között a fajhő és a hővezetőképesség is változik, valamint nagy deformáció következtében erősen megnövekvő diszlokációsűrűség miatt az elektromos ellenállás is növekszik. Túl tehát azokon a nehézségeken, amely a forgácsleválasztás képlékenységelméleti kezelésénél jelentkeznek, a fizikai anyagjellemzők szabatos figyelembevétele is problematikus. Az elektrotermikus folyamatok összetettségét jól érzékeltetik Uehara [3] és társai analógiás vizsgálati eredményei, amelyeket a 2. ábra szemléltet. A bonyolult elektromos folyamatok

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

tanulmányozása céljából analóg elektromos modellt konstruáltak, amelynek segítségével kimutatták, hogy különböző nagyságú és előjelű külső feszültség bevitele a forgácstöbbe alapvetően befolyásolja a kialakuló örvényáramokat.

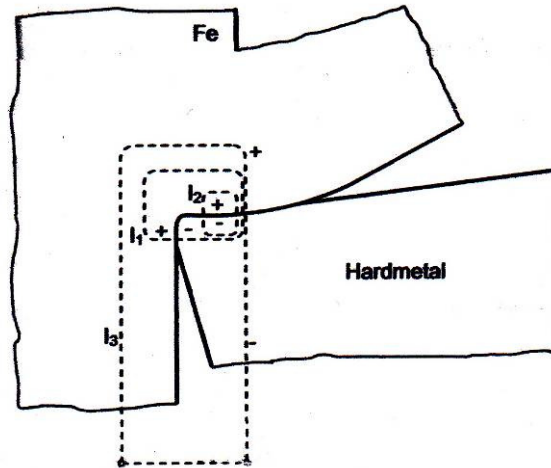


2. ábra. A külső feszültség hatása a belső örvényáramokra (Uehara és tsai [3]).

A mechanikai, termikus és elektromos folyamatok nyilvánvaló szoros kapcsolata leginkább a forgácsolási hőmérséklet megfigyelésével követhető. Amióta Gottwein a forgácsolási hőmérséklet méréséről közreadta a szerszám-munkadarab termoelem felhasználásával végzett vizsgálati eredményeit [4], számos kutató foglalkozott a forgácsleválasztás termikus jelenségeivel [5]. Az első általunk ismert igazán alapos méréseket mintegy 30 évvel később Küsters végezte [6], aki az u.n. egykéses módszerrel tanulmányozta a forgácsoló szerszámon kialakuló hőmérsékletet. Már ő rámutatott arra, hogy a forgács leválasztása közben a gép, a szerszám, a munkadarab és a forgács között különböző elektromos áramkörök alakulnak ki (3. ábra). Erre vonatkozóan a 4. ábra szerint végrehajtott mérési eredményeket is közölte. Az 1. táblázatban összefoglalt eredmények szerint ezeknek az áramoknak az erőssége amper nagyságrendű. Részletes vizsgálatokkal kimutatta, hogy a szerszámnak a forgáccsal ill. munkadarabbal érintkező felületén a hőmérséklet-eloszlás nem egyenletes. Ennek következtében a szerszámon egykéses módszerrel megmért hőmérséklet egy átlagnak tekinthető, ezért fontos pl. a diffúziós kopás vizsgálatánál a maximális érték megállapítása is. Erre vonatkozóan Lowack végzett széleskörű vizsgálatokat [7], aki a termoelemes méréseknél a munkadarabot és a szerszámot elszigetelte a géptől [8]. Közben érthetően felmerült az a feltételezés is, hogy ezek a szerszámon a forgácsképződés következtében kialakuló termoáramok, amelyeknek nagysága Opitz szerint is [9] akár 5A lehet, a kopást is befolyásolhatják [10]. Ezek a korai riportok olyan esetek vizsgálatáról számoltak be, amelyeknél a termoáram zárt körben, vagy szigetelt szerszám alkalmazása esetén befolyásolta a kopási mechanizmust. Ellis és Barrow szigetelt szerszámok esetén az éltartam csökkenését

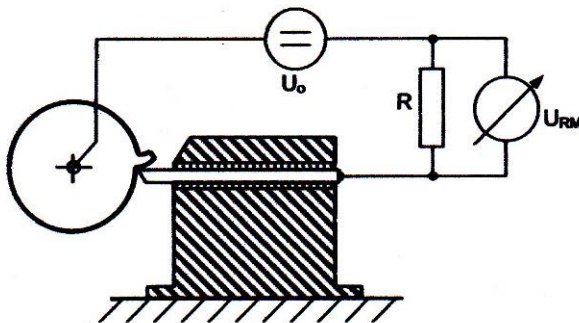
Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

tapasztalták [11]. Dubrov és tsai [12] széleskörű vizsgálatai szerint a szerszám-munkadarab áramkörének megszakítása esetén a szerszám éltartama jelentősen, 1,3-2,9-szerséire, átlagosan 1,8-szorosára növekedett.



3. ábra. Áramkörök a forgácstőben.

Shan és Pandley [13] a probléma vizsgálatára kopás ill. éltartam tesztekert végeztek a forgácsolási és áramköri kondíciók variálásával. Azt találták, hogy adott szerszám-gép kombinációnál a szigetelés hatása függ a forgácsolási paramétereiktől és a szerszám-munkadarab-gép rendszer elektromos paramétereitől. Kísérletekkel igazolták, hogy a főorsó fordulatszáma erősen befolyásolja a gép elektromos ellenállását, amely először erősen növekszik, aztán stabilizálódik.



R	U <sub>RM</sub>	U <sub>o</sub>	I
mΩ	mV	mV	A
1	3.5	9.4	5.5
11	8.1	9.4	5.2

4. ábra. Termoelektromos árammérés [3]

1. Táblázat Termoelektromos árammérés [3]

A forgácsolási folyamatra kidolgoztak egy elektromos modellt, amely különböző áramköri körülmények között lehetővé tette a kopás kvalitatív magyarázatát. Megállapították, hogy a munkadarab-szerszám-fogács rendszeren átfolyó termoelektromos áram a kopást általában növeli, különösen akkor, ha a külső áram polaritása a szerszámon negatív. Az is tény azonban,



Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

hogy a szerszám elszigetelése a géptől nem mindig előnyös a kopás szempontjából. Ezt alacsony ellenállású szerszám gép esetében tudták kimutatni. Megfigyelték, hogy az elektromos áram által befolyásolt kopási folyamatnál jelentős az oxidáció szerepe [14]. Oxidációs szimulációs modell kísérletekkel és keményfém szerszámokkal öntöttvasnál végzett mérések eredményei azt mutatták, hogy az elektromos áram erőssége befolyásolja az oxidációs folyamatot, a forgácsolóerő és a kopott felület nagysága függ a külső áramtól és a forgácsolás feltételeitől. A keményfém szerszámok kopásánál az oxidáció mellett a diffúzió is jelentős szerepet kaphat, amelyet az elektromos áram, ill. annak külső kompenzálása szintén befolyásolhatja [15].

A különböző forgácsolási feltételeket szimuláló mérések megállapítása megerősítette a korábbi kutatások gyakran ellentmondásos tapasztalatait, hogy a szerszám izolációs hatása a forgácsolás konkrét kondícióitól függően különböző lehet. A forgács képződésénél a Seebeck effektus befolyásolja a szerszám érintkező felületének hőmérsékletét, és így a kopást is. A kísérletek összegzése ellentmondásos, a normál forgácsolással szemben a szigetelt szerszám alkalmazása esetenként hasznos, olykor hatástalan, más esetekben káros. Ez utóbbit Uehara és tsai [3] három forgácsolási kísérlettel is igazolták. Lágycél, közepes C-tartalmú acél és rozsdamentes acél forgácsolásánál egyaránt azt tapasztalták, hogy az izolált szerszám gyorsabban kopik, mint normál esetben.

Az elektromos mező hatását a kopás elméletének kutatói más szakterületeken is vizsgálták. Steward és trsai [16] farost forgácsolásánál mutatták ki, hogy a szerszám és munkadarab között feszültség alakul ki, amely a kopást befolyásolja. Wistuba [17] alumínium-oxid és öntöttvas súrlódását tanulmányozva megállapította, hogy szerszám-munkadarab-szerszám rendszerben az érintkező és a súrlódó felületeken egy belső elektromos mező alakul ki, amely torzul, ha külső elektromos mező hat rá. A polaritás, és a súrlódó párokra kapcsolt külső feszültség nagysága lényegesen befolyásolja a kopási sebességet, sőt, a forgácsolóerőt is. Az ilyen vizsgálatok felhasználhatók voltak a kenőanyag hatékonyságának tanulmányozásához is [18]. A problémakör összetett jellegére utal, hogy újra és újra jelennek meg kutatási eredmények, amelyek az elektromos áram kopásra gyakorolt hatásának feltárására irányulnak. Gangopadhyay és trsai [19] modellkoptatással és homlokmarással egyaránt arra a megállapításra jutottak, hogy a kopás akkor volt kisebb, amikor a szerszám volt a katód, sőt még a vibráció is csökkent. Az áram növekedése a kopást is fokozta.

Érdekes jelenségre mutattak rá Tanaka és trsai [20], akik BN adalékkal gyártott automataacélnál vizsgálták a külső elektromos áramnak a megmunkálhatóságra gyakorolt hatását. Kísérleteik azt mutatták, hogy a BN automataacélnál külső elektromos áramnak különösen a kráter kopásnál volt nagy hatása, csökkentette a kopási sebességet. A polaritástól függően mérhető növekedést tapasztaltak a nyírási sík hajlásszögénél, és ezzel összefüggésben a főforgácsolóerőnél, valamint csökkenést a passzív erőnél. Vizsgálataik azért is figyelmet érdemelnek, mert az ilyen acélok forgácsolásánál gyakori, hogy a szerszámnak a forgáccsal ill. munkadarabbal érintkező felületén részleges, vagy összefüggő nemfémes réteg alakul ki [21], amelyek lényegesen megnövelhetik az érintkező felületeknél az átmeneti ellenállást, vagyis alapvetően befolyásolhatják a szerszám éléhez kapcsolódó áramköröket.

Mindezek mellett mégis az az érdekes megállapítás tehető, hogy noha az esetenként jelentős erősségű elektromos áram hőhatása nyilvánvalóan befolyásolja a szerszám-munkadarab-forgács érintkező felületeinek hőmérsékletét, az irodalomkutatásunk igen gyér érdeklődést tudott csak feltárni. Ez a körülmény vezetett ahhoz az elhatározáshoz, hogy Csobod L. [22]

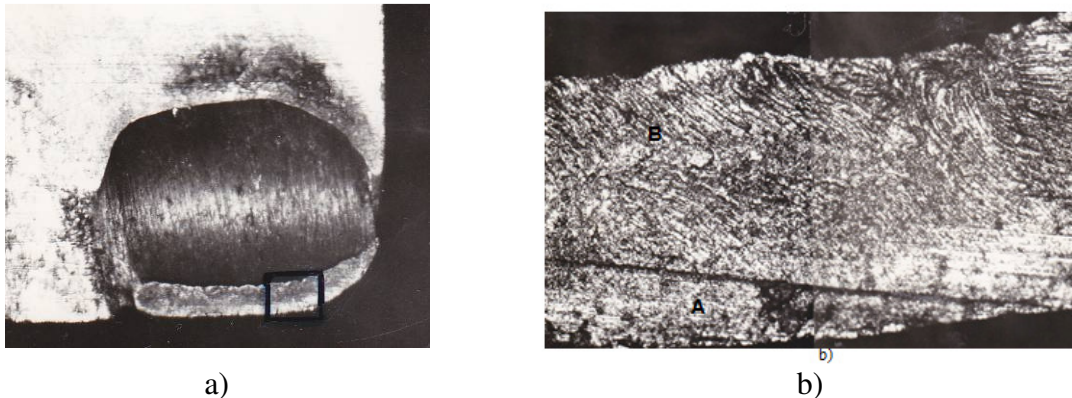
Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

kísérleti eredményei bázisán kvalitatív elemzést végzünk a forgácstőben kialakuló termoáramok, ill. kívülről bevitt elektromos áram hatására vonatkozóan.

## 2. Jelenségek a szerszám-forgács és szerszám-munkadarab határrétegben

A forgácsképződés közben az érintkező felületek környezetében kialakuló extrém mechanikai és termikus jelenségek meghatározóak a szerszám anyagának degradálódása, kopása szempontjából. Az ezekkel kapcsolatos megfigyeléseinkről korábban már beszámoltunk [1, 2], azonban az elektrotermikus folyamatok szempontjából ezek kiegészítése szükséges.

Amint az 1. ábrán megfigyelhető, a szerszám éle felé tartó anyagrészek egy ponton szó szerinti válaszútra kerülnek: vagy a munkadarabon maradvá haladnak tovább, és részévé válnak a megmunkált alkatrész erősen deformált felületi rétegének, vagy a forgácsba kerülnek. Ez a hely egy torlópont, amelynél az anyag izosztatikus állapotba kerülne, ha mozgásának nem lenne még egy szabadságfoka, amely az 1. ábrán a metszet síkjára merőleges irányú elmozdulás lehetőségét jelenti.



5. ábra. Az anyagmozgás nyomai a forgácsolószerszám a) homloklfelületén a b) élszalagon.

Az 5. ábra szemlélteti ennek a szerszám felületén megjelenő nyomait. A kopott gyorsacél forgácsolószerszám élszalagján, amely a b) képen kinagyítva is látszik, világosan megkülönböztethető két zóna. Az A)-val jelölt sávban látható köszörülési nyomok, amely a szerszám megmunkálásából származnak, és közvetlenül az alul lévő élnél található, azt bizonyítják, hogy ott nem volt súrlódás, a munkadarab ill. a forgács anyaga azon a szerszámrészen nem mozgott, állt. E fölött van az a hely, amely torlópontként működik, és „vízváltó” az anyag deformációja, mozgása szempontjából. Az élszalag B) sávján már nem látszanak a köszörülési karcok, ezzel szemben egy meglehetősen kaotikus rajzolat azt mutatja, hogy az anyag ott bonyolult mozgásban volt. Ez a mozgás lassan indult, majd hirtelen felgyorsulva kezdte koptatni a szerszám homloklfelületét, amelyen az a) képen megfigyelhető krátert alakította ki. A b) kép azt is bizonyítja, hogy meglehetősen nagyvonalú az az általánosan elfogadott feltételezés, amelyet különben az 1. ábra is sugall, hogy a forgácsnak a szerszámmal érintkező felületi rétegében az 2-vel jelölt áramlási zóna lamináris anyagmozgást jelent.

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

Ilyen benyomást erősíthet egy korábbi beszámolóban [2] az 5. és 7. ábra is. Valójában az anyag mozgása nem síkban, hanem természetesen térben történik, és a fent említett harmadik szabadságfokot az anyag láthatóan ki is használja. Ez esetenként másként történik. A 6. ábrán az élszalag teljesen sértetlennek látszik, a kopásnövekedés egy kontúr mentén hirtelen következik be, de a kráternek ez a kontúrja szabálytalanul hullámzó, amely egyaránt utalhat a szeszám és a forgács inhomogenitására. Az utóbbi a valószínűbb.

Ezzel együtt az elektrotermikus folyamatok szempontjából az állapítható meg, hogy az élszalag mentén jó elektromos kontaktus van.

Érdekesebb ebből a szempontból az első ábrán 3-mal jelölt fém csapocskák is. Egy ilyen forgácstó úgy készíthető, hogy a szerszámot itt nem részletezett módon – a képen lefelé – a lehető leggyorsabban eltávolítva a technológiai folyamatot igen hirtelen megszakítjuk. A csapocskák vitathatatlan bizonyítékai annak, hogy azokon a helyeken a forgács anyaga a Co kötésű WC, TiC és WTiC szemcséből álló keményfémhez hegedt. Annak ellenére történt ez, hogy ott a forgács már jelentős, ebben az esetben mintegy 1m/s sebességgel halad a homloklap felület fölött. Ebben a zónában az elektromos áramot terhelő átmeneti ellenállás nehezen értelmezhető, hiszen nyilvánvaló, hogy áram folyik a csapocskák mellett a többi érintkezési felületen is.



6. ábra. Forgácsolószerszám kopott homloklapja az eredeti köszörült állapotban maradt élszalaggal (alul).

