

ZÁRÓJELENTÉS

**Kemény felületek nagypontosságú forgácsolásának modellezése és
dinamikai vizsgálata
(K 84177)**

1. Bevezetés

A forgácsleválasztási eljárásokon belül kitüntetett kutatási területet képvisel a kemény anyagok megmunkálása. Ez a technológia a köszörülés gazdaságos alternatívájaként kínál nagypontosságú, gyors, befejező megmunkálási lehetőséget. Keménymegmunkálás alatt a jellemzően 45-68 HRC keménységű anyag szabályos élű szerszámmal történő forgácsolását értjük. Szerszámanyagként elsősorban PCBN, keményfém és kerámia jöhet szóba.

A kutatási projekt lényegében azzal a célkitűzéssel jött létre, hogy a keménysztergálás extrém forgácsleválasztási viszonyainak az irodalomból megismerhetőnél mélyebb feltárása, szimulálása alapján a keménysztergálás viszonyaira vonatkozóan a szerszámgeometria hatását és a szerszámdegradáció specifikus sajátosságait jobban megismerjük, a szerszámtartósság növeléséhez elméletileg megalapozott és kísérletekkel igazolt ismeretek birtokába jussunk.

A kutatás módszere a technológiai folyamat kísérletekkel ellenőrzött modellezése volt. A modellezésre két különböző szemléletű eljárást alkalmaztunk, a véges elemes numerikus módszert, amely részletekbe menő információkat képes szolgáltatni a folyamat egy-egy pillanatáról, és matematikai modellezést, amely viszont a folyamat dinamikáját képes bemutatni.

2. Szerszámgeometria hatásának elemzése

A keménysztergálásnál előszeretettel alkalmazott PCBN alapanyagú forgácsoló lapkák előnye a nagy keménység, a kitűnő kopásállóság, a jó hővezető képesség, valamint a szívósság. Mindezek mellett jelentős fejlesztési potenciál van a lapkageometriában is. Jelen kutatásunk célkitűzései között szerepelt a különböző szerszámgeometriák hatásának elemzése, valamint a forgácsleválasztás szempontjából előnyös geometriák meghatározása.

A nagy pontosságú keménysztergálásban a szerszám mikro geometriájának fontos szerepe van. A geometria, mindenekelőtt a csúcsgyűrű, a hát- és homlokfelület, valamint az élsugár befolyásolja a forgácsolási erőt, a forgácsolási hőmérsékletet és a felületintegritást is.

A legtöbb – keménysztergáláshoz használt – forgácsoló lapka esetében a forgácsleválasztás negatív homlokszög mellett történik. Ennek egyrészt a kis előtolás, másrészt a szerszám élközeli részének speciális, nagyobb stabilitást és ebből kifolyólag hosszabb élettartamot biztosító kialakítása az oka, de ez nagy passzív erőt is eredményez.

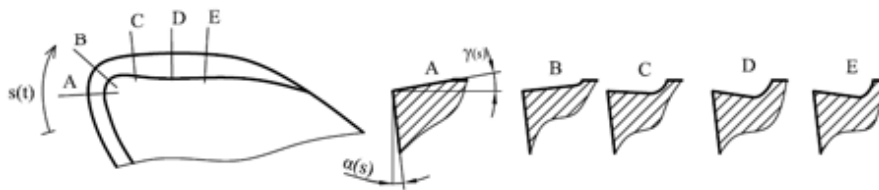
A forgácsoló geometria általában állandó homlokszögű az él mentén, azonban a szerszám terhelése pontról-pontra változik. A nagyobb homlokszög alkalmazásával a nagy terhelésű részekben a szerszám élének stabilitása lecsökken, a szerszám így könnyebben csorbulhat. A nagyobb terhelésű részeknél tehát kisebb, akár negatív homlokszög a kívánatos, míg a kisebb forgácsvastagságnál nagyobb pozitív homlokszög is alkalmazható lenne [1].