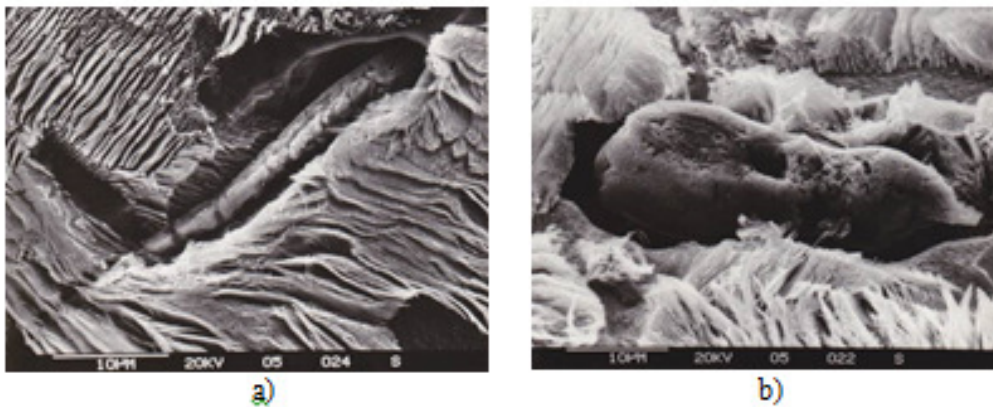
A homloklapon kialakuló átmeneti ellenállást a megmunkált acélban mindig jelen lévő, a gyártásukból visszamaradó dezoxidációs termékek is lényegesen befolyásolhatják. Ezek egy része a melegalakítás körülményei között az acél mátrixszal együtt deformálódik, elnyúlik, mint az 7/a ábra szemlélteti. Többnyire viszont olyan zárványok keletkeznek, mint az 7/b ábrán látható, amelyek alig, vagy egyáltalán nem válnak képlékennyé meleghegerlés közben. Ez utóbbiak a forgácsnak a szerszámmal érintkező rétegébe kerülve változatlanul elhaladnak a forgáccsal együtt, viszont az előbbieket a szerszámra kenődve nemfémes réteget képeznek



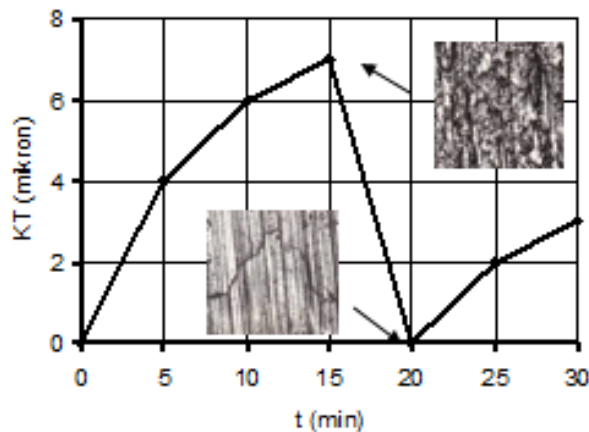
Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

annak felületén. A fent idézett beszámoló [2] erről a jelenségről is szolgáltatott bizonyítékokat (ott a 26. ábra). Ez akkor is befolyásolhatja az átmeneti elektromos ellenállást, ha a nemfémes réteg csak helyenként, részlegesen alakul ki.

Egy éltartam-vizsgálatnál az ilyen, akár részlegesen kialakuló réteg igen zavaró is lehet, mert a kopási folyamat értelmezését megnehezíti, akár lehetetlenné is teszi. A 8. ábra egy ilyen esetet mutat, amikor a kopás ellenőrzése a homloklapon kialakult kráter mélységének mérésével történt.



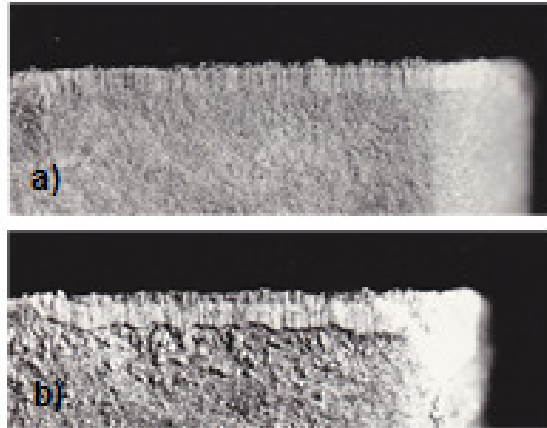
7. ábra. Az acélban lévő zárványok, a megalakítás körülményei között a) képlékeny, b) szilárd dezoxidációs termék.



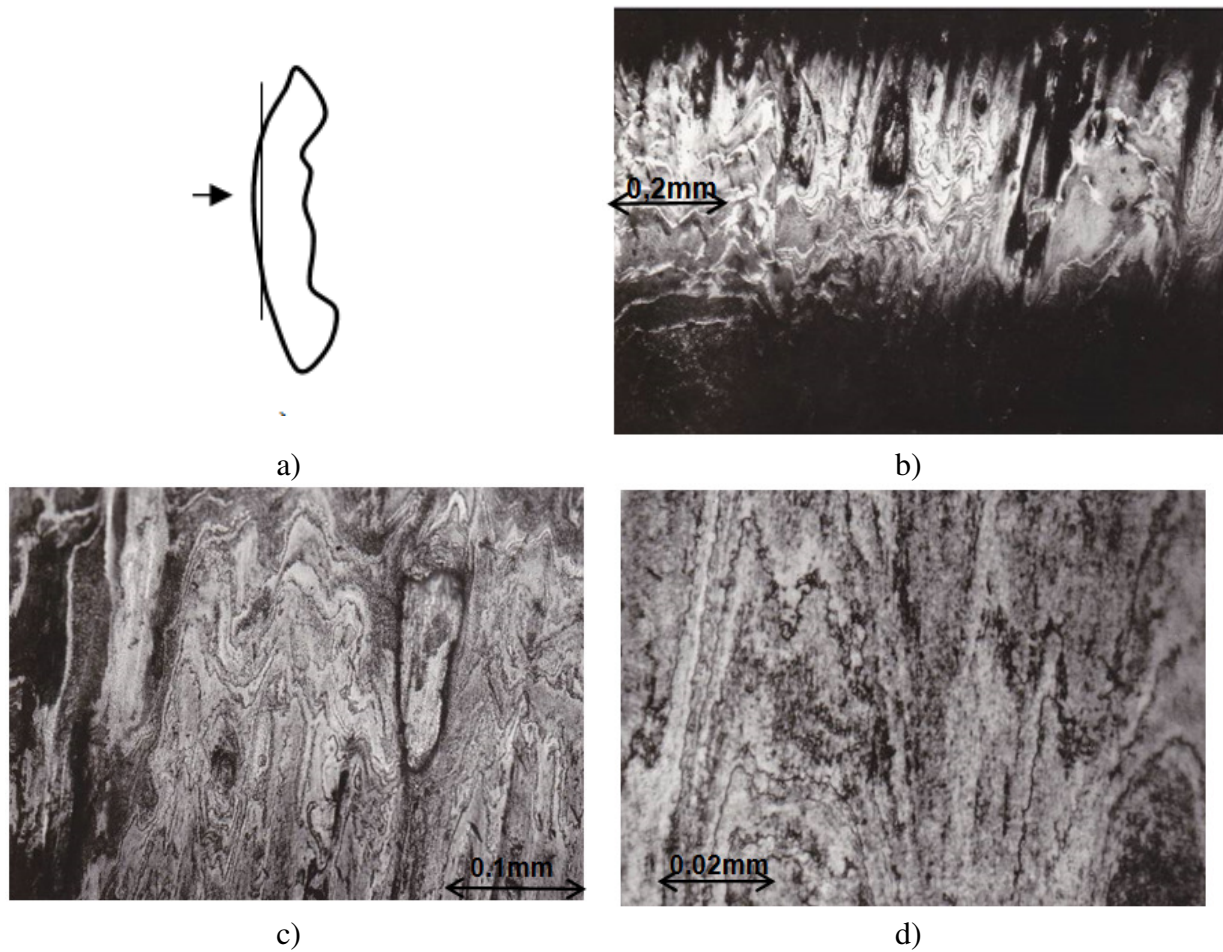
8. ábra. Kráterkopás mérése a szerszám homloklapján időszakos nemfémes védőréteg kialakulása esetén



Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97



9. ábra. Forgácsolószerszám hátlapja a) normál kopással, ill. b) nemfémes anyagfelrakódással (Anyag C25 ötvöztelen acél, szerszám P20 keményfém).



10. ábra. Egy ferrit-ferlites szövetszerkezetű forgács hátlapi csiszolatáról készült felvételek.

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

Ez a jelenség esetenként a szerszám hátlapján is megfigyelhető. A 9. ábrán forgácsolószerszám látható két különböző acéladagból származó minta esztergályozása után. Az a) kép szokványos kopásnyomot mutat, egy olyan felületet, amelyen a termoáram átfolyhat. Ezzel szemben a b) képen képlékeny dezoxidációs termékekből képződött nemfém anyagfelrakódás látható, amelynek vezetőképessége nyilvánvalóan sokkal kisebb az a) verziónál.

Áttérve a szerszám homloklapján elhaladó forgács szerkezetére, az is figyelemreméltó sajátosságokat mutat. Miközben a forgácsolásmélet általánosan elfogadott tétele az, hogy eltekintve egyes esetektől, mint a relatív kis sebességű forgácsolás is, a forgács szerszámmal érintkező sávjában lamináris áramlás tapasztalható. Érdekes ezzel kapcsolatban a 10. ábrán látható forgácsmetszetet megvizsgálni. Egy ilyen u.n. lamináris jellegű zónát nem hosszmetsetben mutat, hanem a mellette lévő vázlat szerint egy olyan csiszolaton, amely ferdén metszi ezt a réteget. A ferrit-perlites szövetszekezet deformációja arról árulkodik, hogy ott egy igen heterogén struktúra alakul ki. A Fe  $\alpha$ -fázisában a karbidok széttöredezve, teljesen egyenlőtlenül, mondható, kaotikusan helyezkednek el, amely az elektromos vezetőképesség szempontjából nyilvánvalóan nem közömbös.

Ehhez járul az a megfigyelésünk, hogy ez a finom karbidstruktúra a rendelkezésre álló igen rövid idő alatt is – legalább részben – oldódni tud, hiszen a forgácsedzési kísérleteink szerint edződésre is képes ([2] 4. ábra). Akkor pedig a szerszám mellett elhaladó acél legalább részben ausztenites szövetszerkezetű, amelynek az elektromos vezetőképessége rosszabb a ferrit-perlites szöveténél.

### 3. A forgácsolási hőmérséklet és mérése

A forgácsolási hőmérséklet klasszikusnak számító ismert képlete a

$$\Theta_e = C_v v^x \quad (1)$$

összefüggés, amelyben  $C_v$  és  $x$  konstans. Ezt aztán a különböző technológiai paraméterekkel is ki szokták bővíteni. Tulajdonképpen az  $x$  maga is függ a forgácsolósebességtől, amely úgy hidalható át, hogy a hőmérséklet különböző tartományokban más-más értéket használnak [23]. Kalászi [24] azt is kimutatta, hogy a forgácsolási hőmérséklet termoelemes mérésénél a termofeszültséget az érintkező anyagokban esetlegesen végbemenő szövetszerkezeti, strukturális átalakulás is befolyásolja, amelyre az eredmények értékelésénél tekintettel kell lenni.

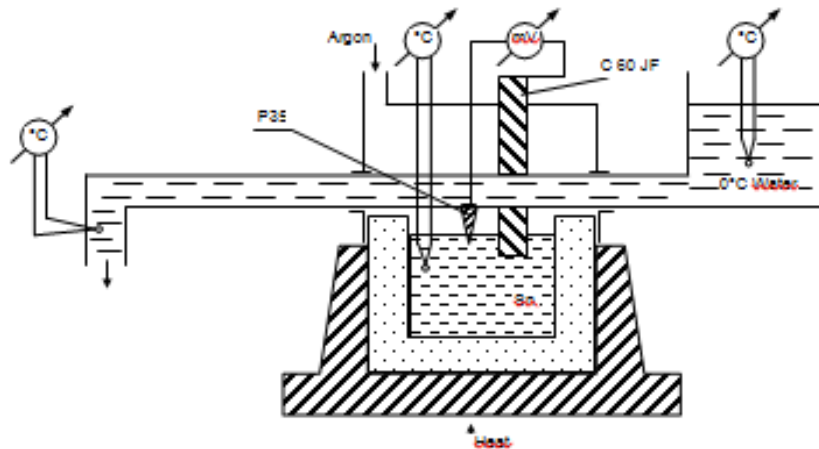
Természetesen az időtől is függő dinamikus folyamatról van szó, amely – ismeretes módon – a kezdeti tranziens szakasz után, állandó keresztmetszetű anyag folyamatos leforgácsolásánál egy konstans értékhez konvergál, és ezt az értéket szokás az (1) képlettel leírni. Szakaszos forgácsolásnál, mint a homlokmarás, a folyamat tranziens szakasza a lényeges, amelynél bevált a

$$\Theta_e = C_v v^x \exp\left(-\frac{\tau}{t}\right) \quad (2)$$

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

empirikus képlet alkalmazása. Itt  $t$  az idő,  $\tau$  a tranziens folyamatra jellemző időállandó, pl. közepes C-tartalmú acéloknál  $\tau=1.95\mu\text{s}$  [23].

A forgácsolási hőmérséklet méréséhez hitelesíteni kellett a szerszám-munkadarab anyagpárt, mint termoelement. Az ehhez kialakított mérési elrendezést a 11. ábra mutatja. Króm gyűrűbe ágyazott grafittégelyben Sn olvadékba, mint forraszanyagba mártott 60 JF minőségű acél és P35 jelű keményfém alkotta a forrópontot, a hidegpontot pedig folyamatos hűtéssel  $0^{\circ}\text{C}$  hőmérsékletű víz biztosította. Ennek ellenőrzése a víz bemeneti és kimeneti oldalán is megtörtént. Az Sn-fürdő hőmérsékletét mérni és külső fűtéssel szabályozni lehetett. A hőmérséklet mérések RhPt-Pt hőelemekkel történtek.



11. ábra. Mérési elrendezés a természetes termoelem hitelesítéséhez [24].

A hitelesítésnél használt P35 keményfém a WC, TiC és TaC ill. vegyes karbidokat tartalmaz, amelyeket porkohászati úton Co kötőanyaggal állítanak elő. Az összetételt a 2. táblázat tartalmazza, a vele párosított C60 acélét pedig a 3. táblázat. A szövetszerkezetét a 12. ábra mutatja.

2. táblázat

A termoelemben használt keményfém kémiai összetétele

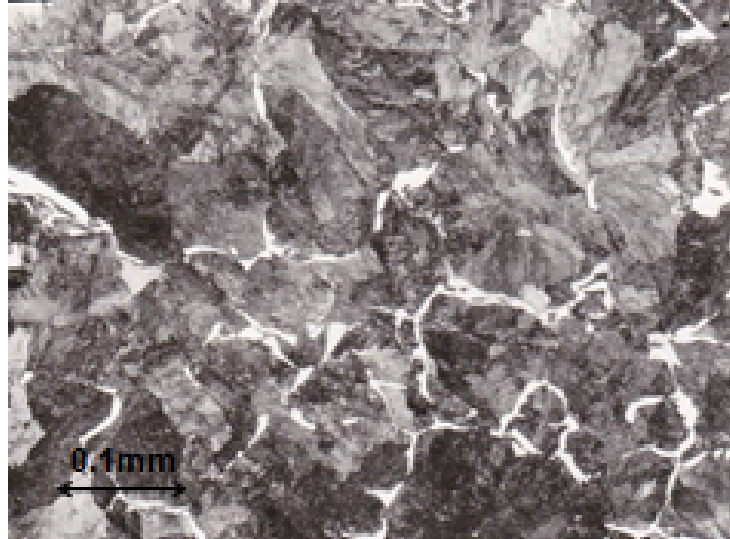
WC (s%)	TiC (s%)	TaC (s%)	Co (s%)
77	4	8	11

3. táblázat

A termoelemben használt C60 acél kémiai összetétele

Minőség	C	Mn	Si	P	S
C60	0,63	0.68	0.26	0.013	0.029

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97



12. ábra. A természetes termoelem hitelesítésénél alkalmazott C 60 acél szövetszerkezete.