Az előbbieket figyelembe véve a passzív erő csökkenthető a kisebb terhelésű szakaszok homlokszögének növelésével.

Kísérleteink megerősítették, hogy a mikrométerű szikraforgácsolás hatékony eljárás keményfém, illetve PCBN forgácsoló lapkák élgeometriájának egyedi módosításához. A szikraforgácsolási technológia kidolgozását követően többféle geometriát alakítottunk ki SARIX SX-100 HPM típusú mikrométerű szikraforgácsoló berendezés segítségével váltólapkák homlokfelületébe.

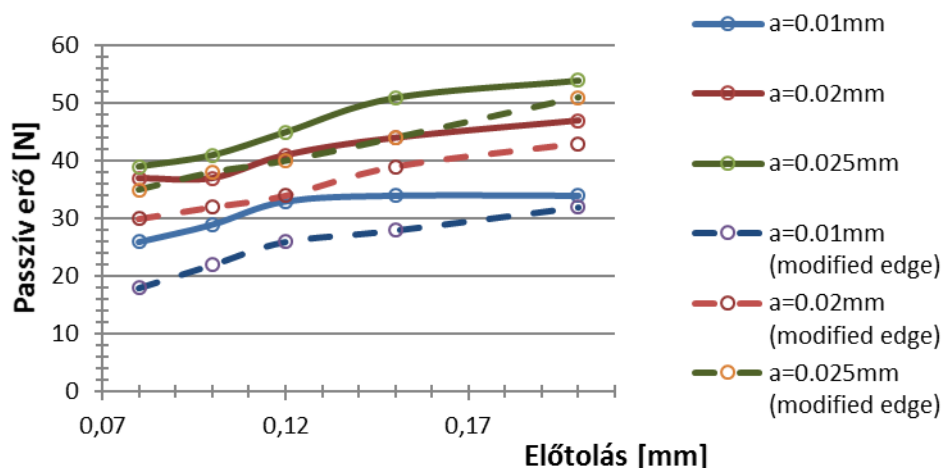
Keményfém szerszám csúcsközeli részének módosítását követően forgácsolási kísérleteket hajtottunk végre, valamint végeleemes szimulációt végeztünk Deform 3D szoftverrel [2,3]. Az elemzés során többek között megállapítottuk, hogy a $f_z=0,250$ mm-es előtolásnál a forgácsoló erőkomponens elméleti és gyakorlati értékei legfeljebb 10%-os eltérést mutatnak, $f_z=0,125$ mm-es előtolásnál viszont a számított értékek 50-80%-kal nagyobbak a mért értékeknél. A végeleemes szimulációk során vizsgáltuk a különböző anyagmodellek számításokra gyakorolt hatását is [2]. Ennek során arra arra a következtetésre jutottunk, hogy az Oxley egyenleten alapuló adatok szolgáltatják a mért értékektől való legkisebb eltérést (<10%).

Végeleemes szimulációkat végeztünk PCBN anyagú váltólapkák célszerű élgeometriai módosításának feltérképezéséhez. Ezek alapján az él mentén változó geometriákat alakítottunk ki mikrométerű szikraforgácsolással eredetileg -20° homlokszögű váltólapkákon (1. ábra).



1. ábra. Változó élgeometriájú PCBN szerszám

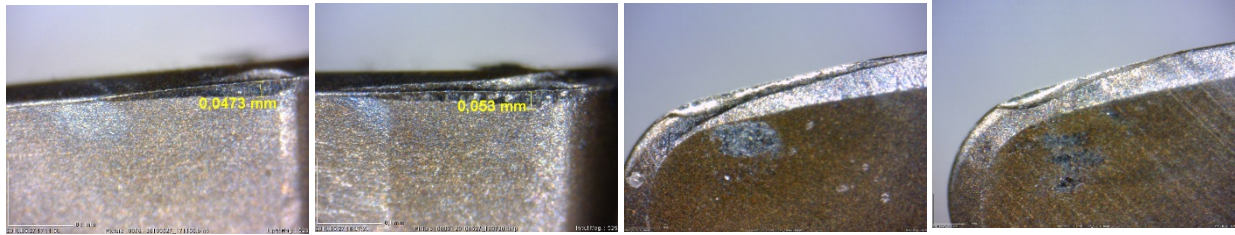
Az élmódosítás passzív erőre gyakorolt hatásának elemzéséhez szisztematikus kísérletsorozatot végeztünk 62 HRC keménységű hidegalakító szerszámacélon ($a_p=0,01$ mm, 0,02 mm és 0,025 mm-es fogásmélységek, valamint $f=0,08$ mm, 0,1 mm, 0,12 mm, 0,15 mm és 0,2 mm-es előtolások). Az erőmérések eredményei a 2. ábrán, a szerszámkopás pedig a 3. ábrán látható [1].



2. ábra. Passzív erő az forgácsolási paraméterek függvényében eredeti és módosított geometriájú váltólapkánál.

A numerikus analízis részeként DEFORM 2D szoftverrel elemeztük a forgácsoló szerszám élközeli kialakításának hatását a forgácsoló erőkomponensre, a hőmérsékletre, valamint a feszültségállapotra vonatkozóan, AISI H13as szerszámacél megmunkálásakor [4].

A kutatás során végeleemes szimulációt végeztünk a Third Wave Advant Edge™ szoftver



3. ábra. Szerszám kopása az eredeti (bal) és a módosított geometriája (jobb) váltólapkán.

segítségével is arra vonatkozólag, hogy a forgácsolószerszám élgeometriájának hátkopás nyomán (VB) történő megváltozása hogyan befolyásolja a forgácsolás során ébredő forgácsolási erő komponenseinek nagyságát, a forgácsolási hőmérsékletet, valamint a megmunkált felületi rétegben kialakuló maradó feszültségeket kemény felületek megmunkálásakor [5]. Az elméleti analízis során az adott élgeometriájú ($\gamma=-26^\circ$, $\alpha=6^\circ$), fazettás forgácsolószerszám, illetve adott technológiai paraméterek ($v_c=180$ m/perc, $a_p=0,2$ mm, $f=0,1$ mm/ford) mellett diszkrét értékű hátkopási esetek (VB=0...0,5 mm tartományban, 0,1 mm-es lépésközzel) hatását vizsgáltuk a fenti jellemzőkre. A munkadarab 60 ± 2 HRC keménységű, betétben edzett 16MnCr5 anyagminőségű acél, a szerszám anyaga pedig polikristályos kőbősbórnitrid (PCBN) volt. A hátfelületi kopás forgácsolási folyamatjellemzőkre gyakorolt hatásával kapcsolatban a következőket tapasztaltuk az elvégzett szimuláció alapján.

Kismértékű hátkopás esetén (VB=0,1...0,2 mm) a passzív (F_p) és az előtolás irányú (F_f) erőkomponens közepes mértékű növekedését észleltük (150%-os). A forgácsolási hőmérséklet kb. 35%-kal lett nagyobb, a maradó nyomófeszültségek maximális értékei viszont nem változtak jelentős mértékben (16%-os növekedés).

A hátkopás további növekedésénél a vizsgált jellemzők előbbinél intenzívebb mértékű emelkedését figyeltük meg. A legnagyobb vizsgált kopásértéknél (VB=0,5 mm) a passzív erőkomponens esetén kb. 490%-os, a főforgácsoló erőnél 135%-os eltérés mutatkozott a teljesen új, éles szerszámhoz képest.