A hitelesítő mérés 1000°C-ig 50°C-os lépésekkel felmelegítés és lehűlés közben is el lett végezve. Az eredményeket a 13. ábra foglalja össze. Megállapítható, hogy a hiszterézis minimális, a mérési eredmények az egyszerű arányosságot kifejező regressziós egyenesre igen szorosan illeszkednek ( $R^2=0,9979$ ), így megbízhatóan használható a

$$\Theta = c_E E \quad (3)$$

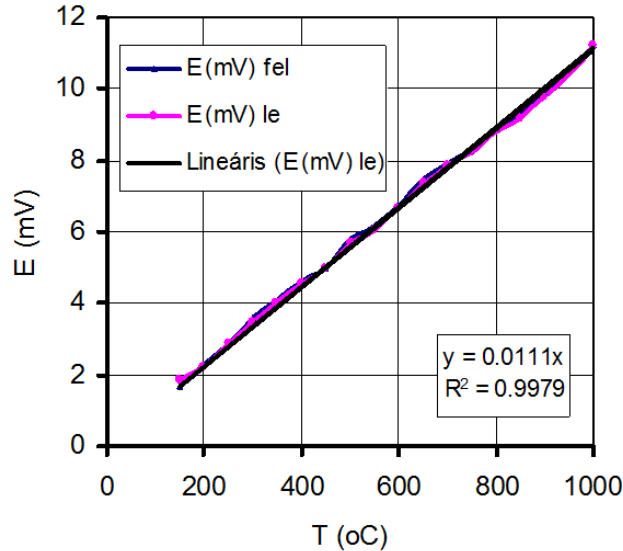
képlet, ahol  $c_E = 1/0.0111 = 90.1^\circ\text{C}/\text{mV}$

Annak ellenére, hogy a felsorolt technikai jellemzők valóban lényegesen befolyásolják a forgácstőben és így a szerszám felületén is a termikus viszonyokat, az (1) képlet hosszú idő óta, és még jelenleg is használatos, szakirodalma igen kiterjedt. Kaminise és tsai kimutatták [25], hogy a szerszámtartó hővezetőképessége is jelentősen befolyásolja az élnél kialakuló hőmérsékletet, Sun et al [26] pedig Ti ötvözet marásánál a termoelemmel mért eredményeket szintén a bevált (1) típusú függvényben foglalták össze. Ezt a FEM módszerek rendszeresen alkalmazzák is, mint Lazoglu and Islam [27], akik 3D FEM módszerrel határozták meg a forgácsolási hőmérsékletet. Ez a munka jó példa arra is, hogy a FEM eszközök értékes kiegészítései lehetnek a kísérleti mérési eredményeknek, amikor a termoelemmel meghatározható átlagos hőmérséklet mellett a hőmérséklet felületi megoszlásának meghatározása is feladat.

A forgácsolási hőmérséklet mérésénél, amikor adatokat gyűjtene az (1) ill. (2) empirikus képlet meghatározásához, általában nem kopott, hanem új szerszámot alkalmaznak. Számos kutató megállapítása szerint azonban a szerszám kopása közben a hőmérséklet emelkedik. Ennek a jelenségnek is jelentős a szakirodalma. Különböző jelentések váltak ismertté arra vonatkozóan, hogy a kopás hőmérsékletet növelő hatását milyen empirikus képlettel célszerű leírni. Colwell [28] a hátlapi hőmérséklet és a hátkopás kétirányú kapcsolatára mutatott rá, Rubenstein [29] pedig a forgácsolási hőmérsékletet befolyásoló tényezőket, így a hátkopást is hatványfüggvényben foglalta össze, mint Kundrák [30], valamint Park és Ulsoy [31].



Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97



13. ábra. A természetes termoelem hitelesítési görbéje.

Mások megelégedtek a kopás és hőmérséklet kapcsolatának lineáris megközelítésével is, mint Cook [32], aki ausztenites acél simító megmunkálásánál 0,1 mm hátkopáshoz 38<sup>0</sup>C hőmérséklet emelkedést adott meg. Lowack C-acélnál 33<sup>0</sup>C értéket kapott. Luo és tsai [33] azt a  $\Delta\theta$  növekményt, amely a szerszám hátlapján a kopás hatására alakul ki, szintén arányosnak tekintették a kopással. Barlier és tsai [34] szintén ilyen megállapítást tettek. Jelen esetben, amikor a cél egy kvalitatív analízis, a lineáris megközelítés kielégítő, és a kopásnak a hőmérsékletet növelő hatása a

$$\Delta\Theta_w \cong c_w W \quad (4)$$

képlettel írható le, ahol W a kopás, pl. a hátkopásnál VB és  $c_w$  arányossági tényező. Az e tárgykorben fellelt szakirodalmi adatok bázisán végül is jelen munkában a (4) képlet konstansához Kodácsy mérései szolgáltak alapul, aki  $c_w \approx 1.2^\circ\text{C}/\square\text{m}$  értéket állapított meg [35].

## 5. A forgácsoló elektrottermikus modellje

A forgácsolószerszám felületén a hőmérséklet mező a következő három folyamat együttes hatására alakul ki.

- A forgácsolóban az anyag nagy, gyors deformációja és a súrlódás a szerszám felületén ( $\Theta_m$ ).
- A szerszám felületén kialakuló hőmérséklet a kopás hatására  $\Delta\Theta_w$  értékkel növekszik, amely szintén a súrlódási erő teljesítményével van kapcsolatban.
- A munkadarab, a szerszám és a forgács érintkezési felületein kialakuló hőmérséklet-mező a szerszám felületén egy speciális elektromos potenciál mezőt hoz létre, örvényáramok keletkeznek, amint a 2. és 3. ábra szemlélteti. Ez a hőmérséklet további  $\Delta\Theta_i$  növekedését okozza.

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

Természetesen ez a három folyamat összefügg, amelyet a konkrét számításoknál figyelembe kell venni. A különböző mérési módszerekkel meghatározható, u.n. □ forgácsolási hőmérséklet tehát

$$\Theta = \Theta_m + \Delta\Theta_w + \Delta\Theta_i \quad (5)$$

Az (1) ill. (2) képlet empirikus meghatározásánál többnyire új, még nem kopott szerszámot alkalmaznak, így az eredmények a  $\Delta\Theta_w$  értéket nem tartalmazzák. Viszont a  $\Delta\Theta_i$  növekmény nyilvánvalóan része a méréssel meghatározott  $\Theta_e$  értéknek, és ezért indokolt a megkülönböztetés, hogy az ép szerszámmal mért forgácsolási hőmérséklet

$$\Theta' = \Theta_m + \Delta\Theta_i, \quad (6)$$

Ez a mért hőmérséklet, mint ismeretes, a szerszám dolgozó felületén egy sajátos átlagértéket jelent, amelytől a homloklapi maximum melegebb, a hátlap pedig alacsonyabb hőmérsékletű. Értelmezhető tehát a hátlapnál egy  $\Delta\Theta_f$  hőmérsékletkülönbség. Így a hátfelület hőmérséklete

$$\Theta_f \approx \Theta_m + \Delta\Theta_w + \Delta\Theta_i - \Delta\Theta_f \quad (7)$$

Szakaszos forgácsolásnál természetesen az (1) helyett a (2) képletet kell használni.

Feltételezések a belső áramkörök számításánál:

Az  $R_f$  átmeneti ellenállás a szerszám hátfelülete és a munkadarab között függ a kopás mértékétől:

$$R_f = \frac{C_R}{W} \quad (8)$$

A forgácsolási hőmérséklet a kopással arányosan növekszik, amint a (4) képlet kifejezi.

Feltételezhető továbbá, hogy a homloklap és hátlap közti hőmérsékletkülönbség leírható a következő lineáris függvényvel:

$$\Delta\Theta_f \approx c_f \Theta_f (1 + c_{f1} W) \quad (9)$$

ahol  $c_f$  és  $c_{f1}$  szintén konstansok.

Végül az a  $\Delta\Theta_i$  hőmérséklet emelkedés, amely az  $i_f$  termoáram hatására bekövetkezik

$$\Delta\Theta_i \cong c_i \frac{i_f^2}{R_f} \quad (10)$$

ahol  $c_i$  konstans.

Az áramkörök hatásának kvalitatív elemzésénél az itt felsorolt konstansok azokból az adatokból becsülhetők, amelyek a szakirodalomban a szerszám hátfelület hőmérsékletére, a kopásnak a hőmérsékletre gyakorolt hatására vonatkozóan megjelentek.

A 2. ábrán látható elektromos mezőt a 3. ábra szerint 3 áramkörbe koncentráltuk, és az áramköri modellt a 14. ábra szemlélteti. Itt

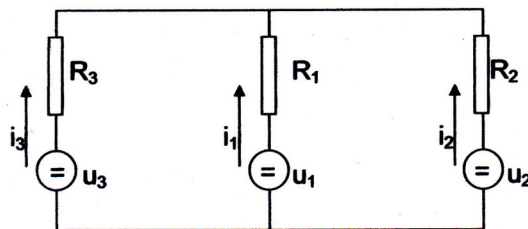
Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

$i_1=i_f$ : áram a homlok- és a hátlapon át  
 $i_2$ : homloklapi belső áram  
 $i_3$ : áram a szerszámon, a forgácson és a gépen át

A termofeszültség ismert módon közel arányos a hőmérséklettel, így a  $\Theta_f$  ismeretében az  $u_1$  már kiszámítható a

$$u_1 = E_f = c_E \Theta_f \quad (11)$$

képlettel, ahol  $c_E$  a konkrét anyag-párra vonatkozó Seebeck-konstans, értéke az adott viszonyokra ismert [24].



14. ábra. Áramkörök a forgácsolásnál.

Az  $u_2 = E_t$  feszültség az előzőek szerint a  $\Theta$  hőmérsékletű homloklapon alakul ki, vagyis

$$u_2 = E_t = c_E \Theta \approx c_E (\Theta_f + \Delta\Theta_f) \quad (12)$$

A 14. ábrán  $u_3$ -mal jelölt feszültséggel csak abban a különleges esetben kell számolni, ha a szerszám és a munkadarab között egy külső áramforrás is működik, amint az e dolgozatban bemutatott marási kísérleteknél történik. Egyébként  $u_3=0$ .

A szerszám hátfelületén átfolyó elektromos áram erőssége a 3. ábrán látható áramkörökből számítható ki. A részleteket mellőzve

$$i_f = \frac{E_f}{c_R + \frac{R_m R_t W}{R_m + R_t}} - \frac{R_m W}{c_R + R_m W} \cdot \frac{E_f + \Delta E}{R_t + \frac{R_m c_R}{c_R + R_m W}} - \frac{R_t W}{c_R + R_t W} \cdot \frac{E_t}{R_m + \frac{c_R R_t}{c_R + R_t W}} \quad (13)$$

Az ezekkel az összefüggésekkel meghatározott hőmérséklet felhasználható már a szerszámkopás számításánál, amelyhez a következő differenciálegyenlet használható [35]

$$\frac{dW}{dt} = \frac{v}{W} \left( A_a + A_{th} \exp\left(-\frac{Q}{R\Theta_f}\right) \right) \quad (14)$$

ahol  $v$  a forgácsolósebesség,  $Q$  a kopás aktiválási energiája,  $R$  az általános gázállandó,  $A_a$  és  $A_{th}$  pedig konstansok. Amint látható, a  $W$  kopás, amely esetünkben a VB hátkopás, és a  $\Theta_f$  hőmérséklet kapcsolatában itt pozitív visszacsatolás van. A numerikus megoldásnál célszerű a

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

W kopást – itt  $W=VB$  – független változónak tekinteni, hiszen ez a (8)  $R_f$  ellenállást, (9)  $\Delta\Theta_f$  és  $\Delta\Theta_i$  (10) hőmérséklet növekményt, (13)  $i_f$  áramerősséget is befolyásolja. A (14) egyenlet differencia-változatában ekkor a  $\Delta t$  lesz a függő változó, azaz az egyenlet inverzét kell használni a

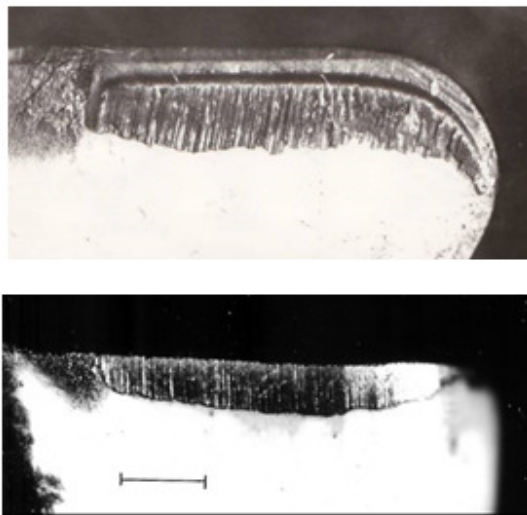
$$\Delta t = \frac{\Delta W}{dW/dt}, \quad (15)$$

képlet szerint, amellyel aztán a  $W(t)$  függvény numerikusan meghatározható.

## 6. Folyamatos forgácsleválasztás

### 6.1 Esztergálási kísérletek

Azt a sajátos jelenséget tanulmányozva, amelyről korábban már beszámoltunk [1], hogy a forgácslószerszám felületén a megmunkált acél dezoxidációs termékeiből védőréteg alakulhat ki (9. ábra), kerámia lapkával, azaz elektromosan szerszámnyalattal is ellenőrző kísérletet végeztünk. Megállapítható volt, hogy megfelelő acél forgácsolásokor ilyen szerszámon is kialakulhat a nemfém felrakódás (15. ábra).



15. ábra. Nemfém felrakódás kerámia szerszám homlok- és hátfelületén.

E tapasztalat után került sor egy olyan összehasonlító szerszámkopási vizsgálatra, amelynél normál és elektromosan elszigetelt szerszámmal történt a megmunkálás, hogy ennek a kopást befolyásoló hatása megállapítható legyen. Az ilyen esetben szokásos eljárás szerint először egy bázis vizsgálatot kellett elvégezni, amelynél ilyen nemfém szerszámvédő anyagfelrakódás nem alakul ki. Szokványos C45 szénacél normál és izolált P20 keményfém szerszámmal lett esztergálva. A szerszám gép fokozatmentes hajtóművel felszerelt, meglehetősen elhasznált MVE380 típusú csúcseszterga volt. Az esztergált munkadarab



Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

szövetszerkezete 16. ábrán, zárványossága a 17. ábrán látható, az acél összetételét a 4. táblázat tartalmazza. A szerszám P20 jelű bevonat nélküli keményfém volt ( $\alpha=8^\circ$ , ( $\alpha=6^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ ,  $\alpha_r=90^\circ$ ,  $r_\alpha=0.8\text{mm}$ ), és  $f=0.25\text{mm/ford}$  előtolást,  $a=2.5\text{mm}$  fogásmélységet alkalmaztunk.

4. táblázat  
Kémiai összetétel

Minőség	C	Mn	Si	P	S
C45	0,47	0,56	0,20	0,023	0,035

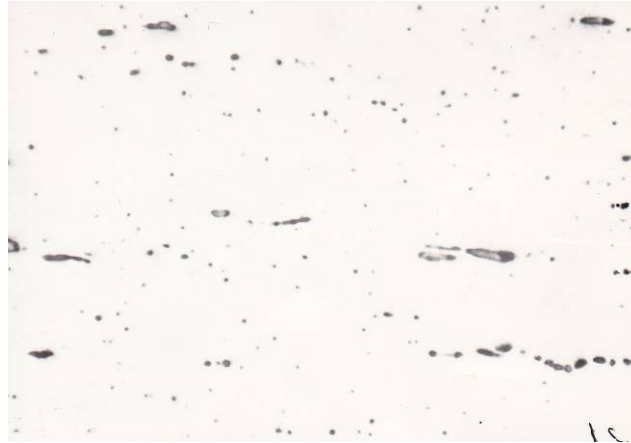
A háromszor megismételt forgácsolási kísérleteknél a szerszám négyélű bevonatlan lapka volt, amelynél egy-egy éllel  $v=200\text{m/min}$  ill.  $v=250\text{m/min}$  sebességgel normál és izolált állapotban lett esztergálva. A kezdeti kopásállapot az éllekerekedés  $0.03\text{mm}$  sugara. A mérési eredményeket az 5. és 6. táblázat tartalmazza. A kopásgörbék alapján a  $VB=0.4\text{mm}$  éltartamkritériumhoz meghatározott éltartamok a 7. táblázatban láthatók, a kopásgörbéket pedig a 18. és 19. ábra mutatja.