Az előtolás irányú erőkomponens nagysága jelentősen befolyásolja a kialakuló maradó feszültségek nagyságát, így ebben az esetben praktikus okból (pl. a felületi beégés miatti kopáskritérium) megállapítottuk, hogy 0,5 mm-ig már nem célszerű a szerszámot tovább koptatni, mivel az már jelentősen megnöveli a túlzottan nagy passzív erő, a forgácsolási hőmérséklet és így a felületi mikrorepedések kialakulásának kockázatát. Ugyanis a forgácsolási hőmérséklet kb. 180%, a megmunkált és vizsgált felületi réteg képlékeny deformációja 570%, a nyomó maradó feszültségek pedig kb. 100% változást mutatott. A kísérleti eredményekből megállapítottuk, hogy a kívánt felületi minőség megtartása érdekében a VB=0.3 mm-nél nagyobb kopás nem megengedhető a vizsgált technológiai adatok és szerszám-munkadarab anyagpárosítás mellett.

Ezt az értéket a gyakorlatban a szerszámcsere-stratégiába célszerű beépíteni és figyelembe venni a termelés számára egyik legfontosabb tényező, az OEE (overall equipment effectiveness) előzetes megállapításához.

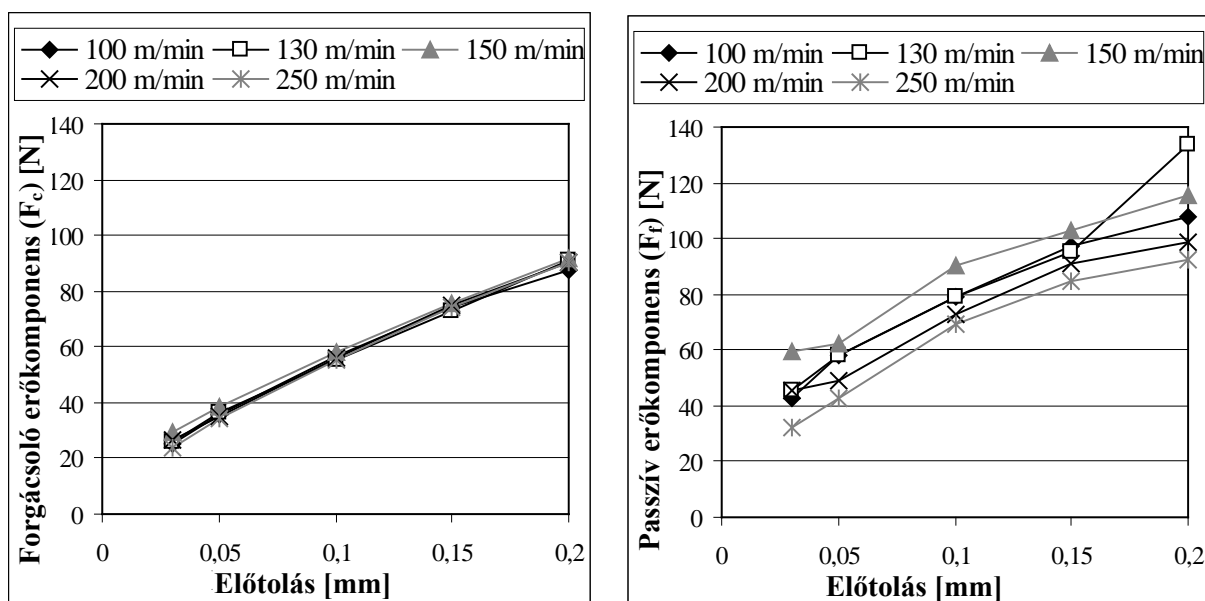
A maradó feszültségek kialakulására jelentékeny hatása van a szerszám ortogonál-homlokszögének kialakítása is. A homlokszögek kialakítását $+15^\circ$... -35° tartományban vizsgáltuk és megállapítottuk, hogy a homlokszög negatív irányba történő csökkentése mintegy -30° -ig jótékonyan befolyásolja a maradó feszültségek és az ébredő forgácsolási erőkomponensek kialakulását. Ebben a tartományban megközelítőleg lineárisan változik az

erőkomponensek arányossága, míg -30° felett pedig a passzív erőkomponens nagysága jelentős mértékben növekszik (mintegy 120%-kal), így az már a feszültségeken kívül a megmunkált geometriai pontosságra is negatív hatással lenne. Ezeket az eredményeket figyelembe véve megállapítható, hogy a nagy pontosságú, edzett acélból készült alkatrészek keménysztergálásánál a szerszám homlokszögének nagyságát mintegy -30° -ig célszerű csökkenteni. Ezen szögérték környezetében kereshető optimum érték, ahol a megmunkálás stabilitása és az ébredő erőkomponensek aránya még jótékonyan hat a folyamatra.