A mért éltartamok átlagát a 20. ábra külön is összefoglalja. Az a meglepő eredmény adódott, hogy  $v=200\text{m/min}$  forgácsolósebességnél az izolált szerszám éltartama volt valamivel jobb,  $v=250\text{m/min}$  esetében viszont a normál, azaz nem izolált szerszámé.



16. ábra. A kísérleti C45 acél Widmannstätten-jellegű + perlités szövetszerkezete.

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97



17. ábra. A kísérleti C45 acél zárványképe.

5. táblázat

A szerszámkopás  $v=200\text{m/min}$  sebesség esetén

Normál				Izolált			
t (min)	VB <sub>1</sub> (mm)	VB <sub>2</sub> (mm)	VB <sub>3</sub> (mm)	t (min)	VB <sub>1</sub> (mm)	VB <sub>2</sub> (mm)	VB <sub>3</sub> (mm)
0	0.03	0.03	0.03	0	0.03	0.03	0.03
5	0.20	0.23	0.24	5	0.21	0.19	0.16
10	0.30	0.32	0.35	10	0.27	0.29	0.31
15	0.42	0.45	0.48	15	0.45	0.41	0.42

6. táblázat

A szerszámkopás  $v=250\text{m/min}$  sebesség esetén

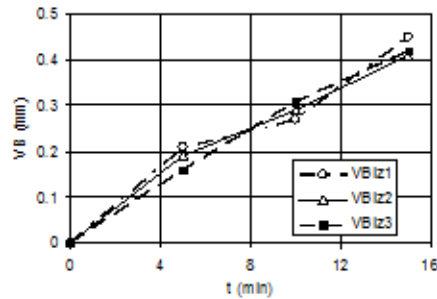
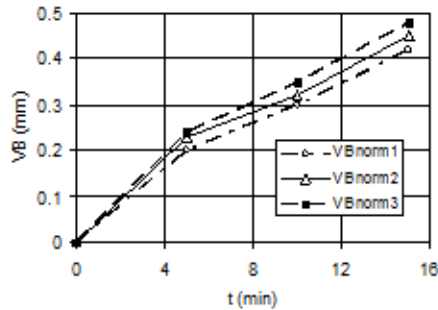
Normál				Izolált			
t (min)	VB <sub>1</sub> (mm)	VB <sub>2</sub> (mm)	VB <sub>3</sub> (mm)	t (min)	VB <sub>1</sub> (mm)	VB <sub>2</sub> (mm)	VB <sub>3</sub> (mm)
0	0.03	0.03	0.03	0	0.03	0.03	0.03
4	0.17	0.19	0.22	4	0.26	0.28	0.31
8	0.31	0.29	0.33	6	0.38	0.41	0.45
10	0.39	0.41	0.45				

7. táblázat

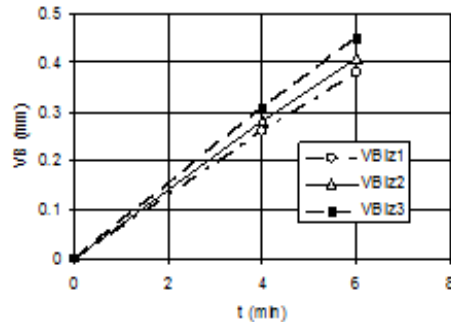
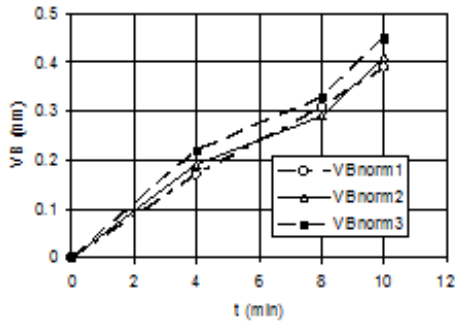
Szerszám éltartamok ( $VB_{kr}=0.4\text{mm}$ )

v (m/min)	T (min)					
	Normál			Izolált		
200	14.2	13.1	11.9	13.6	14.6	14.1
250	10.3	9.8	9.2	6.3	5.8	5.3
200 átlag	<b>13.1</b>			<b>14.1</b>		
250 átlag	<b>9.8</b>			<b>5.8</b>		

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

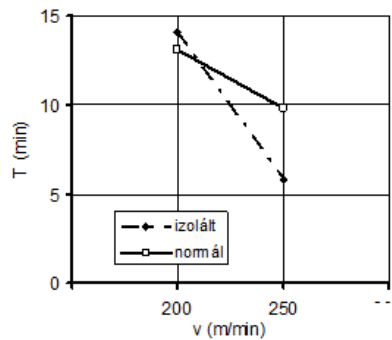


a) Normál  
 b) Izolált  
 18. ábra. Kopásgörbék  $v=200\text{m/min}$  forgácsolósebességnél.



a) Normál  
 b) Izolált  
 19. ábra. Kopásgörbék  $v=250\text{m/min}$  forgácsolósebességnél.

Tulajdonképpen az izolált szerszámmal kapott éltartamok mondhatók reálisnak, hiszen ott a  $v$  fogácsolósebesség és  $T$  éltartam kapcsolatát leíró  $vT^{-1/k}=C_T$  Taylor-féle függvény exponense kereken  $-k=4$ , amely keményfém szerszámnál megszolott. Ezzel szemben a normál üzemi állapotban kapott éltartamok alapján számítva ez az exponens csak  $-k=1.3$ , amelynél nyilvánvalóan valamilyen járulékos hatásnak kellett érvényesülnie. Erre a kérdésre a kvalitatív modell-számítással lehetett választ kapni.



20. ábra. Átlagos éltartamok normál és izolált szerszám esetén.

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

## 6.2. Modellszámítások folyamatos forgácsleválasztásnál.

Az 5. fejezetben bemutatott kvalitatív elektrotermikus modell lehetőséget ad ennek az ellentmondásos eredménynek az értelmezésére. Ehhez a 2. fejezetben idézett publikációkban közölt vizsgálati eredményeket figyelembe véve a kvalitatív elemzéshez a 8. táblázatban összefoglalt konstansok lettek felhasználva, törekedve arra, hogy a kopásmérési eredményekre a számított függvények optimálisan illeszkedjenek.

8. táblázat

A termoelektromos kopásmoell konstansai.

$c_f$	$c_{f1} (\mu\text{m}^{-1})$	$c_E (^\circ\text{C}/\text{mV})$	$c_w (^\circ\text{C}/\mu\text{m})$	$c_R (\mu\Omega \cdot \mu\text{m})$	$c_i (^\circ\text{C} \cdot \Omega/\text{A}^2)$	$R_t (\text{m}\Omega)$
0.17	0.001	0.011	1.2	0.03	0.04	0.6

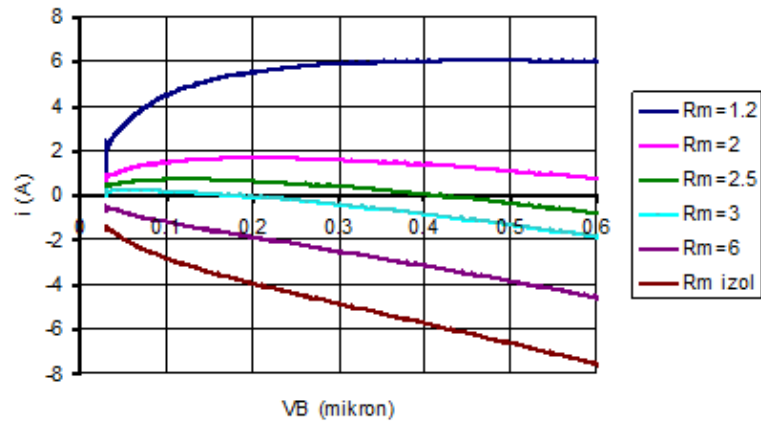
A (14) dimenziós, azaz mértékegységtől függő kopásegyenlet, a C45 acélra és P20 keményfémre vonatkozó konstansai a [36] szerint  $A_a=2 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}$ ,  $A_{th}=200 \mu\text{m}$ , ha  $[v]=\text{m}/\text{min}$ ,  $[W]=\mu\text{m}$ .  $Q=152 \text{kJ}/\text{mol}$ ,  $R=8.314 \text{kJ}/^\circ\text{K} \cdot \text{mol}$ . Az (5) képletben a  $\Theta_m$  hőmérsékletre az előzetes számítások alapján  $1260^\circ\text{K}$  adódott.

A szerszám hátlapja és a munkadarab érintkező felületén átfolyó elektromos áram számított értékeit a 21. ábra szemlélteti, amely a kopottsági állapot hatása mellett a szerszámgépen átfolyó áramot terhelő  $R_m$  ellenállás hatását is mutatja. Ez az ellenállás Shan és Pandley [13] szerint a gép főorsójának fordulatszámával növekedhet, és ennek figyelembevételével sikerült a 20. ábrán bemutatott szokatlan kísérleti eredményeket értelmezni. Az elektromosan izolált szerszám esetében az  $R_m$  ellenállásnak természetesen nincs szerepe, hiszen akkor a gépre a szerszámból nem tud az elektromos áram kijutni. Normál, szigetelés nélküli esetben úgy sikerült a numerikusan meghatározott kopásgörbékét a legjobban a mérési eredményekre illeszteni, ha a  $v=200 \text{m}/\text{min}$  forgácsolósebességnél alkalmazott  $R_m=1.4 \text{m}\Omega$  érték a  $v=250 \text{m}/\text{min}$  sebesség esetén  $R_m=1.6 \text{m}\Omega$  értékre lett megnövelve. Ez utóbbi esetben a méréssel meghatározott forgácsolási sebesség  $\theta_m=1338^\circ\text{K}$  volt. Az ilyen módon kiszámított kopásgörbékét a  $v=200 \text{m}/\text{min}$  sebességre vonatkozóan a 21. ábra, a  $v=250 \text{m}/\text{min}$  sebességre a 22. ábra mutatja.

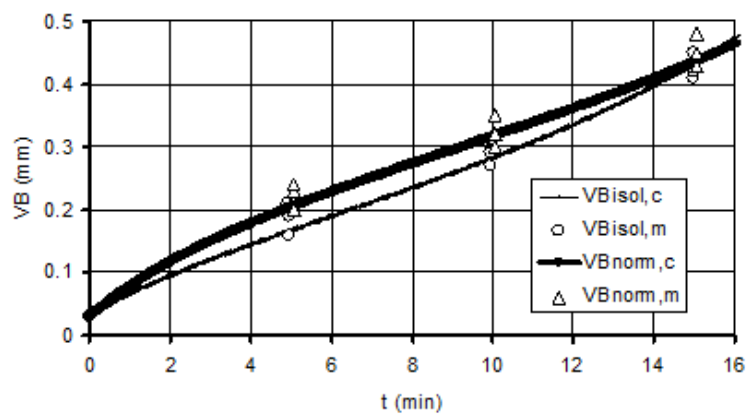
A számításoknál természetesen az  $R_t$  és az  $R_m$  ellenállás együttes hatását kellett vizsgálni. A  $V_B=0.4 \text{mm}$  hátkopáshoz tartozó éltartam számítások eredményeit a 24. és 25. ábra foglalja össze, amelyeken  $R_t=0.6 \text{m}\Omega$  értéknél a mérési eredmények is fel vannak tüntetve. Az izolált szerszámnál a  $R_m$  értéke természetesen közömbös. A  $v=200 \text{m}/\text{min}$  sebességnél az  $R_m=1.4 \text{m}\Omega$  görbénél, a  $v=250 \text{m}/\text{min}$  sebességnél az  $R_m=1.6 \text{m}\Omega$  vonalon van a mérési eredmény. Látható, hogy ezek összhangban vannak a 20. ábra kapcsán tett megállapításokkal.



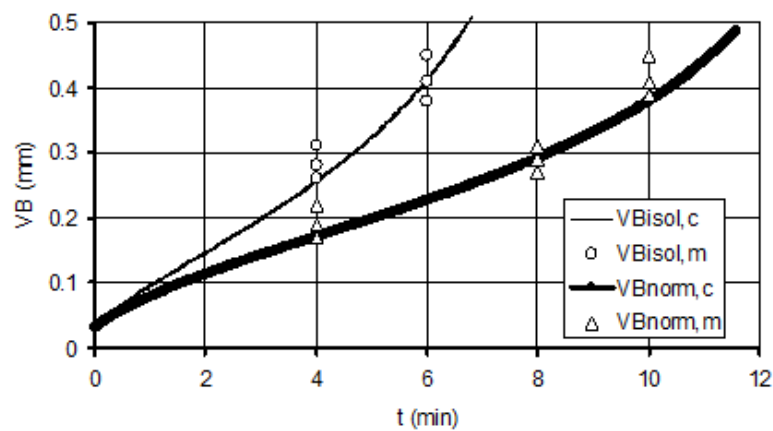
Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97



21. ábra. A szerszám hátlap és a munkadarab között átfolyó számított áram erőssége. ( $[R_m]=m\Omega$ )

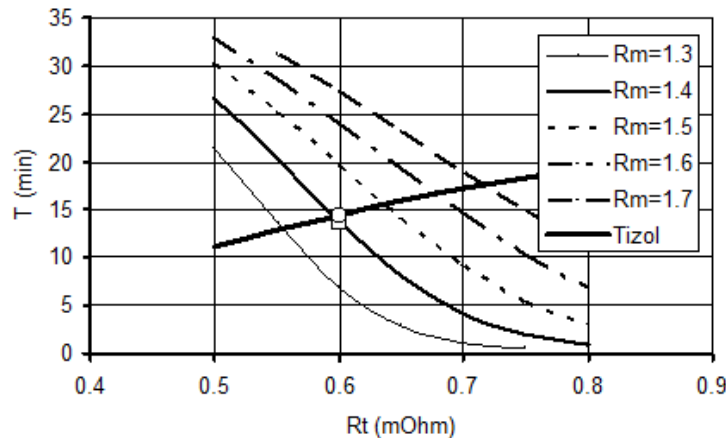


22. ábra. A számított kopásgörbe illeszkedése a mérési eredményekre ( $v=200\text{m/min}$ ,  $R_m=1.4\text{m}\Omega$ ).

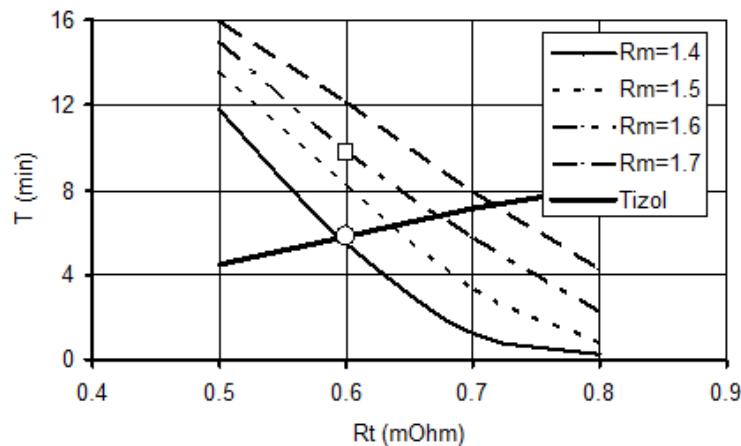


23. ábra. A számított kopásgörbe illeszkedése a mérési eredményekre ( $v=250\text{m/min}$ ,  $R_m=1.6\text{m}\Omega$ ).

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97



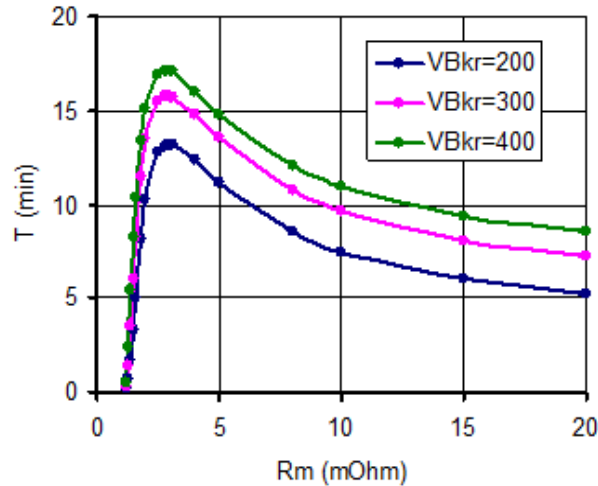
24. ábra. A normál és izolált éltartamok az  $R_t$  és  $R_m$  ellenállás függvényében számított  $T$ -görbéken ( $v=200\text{m/min}$ ,  $[R_m]=\text{m}\Omega$ ).



25. ábra. A normál és izolált éltartamok az  $R_t$  és  $R_m$  ellenállás függvényében számított  $T$ -görbéken ( $v=250\text{m/min}$ ,  $[R_m]=\text{m}\Omega$ ,  $VB_{kr}=400\mu\text{m}$ ).

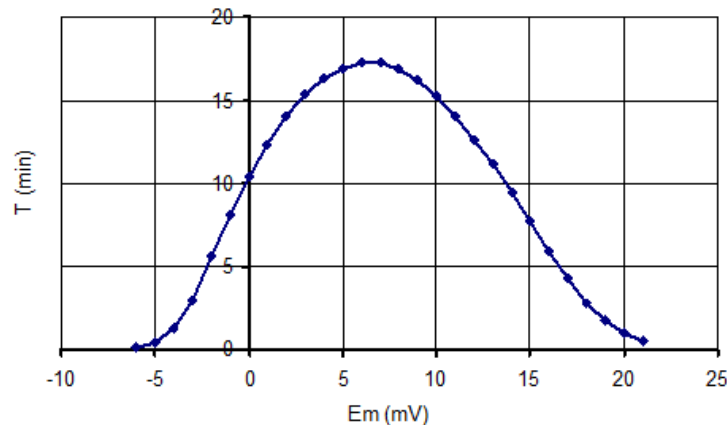
A 26. ábra azt szemlélteti, hogyan befolyásolja a szerszám gép elektromos ellenállása a szerszám éltartamát. Így érthetővé válik, hogy a különböző kutatók miért tettek más-más megállapítást, amikor a szerszám elszigetelésének az éltartamra gyakorolt hatását vizsgálták. A 26. ábra csak a  $20\text{m}\Omega$ -ig terjedő tartományt szemlélteti, azonban látszik, hogy a görbék egy-egy aszimptotához tartanak.  $VB_{kr}=200\mu\text{m}$  éltartam-kritériumnál ez  $3.04\text{min}$ , majd  $4.71$  ill.  $5.9\text{min}$ . Abban az esetben, ha a szerszám gép elektromos ellenállása kisebb, mint az ábra maximum-helye, akkor előfordulhat akár az, hogy a szigetelt szerszámon mérnek nagyobb éltartamot, akár az, hogy a normál esetben következik ez be. Ha viszont a gép ellenállása a maximum-helytől jobbra esik, akkor mindig a normál forgácsolásnál lehet a nagyobb éltartamot mérni.

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97



26. ábra. A számított éltartam az  $R_m$  ellenállás függvényében ( $v=250\text{m/min}$ ).

Amint a továbbiakban e vizsgálatok azon részében látható lesz, amelynél a szakaszos forgácsleválasztás modellezése volt a cél, külső feszültségforrás bekapcsolása is befolyásolja a hőmérsékleti viszonyokat, így a szerszám kopását, éltartamát is. Számítással ez a hatás itt is kimutatható, amint a 27. ábra mutatja.



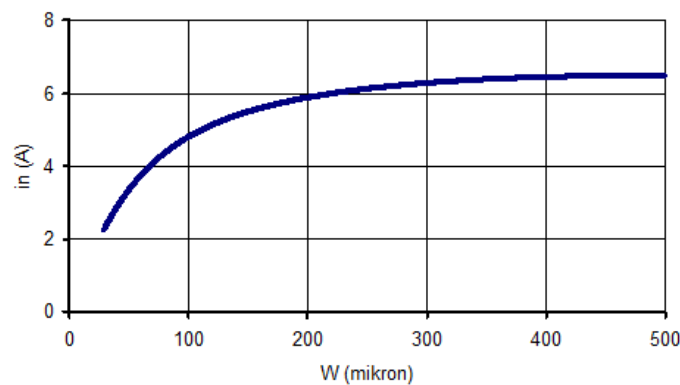
27. ábra. Az éltartam a külső feszültségforrás különböző értékeinél ( $v=250\text{m/min}$ ,  $VB_{kr}=400\mu\text{m}$ )

Látható, hogy az optimális helyzet nem a nulla külső feszültségnél áll elő, hanem egy olyan értéknél, amely kompenzálni tudja a szerszám-munkadarab természetes termoelem által keltett feszültséget, minimalizálva ezzel az így keletkező, hőmérsékletet növelő elektromos áramot.

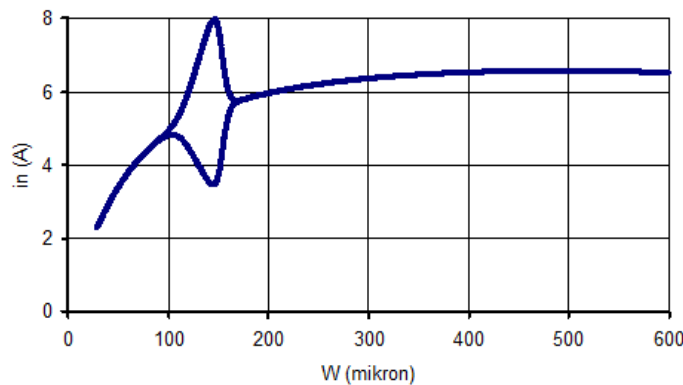
Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

### 6.3. Modellszámítások anomáliái folyamatos forgácsleválasztásnál.

Normál esetben is, amikor külső feszültségforrás nincs, tehát  $E_m=0$ , ha a szerszámgép  $R_m$  ellenállása egy kritikus érték alá csökken, a modell elkezd egészen sajátosan viselkedni. Az  $i_n$  áramerősség kopás-függvénye (itt az  $n$  index a normál helyzetre utal) a 28/a. ábrán látható jellegzetes karakterisztikáját elveszti, és alig valamivel kisebb  $R_m$  értéknél a 28/b. ábra rajzolódik ki. A  $W=VB \approx 100-170 \mu\text{m}$  tartományban a görbe alternál, az ábra a váltakozó csúcspontokból kirajzolódó görbét mutatja.



28/a. ábra. Az áramerősség növekedése a  $W=VB$  függvényében ( $R_m=1.165\text{m}\Omega$ ,  $v=200\text{m}/\text{min}$ )

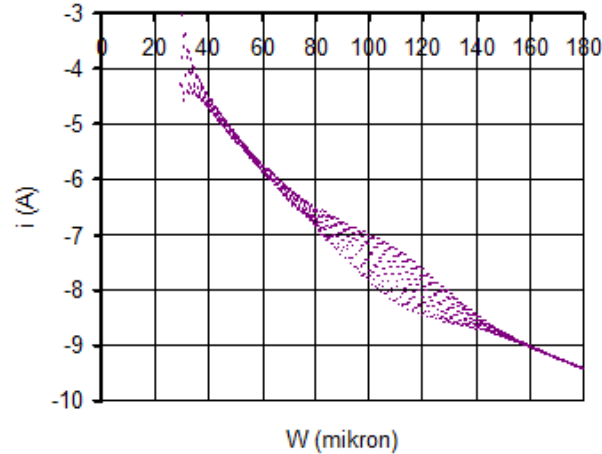


28/b. ábra. Az áramerősség növekedése a  $W=VB$  függvényében  
( $R_m=1.15791\text{m}\Omega$ ,  $v=200\text{m}/\text{min}$ )

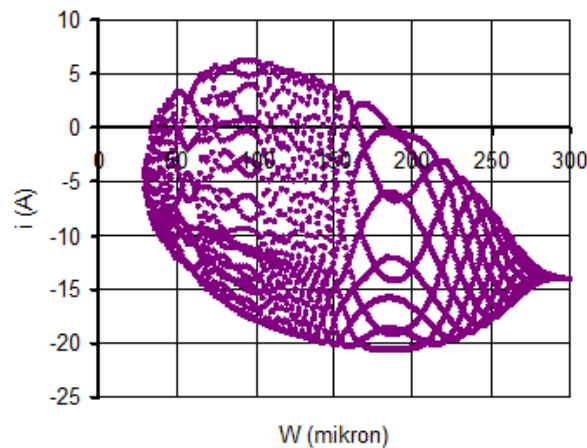
A  $v=200\text{m}/\text{min}$  sebességnél az  $E_m \neq 0$  eseteket növekvő külső feszültségnél vizsgálva – egyéb paraméterek változatlan tartása mellett ( $R_m=1.4\text{ m}\Omega$ ,  $R_t=0.6\text{m}\Omega$ ) – a számítás egy ponton instabilitást kezd mutatni.  $E_m=28.5\text{mV}$ -nál már vizuálisan is érzékelhetővé válik ez, amint a 29. ábra mutatja. Ez a rajzolat valójában hullámvonalak maximum pontjai, amelyek nem mindig a numerikus módszernél alkalmazott  $\Delta W$  lépéstávolságban követik egymást, amelyet a Seebeck-effektus figyelembevételénél alkalmaztunk. Ennek szemléltetésére szolgál a 31. ábra, amely a 30. ábra egy metszetét szemlélteti.



Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97



29. ábra. A számított áramerősség instabilitása  $E_m=28.5\text{mV}$ -nál ( $\Delta W=0,02\mu\text{m}$ ).



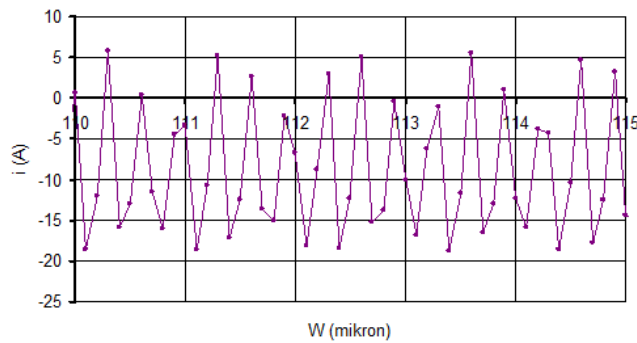
30. ábra. A számított áramerősség instabilitása  $E_m=30\text{mV}$ -nál ( $\Delta W=0,01\mu\text{m}$ ).

Az  $E_m=30\text{mV}$  külső feszültség esetében részletes vizsgálatra került sor különböző, a számításnál alkalmazott  $\square W$  lépéstávolság alkalmazásával. A számítások  $W=70$ ,  $110$  és  $150\mu\text{m}$ -nél történtek, és az alkalmazott lépéstávolság a  $\Delta W=0,005$ - $0,1\mu\text{m}$  tartományra terjedt ki. Az volt megállapítható, hogy a 20-20 hullámra számított átlagos periódus hosszúság az egész vizsgált értéktartományban egyöntetűen 3,133-3,4-szerese volt a  $\Delta W$  lépéstávolságnak.  $\Delta W=0,1$ -nél ez a szorzó 3,2-3,33 értéktartományra adódott.

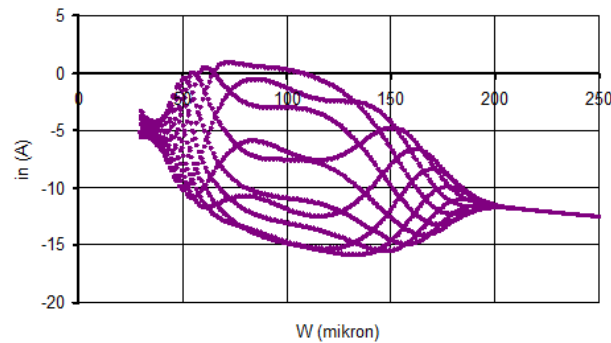
Az  $E_m$  negatív tartományában sokkal gyorsabban megmutatkozik az anomália. Már  $E_m=-3,6999\text{mV}$ -nál olyan az áramerősség jelleggörbéje, mint a 28. ábrán.

$v=250\text{m/min}$  sebesség esetén, amelynél a forgácsolási hőmérséklet természetesen eleve nagyobb, ekkora külső  $E_m$  feszültség esetén egy másik jellegzetes rajzolat adódik, amint a 32. ábra mutatja. Itt nem kaotikus, hanem többciklusú megoldás alakul ki. Az ábra görbéi itt is a hullámok csúcspontjait mutatják.

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97



31. ábra. A 30. ábra időtengelyének egy kinagyított szakasza.



32. ábra.  $v=250\text{m/min}$  sebességnél számított áramerősség ingadozása  $E_m=30\text{mV}$ -nál ( $\Delta W=0,01\mu\text{m}$ ).

Ezeknek a diagramoknak a láttán természetesen rögtön felvetődik a kérdés, hogy magát a forgácsolási folyamatnak az extrém viselkedését mutatják-e, vagy csak annak matematikai modellje viselkedik az ábrákon látható kaotikus módon. Kétségtelen tény, hogy amikor a számított áramerősség, és ebből következően a hőmérséklet és természetesen a kopási sebesség ciklikusan ingadozik, akkor ennek ciklusideje többnyire szoros kapcsolatban van a numerikus megoldásnál alkalmazott lépéstávolsággal.

Nyilvánvaló tehát, hogy itt a modell számítási módszere is előidézheti az áramerősség ilyen anomáliáját, amely azonban a jelek szerint nem mindig függ a  $\Delta W$  lépéstávolságtól, és alig függ az  $E_m$  külső feszültségtől. A döntő érvet természetesen egy további forgácsolási vizsgálta szolgáltatathatná.

## 7. Szakaszos forgácsleválasztás

### 7.1 Marási kísérletek

A kísérletek során két különböző acéladagból származó anyag forgácsolására került sor. Az egyik normál C45, a másik speciálisan dezoxidált C45 JF minőségű volt, amelyek kémiai összetételét a kontroll-elemzés szerint a 9. táblázat tartalmazza. Mint látható, a C-tartalom

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

mindkét anyagnál a minőségi előírás felső határára esik, amely megmagyarázza a szövetszerkezetben a perlit túlsúlyát (33. ábra).

9. táblázat

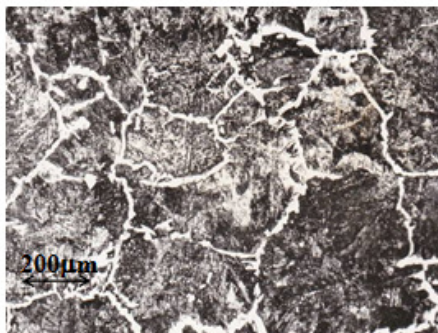
A marási kísérletek munkadarabjainak kémiai összetétele.

Minőség	C	Mn	Si	P	S
C45	0,54	0,59	0,23	0,024	0,027
C45 JF	0,53	0,63	0,31	0,017	0,078

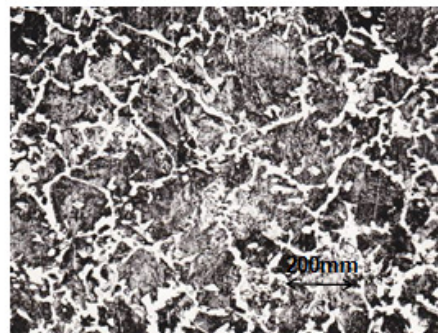
10. táblázat

A marási kísérletek munkadarabjainak keménysége (HV10)

Minőség	Hosszirányban		Keresztirányban	
	C45	203	203	236
C45 JF	196	199	209	199



a)

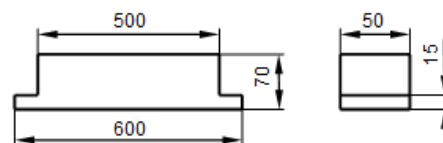


b)

33. ábra. A marási kísérleteknél forgácsolt munkadarabok anyaga.

a) C45 durva szemcsés ferrithálós perlit, b) C45 JF ferrithálós perlit.