3. Forgácsolási paraméterek hatásainak elemzése

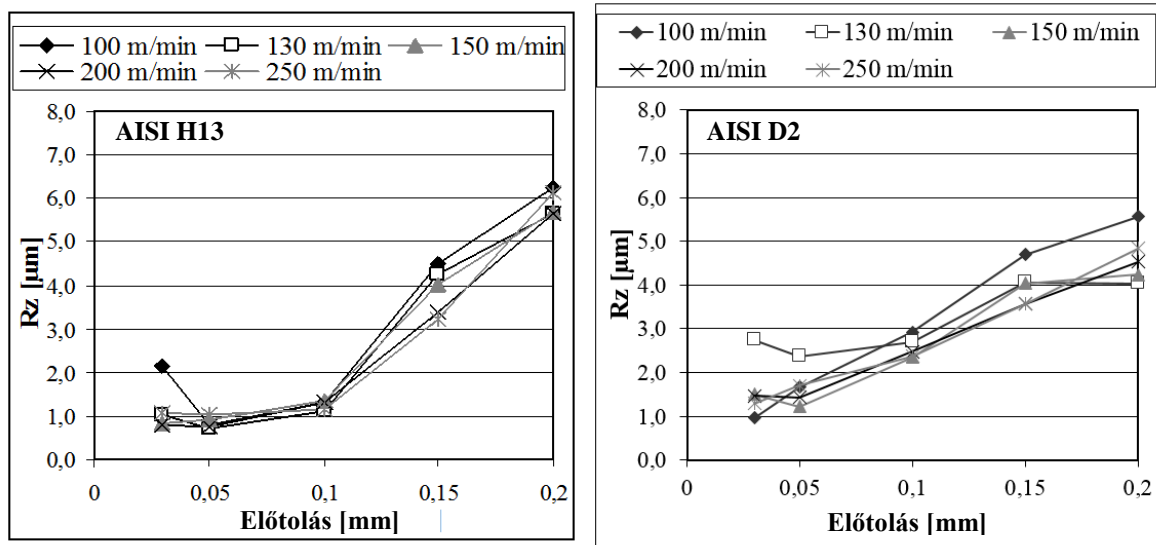
A kutatás szerves részét képezte annak elemzése, hogy a legfontosabb forgácsolási paramétereknek, úgy mint a forgácsolási sebességnek és az előtolásnak milyen hatása van keménysztergálási folyamatra, valamint annak eredményére. AISI H13-as és D2-es anyagok szisztematikus kísérleti megmunkálása, valamint ehhez kapcsolódó numerikus analízis szolgáltatott az eredményeket [6-8]. A kísérletek során a 100-250 m/min-es forgácsoló sebesség tartomány, valamint a 0,03-0,2 mm-es előtolási tartomány kerültek feltérképezésre 0,1 mm-es fogásmélység esetén.

A kísérletek eredményeképpen is megállapítható hogy a vizsgált anyagoknál a passzív erőkomponens értéke a legnagyobb az előtolási- és a forgácsolási erőkomponensekkel szemben. Ezeknek a nagyságai jelentős mértékben függenek az előtolás értékétől, a forgácsoló sebesség azonban csak kis hatással bír, és az is inkább a passzív erőkomponens esetében mutatkozik meg (4. ábra).