A forgácsolási kísérletek során alkalmazott munkadarab rajza a 34. ábrán látható. A méréseknél felhasznált szerszám gép egy UF221 típusú vízszintes tengelyű marógép volt, amelyre függőleges tengelyű fej lett felszerelve. A szerszám homlokmaró, amelybe egy lapka volt behelyezve ( $\gamma_0=6^\circ$ ,  $\kappa=70^\circ$ ,  $\epsilon_r=90^\circ$ , P35 keménység). A technológia: előtolás.  $f=0,105\text{mm}/\text{él}$ , fogásmélység  $a=2,5\text{mm}$ , hűtés nélkül, a forgácsolósebesség: 236, 298 és 371 m/min. A legtöbb vizsgálat  $v=298\text{m}/\text{min}$  sebességgel történt, amelynél a maró egy fordulata alatt a szerszám  $t_0=10,057\mu\text{s}$  ideig forgácsolt.



34. ábra. A marási kísérletek munkadarabja.

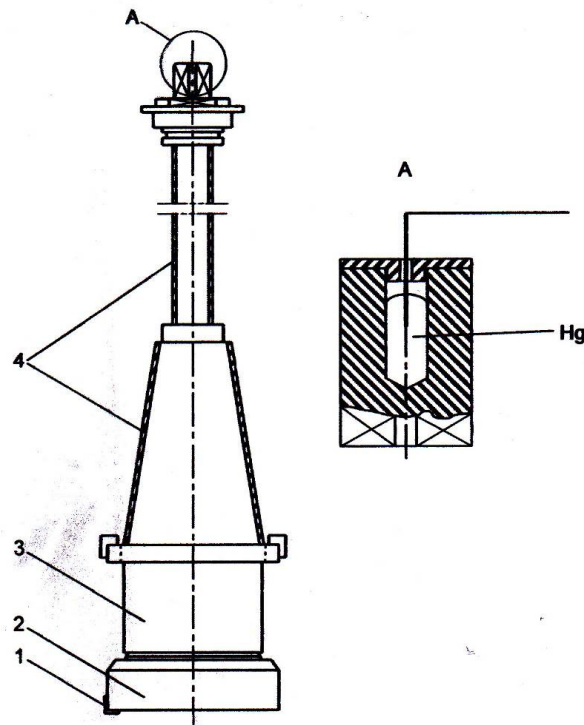
Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

A különböző külső feszültség hatásának vizsgálatánál a forgácsolás időtartama az előkísérletek alapján 5 réteg  $L=500\text{mm}$  végigforgácsolásával  $4,15\text{min}$  tiszta forgácsolás volt, és ez  $N=23728$  forgácsolási ciklust jelentett.

A maró tengelye a 35. ábrán látható módon izolálva volt a gép többi részétől. Az elektromos kivezetés a főorsó felső végében kialakított Hg fürdő segítségével történt, amelybe a csatlakozó elektromos vezeték a forgás közben belemerült, és így lehetett a szerszámra akkumulátorból ( $12\text{V}$ ) különböző nagyságú külső feszültséget is kapcsolni (36. ábra). A csatlakozó alkatrészek átmeneti elektromos ellenállásának kiküszöbölését a képen szintén bejelölt felforrasztott rézsodratú vezeték biztosította, amely a forgácsoló lapkát közvetlenül a főorsóval kötötte össze. A vizsgálatokat szakaszosan, a rendszer „pihentetésével” végeztük, hogy a csatlakozó pontok hőmérsékletének megemelkedése ne torzítsa az eredményeket.

A mérések elektromos kapcsolási vázlata a 37. ábrán látható, amelyen a R1 és R2 ellenállások az áramerősség szabályozását, a K kapcsoló pedig az áram irányának beállítását tették lehetővé.

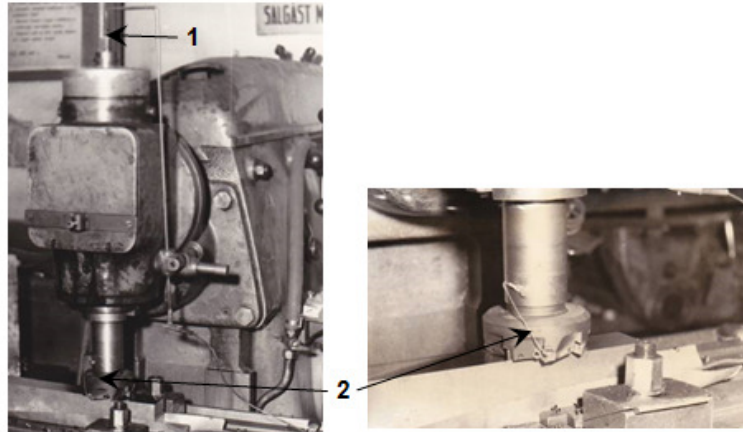
A forgácstón így átvezetett külső áram a termofeszültség által gerjesztett áramra szuperponálódott, és az irányától függően összeadódott vele, vagy kompenzálta azt. A forgácsolási kísérletek eredményeit a 38. ábra mutatja. Amint látható, a forgácsleválasztás érintkező felületein átvezetett áram a szerszámkopást jelentősen befolyásolta, és a két méréssorozatnál közel azonos külső áramnál van a szerszámkopás alapján megállapított optimum.



35. ábra. A kísérletekhez átalakított marógép főtengelyének szigetelése.  
 (1: forgácsolólapka, 2:marófej, 3: közbetét hüvely, 4: szigetelő réteg)

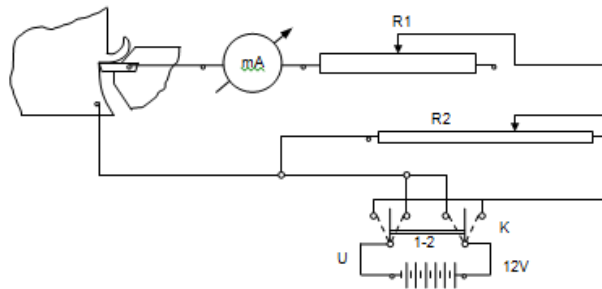


Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

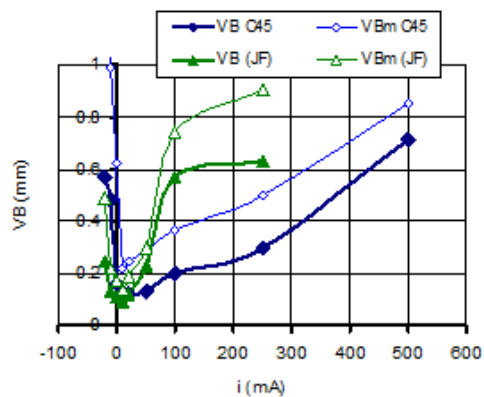


36. ábra. Elektromos csatlakozások a marási kísérletnél.

1: a Hg fürdőbe merülő vezeték, 2: a marólapka összekötése az orsótesttel.



37. ábra. A forgácsolón kívüli forrásból átvett elektromos áram kapcsolási vázlata.



38. ábra. A szerszámkopás különböző nagyságú külső áramerősségnél ( $t=4.15\text{min}$ ).

## 7.2. Modellszámítások szakaszos forgácsleválasztásnál

A számítások az 5. fejezetben összefoglalt kvalitatív elektrotermikus modell felhasználásával történtek. A 8. táblázat adatainak meghatározásánál követett módszert itt is alkalmazva, a

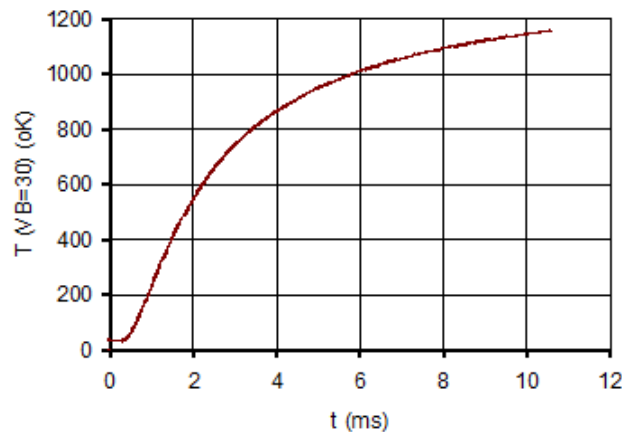
Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

szakirodalmi és a saját kopásmérési adatokat is felhasználva történt a kvalitatív modellszámításhoz szükséges konstansok meghatározása. Ezeket a 11. táblázat foglalja össze.

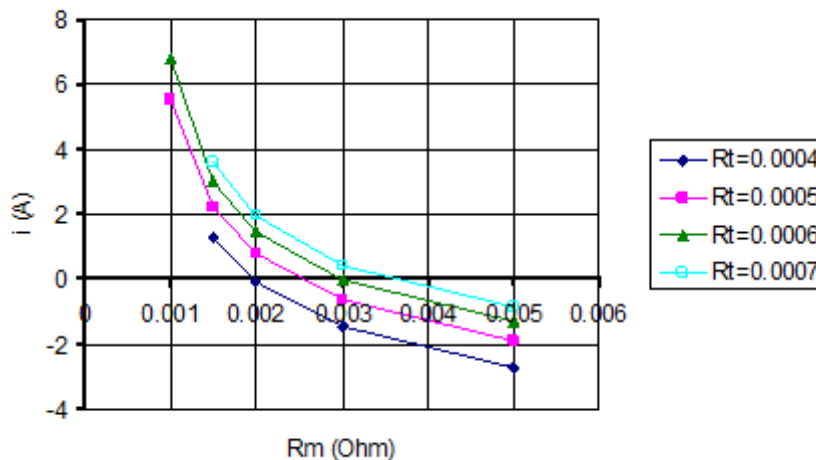
11. táblázat  
A termoelektromos kopásmodell konstansai.

$c_f$	$c_{f1} (\mu\text{m}^{-1})$	$c_{\square} (^{\circ}\text{C}/\text{mV})$	$c_w (^{\circ}\text{C}/\mu\text{m})$	$c_R (\mu\Omega \cdot \mu\text{m})$	$c_i (^{\circ}\text{C} \cdot \Omega/\text{A}^2)$	$R_t (\text{m}\Omega)$
0.17	0.001	0.011	1.2	0.03	0.04	0.6

A szakaszos forgácsleválasztás lényeges sajátossága a hőmérsékletnek az a dinamikus változása, amelyet a (2) összefüggés ír le, és a kísérletek konkrét esetében a 39. ábra szemléltet. Minthogy pedig a termoáram függ a hőmérséklettől, az is hasonlóan változik. A 40. ábra értékelésénél ezért fontos arra tekintettel lenni, hogy az ott feltüntetett értékek a forgácsolási ciklus végére vonatkoznak.



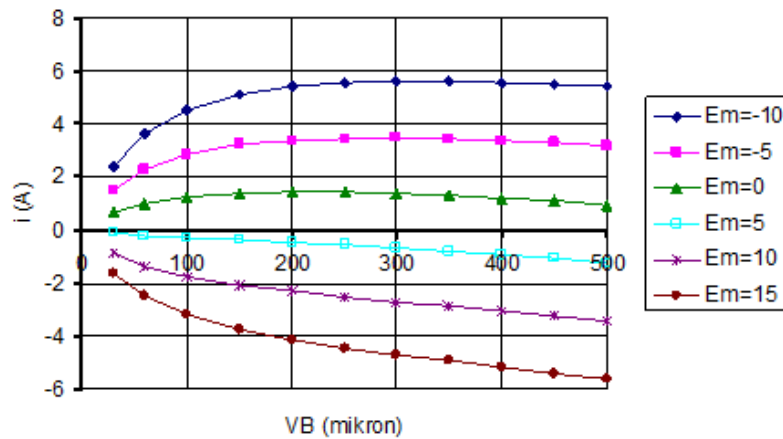
39. ábra. A forgácsolási hőmérséklet felfutása egy marási ciklus közben.



40. ábra. Az  $i$  áramerősség az  $E_m=0$  külső feszültségnél  $VB=200\mu\text{m}$  kopásnál az  $R_m$  és  $R_t$  ellenállások függvényében.

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word) 1 (2015) 58-97*

Ez az ábra azt szemlélteti, hogy a külső feszültség nélkül, tehát a forgácsolás szokványos esetében milyen összefüggés van a szerszámgép  $R_m$  ellenállása, a szerszámon jelentkező  $R_t$  ellenállás és a termoáram között. A további számításokhoz a választás az  $R_m=2m\Omega$  és  $R_t=0.6m\Omega$  értékre esett. Így a külső  $E_m$  feszültség függvényében a 41. ábrán látható áram-görbék adódnak. Érdekes megfigyelni, hogy az  $E_m$  0 és 5 mV közötti értékénél az áram a szerszám kopása közben minden bizonnyal előjelet, azaz irányt vált.



41. ábra. Az  $i$  áramerősség az  $E_m$  (mV) külső feszültség és a  $VB$  ( $\mu m$ ) kopás függvényében. ( $R_m=2m\Omega$ ,  $R_t=0.6m\Omega$ )

Homlokmarásnál a szerszám fordulatonként végigforgácsolja azt a megközelítően kör alakú ívet, amelyet a munkadarab  $B$  szélessége és a maró  $D$  átmérője határoz meg. A kopás a (14) egyenlettel számítható, amelynél figyelembe kell venni, hogy itt a  $\theta$  hőmérséklet az időnek is függvénye, a (2) képlet szerint. Azt a körülményt felhasználva, hogy egy-egy forgácsolási ciklus közel három nagyságrenddel rövidebb a szerszám várható élettartamánál, a számítás egyszerűsíthető. Különböző,  $W=30, 60, 100\dots\mu m$  konstansnak tekintett állapotban a (14) egyenlettel kiszámítható egy forgácsolási ciklusnál a  $dW$  kopás. A különböző konstans  $W$  értékeknél az egy forgácsolási ciklusra kapott  $dW$  kopás növekményből előállítható egy empirikus  $dW=dW(W)$  függvény, amelynek segítségével aztán a marás folyamán növekvő kopást is figyelembe véve kiszámítható a tényleges kopásgörbe.

Az  $i$ -edik ciklusnál az éppen aktuális forgácsolási idő a  $v=298m/min$  sebességű marásnál

$$t(\min) = it_{f0} = 0,0157 \frac{i}{60} \quad (15)$$

a kopás pedig

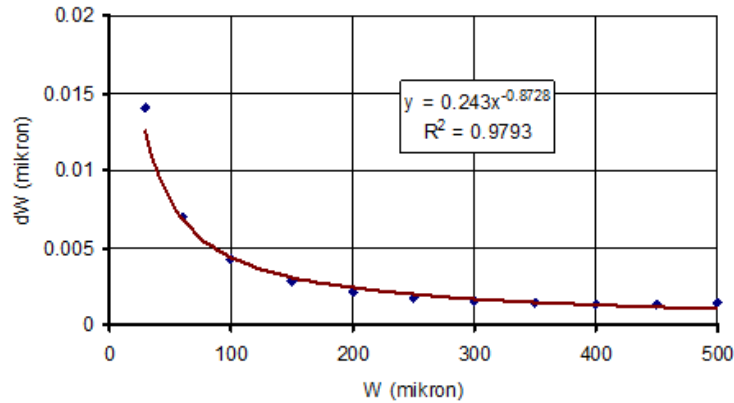
$$W_i = dW(W) + W_{i-1} \quad (16)$$

Célszerűnek mutatkozott a  $dW(W)$  függvény előállításához az egyszerű

$$dW = AW^B \quad (17)$$

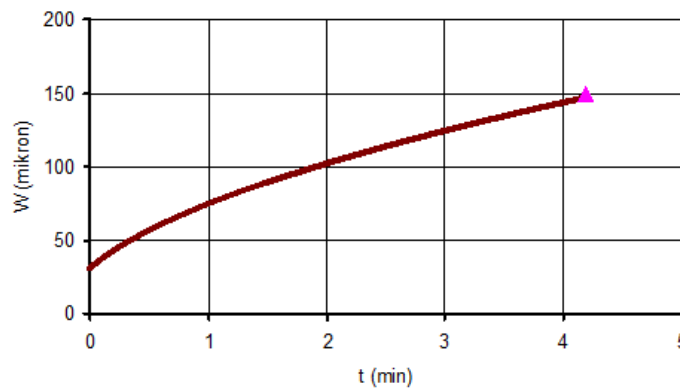
Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

hatványfüggvényt választani, ahol A és B az egyes  $W_j$ =konstans értékekre kiszámított  $dW_j$  kopásokból határozható meg. Példaként a 42. ábra azt mutatja, hogyan illeszkedik az ilyen módon meghatározott  $dW(W)$  görbe a diszkrét  $W_j$  kopási szinteknél kiszámított  $dW_j$  eredményekre. Az  $R^2=0,9773$  Pearson-szám egészen jónak ítéhető.



42. ábra. A  $dW(W)$  kopásnövekmény egy forgácsolási ciklusnál.  
 ( $E_m=0$ ,  $A_a=8 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}$ ,  $A_{th}=200 \mu\text{m}$ ,  $Q=152 \text{kJ/mol}$ ,  $\tau=1,95 \text{ms}$ )

A (17) függvény birtokában már használható a szerszámkopás (14) differenciálegyenlete, amely megoldása olyan módon történt, hogy az illeszkedjen a ténylegesen mért kopási értékre. A  $v=298 \text{m/min}$  sebességnél mért kopást felhasználva (12. táblázat) a számított kopásgörbe a 43. ábrán látható.



43. ábra. A számított kopásgörbe illesztése a mérési eredményre.

$$(E_m=0 \text{mV}, R_m=0,002 \Omega, R_t=0,0006 \Omega)$$

Két másik sebességnél is történt kopásvizsgálat, amelynek eredményét a 12 táblázat szintén tartalmazza.. A számításnál a  $v$  sebesség hatását két helyen kell érvényesíteni, a (14) kopásegyenletben, és a (3) képletben a  $C_v$  konstansnál. Ez utóbbi a (2) képletben az  $x$  exponens segítségével tehető meg, amely az empirikus  $x=0,27$  alkalmazását jelenti [36].



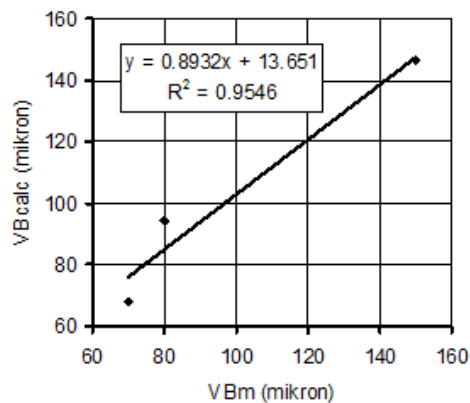
Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

A három sebességnél kiszámított, és a méréssel összehasonlított eredményeket a 44. ábra mutatja. A kapcsolat nem szoros, de ez a forgácsolási vizsgálatok eredményeinél megszokott nagy szórást ismerve – a kevés adat birtokában – nem is meglepő.

12. táblázat

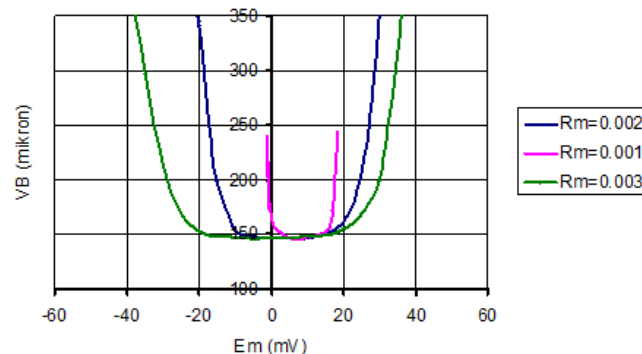
A szerszámkopás különböző forgácsolási sebességnél mért értékei ( $E_m=0$ )

v (m/min)	236	298	371
tc (min)	2,135	4,17	0,67
VB <sub>m</sub> (μm)	80	150	70
VB <sub>kalc</sub> (μm)	94,1	146,5	94,1



44. ábra. A mért és számított szerszámkopás összehasonlítása.

A 38. ábrán összefoglalt mérési eredmények felhasználásával ellenőrizhető az elektrotermikus viszonyok számítási eljárása. Az  $E_m$  külső feszültségforrás hatásának számításával nyert 45. ábra azt mutatja, hogy a kvalitatív módszer valóban alkalmas a tényleges folyamatok jellegének tanulmányozására.



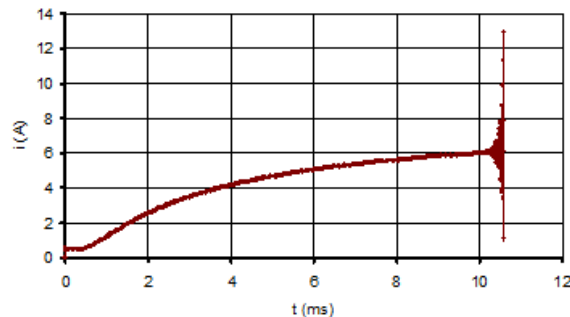
45. ábra. A szerszámkopás különböző külső  $E_m$  feszültség esetén ( $t=4.15$ min)

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

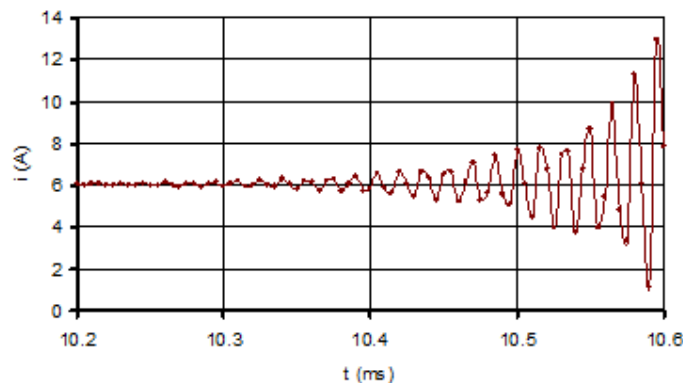
### 7.3. Modellszámítások anomáliái szakaszos forgácsleválasztásnál.

A maró egy-egy fordulata alatt a forgácsolás folyamatát vizsgálva a számítások a kialakuló elektromos áram érdekes anomáliáit is feltárták, amelyek aztán nyilvánvalóan megjelennek a forgácsolási hőmérsékletben, következésképpen a szerszám kopásánál is. Ennek szemléltetésére szolgál  $W=VB=100\mu\text{m}$  kopottsági állapotnál és  $R_t=0.6\mu\Omega$  feltételezésével és a 11. táblázatban összefoglalt konstansokkal végzett néhány számítás eredménye, amelyek az  $R_m$  gépi ellenállás és az  $E_m$  külső feszültség vizsgálatára korlátozódnak.

Már  $E_m=0$ , azaz külső feszültségforrás nélkül, normál forgácsolási esetben is előállhat olyan sajátos eredmény, amely – legalább is a számítások szerint – az áramköri rendszer instabilitására utal. Amint a 46. ábrán látható, a forgácsolási ciklus végén az áramerősség ingadozni kezd, amelyet a 47. ábra kinagyított idő-skálán mutat. Itt az a fontos tény állapítható meg, hogy az áram ingadozásának lengésideje nem egyezik meg a számításnál alkalmazott időlépéssel. Az előbbi  $0.017\text{ms}$ , az utóbbi  $0.005\text{ms}$ , a viszonyuk  $3.2$ . Ez azért lényeges, mert már itt rá kell mutatni arra a lehetőségre, hogy esetleg a következőkben látható anomáliák nem magának a forgácsleválasztási folyamatnak a sajátosságai, hanem a matematikai modelltől erednek. Tény, hogy a 47. ábrán látható áramingadozást a mérések során nem sikerült érzékelni, amely arra is visszavezethető, hogy itt a gépi ellenállás alacsony értéke van feltételezve.



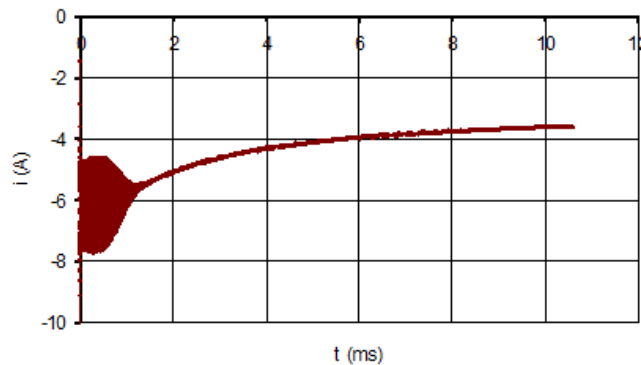
46. ábra. Az áramerősség változása egy forgácsolási ív mentén.  
( $VB=100\text{mm}$ ,  $R_m=0,956\text{m}\Omega$ )



47. ábra. Az áramerősség változása egy forgácsolási ív mentén. ( $VB=100\text{mm}$ ,  $R_m=0,956\text{m}\Omega$ )

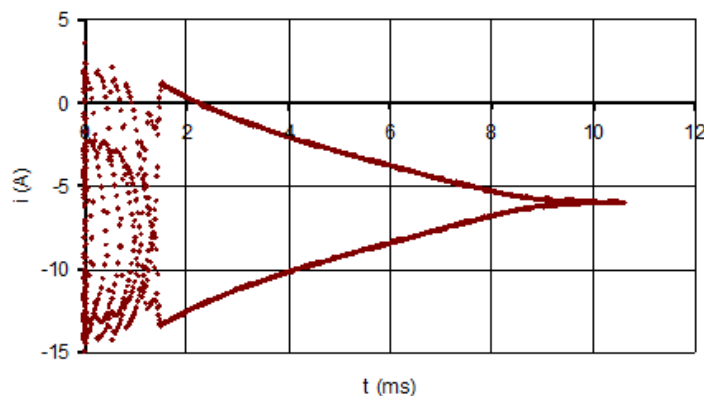
Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

Abban az esetben, ha a külső feszültségforrás  $E_m \neq 0$ , a 47. ábrán látható jelenséghez hasonló tapasztalható. Az  $E_m$  értékét negatív irányban növelve aztán az instabilitás növekszik, és a forgácsolási ív mentén egyre hamarabb következik be. A külső  $E_m$  feszültséget pozitív irányban változtatva az áram iránya is ellenkezőre vált, érdekes módon ez  $E_m=6\text{mV}$ -nál a forgácsolási ív közben következik be. Aztán az áram a forgácsolás kezdeti szakaszán kezd alternálni, amint a 48. ábrán látszik.



48. ábra. Az áramerősség alternálása a forgácsolási ív kezdeti szakaszán.  
( $E_m=15\text{mV}$ ,  $R_m=1\text{m}\Omega$ )

Ennek a jelenségnek fontos jellemzője, hogy az áramingadozás periódusideje megegyezik a számításnál alkalmazott időlépéssel. Viszont az  $E_m$  külső feszültség növelésével a 49. ábrán látható újabb jelenség tapasztalható. Az ábra csak az áram számított ingadozásainak a csúcspontjait mutatja, hogy az eredmények jobban áttekinthetők legyenek. A diagram három világosan elkülönülő szakaszra oszlik. Először egy szabálytalan ingadozást látunk, aztán egy lecsengő amplitúdójú szabályos ingadozás figyelhető meg, amely a forgácsolási ív végén egyetlen értékbe torkollik.

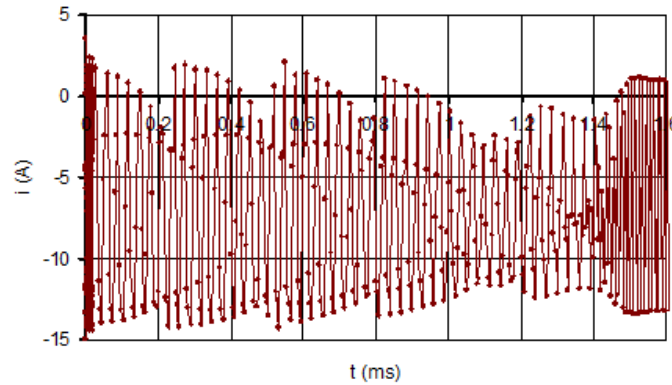


49. ábra. Az áramerősség több periódusú alternálása a forgácsolási ív mentén.  
( $E_m=21\text{mV}$ ,  $R_m=1\text{m}\Omega$ )

A forgácsolási ciklus kezdeti szakaszának sajátos jellege különösen jó látszik az 50. ábrán, amely a többciklusú kezdeti szakaszt, majd pedig a kezdetiből a lecsengő szakaszba átmenetet mutatja. Ez utóbbinál a lengések ciklusideje megegyezik a számításnál alkalmazott  $\Delta t=0.005$

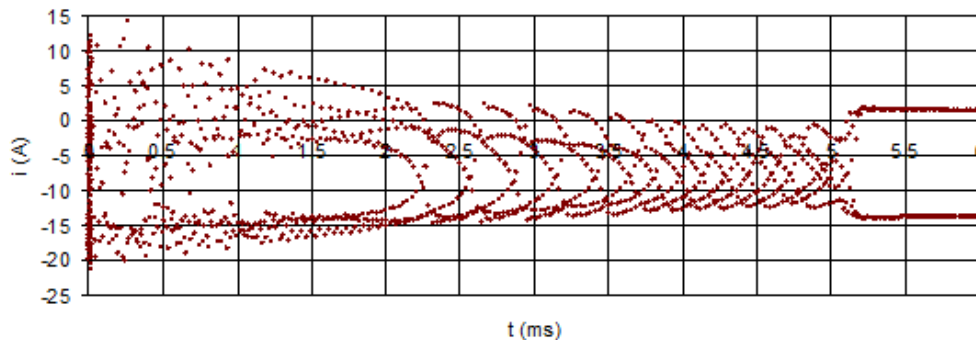
Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

időlépéssel, előtte viszont szembeötlő, hogy egy sajátos többciklusú, kaotikusnak tűnő ingadozás lép fel, az időlépés  $\approx 3.2$ -szeres periodicitással.

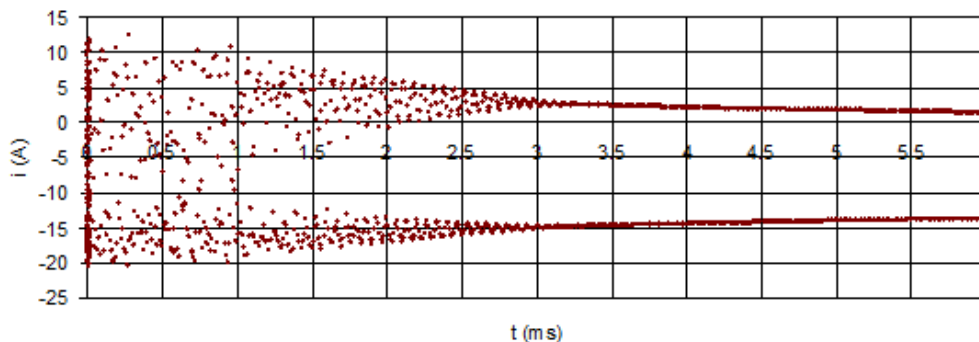


50. ábra. Az áramerősség több periódusú alternálása a forgácsolási ív kezdetén.  
( $E_m=25\text{mV}$ ,  $R_m=1\text{m}\Omega$ )

A külső  $E_m$  feszültség további növelése hirtelen nagy változásokat okoz. Az  $E_m=25,015\text{mV}$  külső feszültségnél, amelyet az 51/a) ábra mutat, még az 50. ábrán bemutatott áram-függvényt láthatjuk. Alig valamivel nagyobb,  $E_m=25,016\text{mV}$ -nál viszont már az 51/b) diagram adódik, amelynél a kaotikus kezdeti szakasz után közvetlenül egy szabályos ciklikus áram-függvény alakul ki.

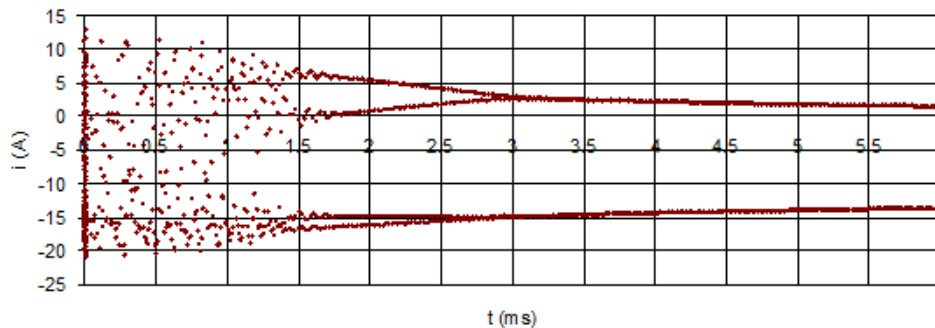


51/a) ábra.  $E_m=25.015\text{mV}$



51/b) ábra.  $E_m=25.016\text{mV}$

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97



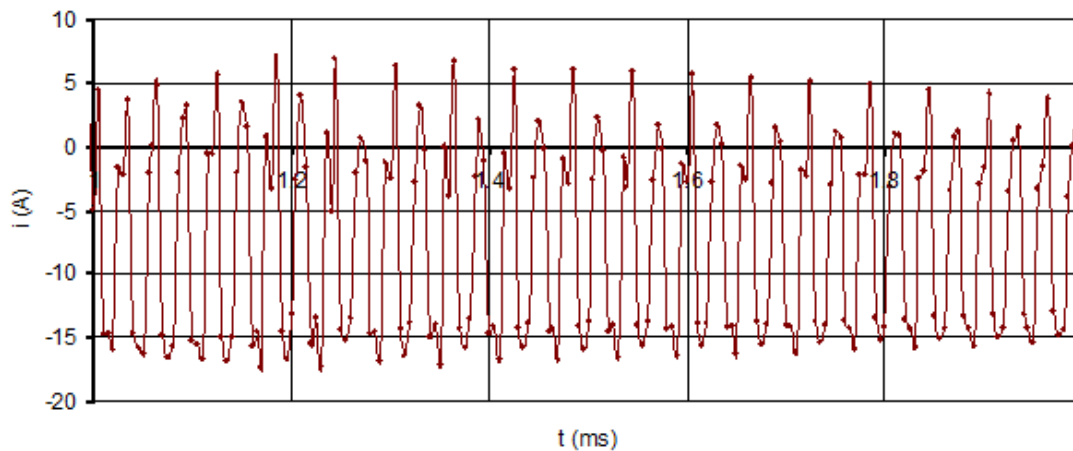
c)  $E_m=25.025\text{mV}$

51. ábra. A számított  $i$  áramerősség jellegzetes függvényei  $E_m=25.015\text{-}25.025$  intervallumban ( $R_m=1\text{m}\Omega$ )

Hangsúlyozni kell, hogy ezeknél a diagramoknál csak a hullámok csúcspontjai láthatók, hogy a bonyolult időbeli struktúra látható maradjon. Végül az 51/c) diagramon már az  $E_m=25,025\text{mV}$ -hoz tartozó idő-függvény látható, amelynek jellege az előzőektől lényegesen eltér. A középső szakaszban a kétszer két, összetartó ág egy lecsengő 2-ciklusos áramingadozást jelez, amely  $t\approx 3.4$ -től egy-ciklusúvá válik.

A szabályos ciklikus áram-lengések periódus-ideje összhangban van a számítás idő-lépésével, azonban a szabálytalan szakaszoknál ez nem mutatható ki. Amint az 52. ábrán látszik, amely az 51/b) diagramjának kinagyítása a szabálytalan áram-ingadozás idő-tartományában, az eredmények hullámmása elszakad a számítás lépéstávolságától.

Nyitva maradt tehát az a kérdés, hogy a tapasztalt anomáliák teljesen az elektrotermikus folyamat modelljének számítási módszeréből erednek, vagy bizonyos technikai feltételek mellett a technológiai folyamat sajátos jellegzetességeit jelzik.



52. ábra. A számított  $i$  áramerősség jellegzetes függvénye a  $t=1\text{-}2\text{ms}$  intervallumban ( $E_m=25.015\text{mV}$ ,  $R_m=1\text{m}\Omega$ )



Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

## 8. Összefoglalás

Forgácsolásnál, akár folyamatos az anyagleválasztás, mint az eszterálásnál, vagy szakaszos, mint a homlokmarásnál, a munkadarab-szerszám-forgács-gép rendszerben a Seebeck-effektus hatására termoelektromos áramok keletkeznek, amelyek amper nagyságrendűek is lehetnek. Ekkora áram hőhatása jelentősen befolyásolhatja a forgácstő hőmérsékletét. Mérése u.n. természetes termoelemmel történt, amelynél a termopárként a C60 minőségű acél munkadarab és a P35 keményfém szerszám volt, a hitelsítéskor hevített Sn fürdőbe merítve.

Az érintkező munkadarab-szerszám-felületen áthaladó hőmérséklet meghatározására kvalitatív matematikai modell készült, amelyben a kopás autonóm nemlineáris differenciálegyenlettel van leírva, és lehetővé vált külső feszültségforrásból bevezetett áram hatásának tanulmányozása is. A matematikai modell megoldása numerikus módszerrel történt, a kopás differenciálegyenletének inverzét alkalmazva. A számítással meghatározott kopásgörbék jól illeszkedtek a mérési eredményekre. A C45 minőségű acél munkadaraboknál P20 keményfémmeel végzett esztergálással és P35 keményfémmeel végrehajtott marási kísérletekkel az volt megállapítható, hogy a természetes termoelemként működő szerszám kopása szempontjából optimális az, ha külső áramforrás ezt kompenzálja. A számítások eredményei abban foglalhatók össze, hogy

- jelentős áramok keringhetnek a forgácstőben
- ezek az áramok függenek a szerszám kopásától, és ez a függőség kölcsönös,
- a szerszámkopás szempontjából a kvalitatív modell felhasználásával végzett számítás szerint is az az optimális, ha a külső áramforrás a termikus áramot kompenzálja,
- a matematikai modell szerint a rendszer több állapotban is kaotikusan viselkedik.

A rendelkezésre álló adatok alapján nem dönthető el teljes biztonsággal, hogy ez a jelenség a matematikai modell „saját terméke”, vagy a forgácstőben végbemenő elektrotermikus folyamatok specifikus sajátossága. Tény, hogy a szabályos alternálás esetén a hullám ciklusideje megegyezik a számításhoz alkalmazott időlépéssel, viszont kaotikusnak mutatózó állapotban ez már nem így van. Másrészt az is megfontolandó, hogy a modell elkészítése a forgácstőben kialakuló valóságos hőmérsékleti viszonyok figyelembevételével történt. A nyitott kérdések eldöntéséhez további kutatások szükségesek.

## Köszönetnyilvánítás

A matematikai modell kidolgozására irányuló kutató munka a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Innovációs Gépészeti Tervezés és Technológiák Kiválósági Központ keretében, és az OTKA K 84177 jelű projekt részeként valósult meg.

## Irodalom

- [1] Pálmai Z., Egy lokális deformációval megvalósuló fémtechnológia matematikai modellezése. *Anyagok Világa (Materials World)* 2. (2013) 1-33.
- [2] Pálmai Z., A forgácsolószerszámok kopásának matematikai modellezése felületi degradációjuk vizsgálata alapján. *Anyagok Világa (Materials World)* 1 (2014) 8-50.
- [3] Uehara, K., M. Sakurai, T. Ikeda, On the Problem of Thermoelectric Current in Metal Cutting, *Annals of the CIRP* Vol. 41/1/1992. pp. 75-78.
- [4] Gottwein, K., Temperature of the cutting edge in turning as dependent on the form of chip cross-section. *Maschinenbau* 5(1926) 187.

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

- [5] Solaja, V., H. Hughes, Some electrical phenomena in metal cutting. *Wear* Vol. 2.(1958/59) pp. 311-314.
- [6] Küsters, K.J.: *Temperaturen im Schneidkeil spanender Werkzeuge*, Dissertation 1956. Technische Hochschule, Aachen.
- [7] Lovack, H., *Temperaturen an Hartmetalldrehwerkzeugen bei der Stahlzerspanung*. Dissertation. Technische Hochschule, Aachen, 1967.
- [8] Lowack, H, *Temperaturen an Hartmetallwerkzeugen bei der Stahlzerspanung*. *Industrie Anzeiger* 90 (1968) Nr. 34. v. 26.4. pp.709.
- [9] Opitz, H., *About Wear on Cutting Tools*, Proc. Conf. Lubrication and Wear, Inst. Mech. Engrs., London, Oct., 1957, pp. 664.
- [10] Simpson, F.F., R.W. Russel, *Influence of magnetic field and passage of electrical currents on the deterioration of ball bearings*, Proc. Conf. Lubrication and Wear , Inst. Mech. Engrs., London, 1957. pp. 477.
- [11] Ellis, J., G. Barrow, *Tool Wear in Metal Cutting and its Relationship with the Thermo-Electric Circuit*, *Annals of the CIRP*, Vol. 17. (1969) pp. 39-50.
- [12] Dubrov, J.C., G.C. Nikolaeva, V.C. Filolenko, *K voprosu o fizicheskoi vliania termoelektricheskikh iavlenia na processa trenia i rezania metallov*. Izdatlestvo Nauka, 1973, Moskow.
- [13] Shan, H.S., P.C. Pandey, *Wear of cutting tools: thermo-electric effects*. *Wear*, 32 (1975) 167-179.
- [14] Shan, H.S., P.C. Pandey, *Oxidation and wear behaviour of carbide tools*. *Wear* 37 (1976) 69-75.
- [15] Bredell, L.J., *The Influence of Thermo Electric Current on the Wear of Tungsten Carbide Tools*. In *Science of Hard Materials*, Springer 1983. pp. 723-734.
- [16] Steward, H.A., S. Srinivasan, A.K. Stiffler, D.B. Miller, *Electrical discharge when machining medium-density fiberboard and tool wear*. *Tribology International* Vol. 27. (1994) No.5. 343-348.
- [17] Wistuba, W., *The effect of an external electric field on the operation of an aluminium-oxide–cast iron sliding contact joint*. *Wear* 208 (1997) 113-117.
- [18] Wistuba, W., *A phenomenon of triboelectrization in aluminium oxide–polytetrafluoroethylene sliding contact joint operating under reduced lubrication conditions*. *Wear* 208 (1997) 118-124.
- [19] Gangopadhyay, A., G. Barber, H. Zhaob, *Tool wear reduction through an externally applied electric current*. *Wear* 260 (2006) 549-553.
- [20] Tanaka, R., L. Yougchuan, H. Akira, T. Ueda, *Influence of Additional Electric Current on Machinability of BN Free-Machining Steel in Turning*. *Journ. of Adv. Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, Vol. 3. Issue 2. pp. 171-178 (2009)
- [21] Pálmai, Z., *Formation of non-metallic protective layers on high-speed steel tools*. *Metal Technology* Vol. 11. (1984) 34-37.
- [22] Csobod L., *A forgácsolás hőjelenségeinek vizsgálata szakaszos forgácsleválasztásnál, a termoelektromos jelenség felhasználásával*. Disszertáció. Miskolci Egyetem, 1983.
- [23] Pálmai, Z., *Cutting temperature in intermittend cutting*. *Int. J.Mach. Tools Manufact.* Vol. 27. (1987) No. 2. pp. 261-274.
- [24] Kalászi, I., *A phenomenon leading to an error in measuring the cutting temperatures by the tool/work method*. *Int. J. Prod. Res* 4. (1966) 329-335.

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

- [25] Kaminise, A. K., G. Guimaraes & M. B. de Silva, Development of a tool–work thermocouple calibration system with physical compensation to study the influence of tool-holder. *Int J Adv Manuf Technol* 2014, DOI 10.1007/s00170-014-5898-0
- [26] Sun, Y., J. Sun, J. Li & Q. Xiong, An experimental investigation of the influence of cutting parameters on cutting temperature in milling Ti6Al4V by applying semi-artificial thermocouple. *Int J Adv Manuf Technol* (2014) 70:765–773
- [27] Lazoglu, I., C. Islam, Modeling of 3D temperature fields for oblique machining, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2012) 127–130
- [28] Colwell, L.V., Cutting Temperature Versus Tool Wear. *Annals of the C.I.R.P.* Vol. 24/1 (1975) 73-76.
- [29] Rubenstein, C. An Analysis of Tool Life Based on Flank-Face Wear. *Journ. of Engineering for Industry* 1976. 221-232.
- [30] Kunderák, J., The scientific principles of increasing the effectiveness of inner surfaces cutting with CBN tools. Pp. 368. Harkov 1996.
- [31] Park, J-J., A G. Ulsoy, On-line Flank Wear Estimation Using an Adaptive Observer and Computer Vision, *Tans. of the ASME Journ. of Engineering for Industry* Vol. 115. (1993) 30-43.
- [32] Cook, N.H., Tool Wear and Tool Life. *Trans. of the ASME, Journ. of Engineering for Industry* Nov. 1973. 931-938.
- [33] Luo, X., K. Cheng, R. Holt, X. Liu, Modeling flank wear of carbide tool insert in metal cutting. *Wear*, 259 (2005) 1235-1240.
- [34] Barlier, C., C. Lescalier, A. Mosian, Continuous Flank Wear Measurement of Turning Tools by Integrated Microthermocouple. *Annals of the CIRP.* Vol. 46/1/1997. 35-38.
- [35] Kodácsy J. Nem publikált mérések Kecskeméti Főiskola 2010.
- [36] Pálmai, Z., Proposal for a new theoretical model of the cutting tool's flank wear. *Wear* 303 (2013) 437-445.

### Jelölések jegyzéke

Jel	Mértékegység	Megnevezés
$c_E$	$mV/^\circ C$	Termoelektromos konstans
$C_f$	1	A szerszám felületén a hőmérséklet differenciát kifejező konstans
$C_{f1}$	$1/\mu m$	A kopás hőmérséklet hatását kifejező konstans
$C_i$	$^\circ C \Omega / A^2$	Az elektromos teljesítmény hőekvivalencia konstansa
$C_R$	$\Omega \mu m$	Arányossági tényező $W$ és $R_f$ között
$C_w$	$^\circ C / \mu m$	A kopás hőmérséklet-növelő hatásának konstansa
$i_f$	A	A szerszám hátlapja és a munkadarab között átfolyó áram
$C_v$	$^\circ C$	A $\Theta = C_v \cdot v^x$ képlet konstans együtthatója
$x$	-	A $\Theta = C_v \cdot v^x$ képlet konstans exponense
$t$	s	Forgácsolási idő
$t_h$	s	Ciklikus forgácsolásnál (marásnál) a tényleges forgácsolási idő
$u$	mV	Elektromotoros erő

Pálmai Z., Csobod T., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2015) 58-97

$v$	m/min	Forgácsolósebesség
$A_a, A_{th}$	$\mu\text{m}$	Kopásegyenlet konstansai
$E$	mV	Termoelektromos potenciál
$\Delta E$	mV	Integrált termoelektromos potenciálkülönbség az érintkező szerszámfelület egésze és a hátfelület között
$R$	$\text{kJ}/^\circ\text{Kmol}$	Általános gázállandó
$R_f$	$\Omega$	Elektromos ellenállás a szerszám hátlapja és a mkdrb között
$R_m$	$\Omega$	A szerszámgépen átfolyó áramot terhelő ellenállás
$R_t$	$\Omega$	Elektromos ellenállás a szerszámban, a szerszám, a forgács valamint a munkadarab között
$Q$	$\text{kJ}/\text{mol}$	A kopás aktiválási energiája
$\Theta, T$	$^\circ\text{C}$	Forgácsolási hőmérséklet
$\Theta_m$	$^\circ\text{C}$	A szokványosan értelmezett forgácsolási hőmérséklet: $\Theta_m = C_v V^x$
$\Theta_f$	$^\circ\text{C}$	Hőmérséklet a szerszám hátlapján
$\Delta\Theta_f$	$^\circ\text{C}$	Különbség a forgácsolási és a hátlapi hőmérséklet között
$\Delta\Theta_i$	$^\circ\text{C}$	Hőmérséklet-növekmény az elektromos áram hatására
$\Delta\Theta_w$	$^\circ\text{C}$	Hőmérséklet-növekmény a kopás hatására
$\Delta W$	$\mu\text{m}$	Kopáslépés a numerikus megoldásnál
$W, VB$	$\mu\text{m}$	Hátkopás
$VB_{kr}$	$\mu\text{m}$	Éltartam-kritérium
$\tau$	s	A tranziens hőmérsékletváltozás időállandója