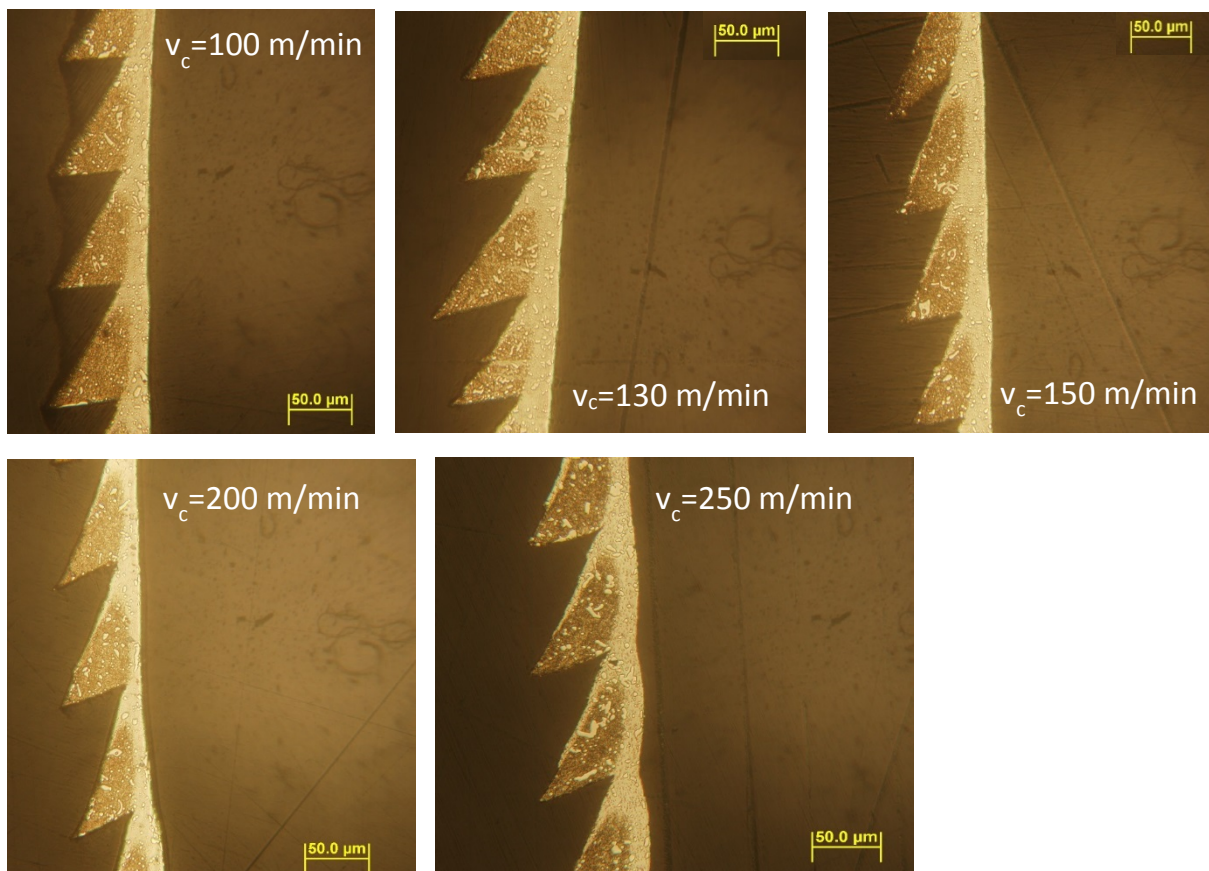
4. ábra. Forgácsolási erőkomponensek alakulása AISI D2-es anyag keménysztergálása esetén ($a_p=0,1$ mm)

A felületi érdesség leginkább az előtolás nagyságától függ keménysztergálásnál is, míg a forgácsoló sebesség hatása elhanyagolható (5. ábra). A minimálisan leválasztható anyagréteg vastagsága a deformációs folyamatok előtérbe kerülése miatt korlátot szab a felületi érdesség előtolás csökkentése szerinti javulásának. A kísérletek alapján megállapítható, hogy mind az AISI H13, mind pedig az AISI D2-es szerszámacélnál 0,05 mm-nél nem érdemes kisebb előtolást választani a felületi minőség javítása céljából.



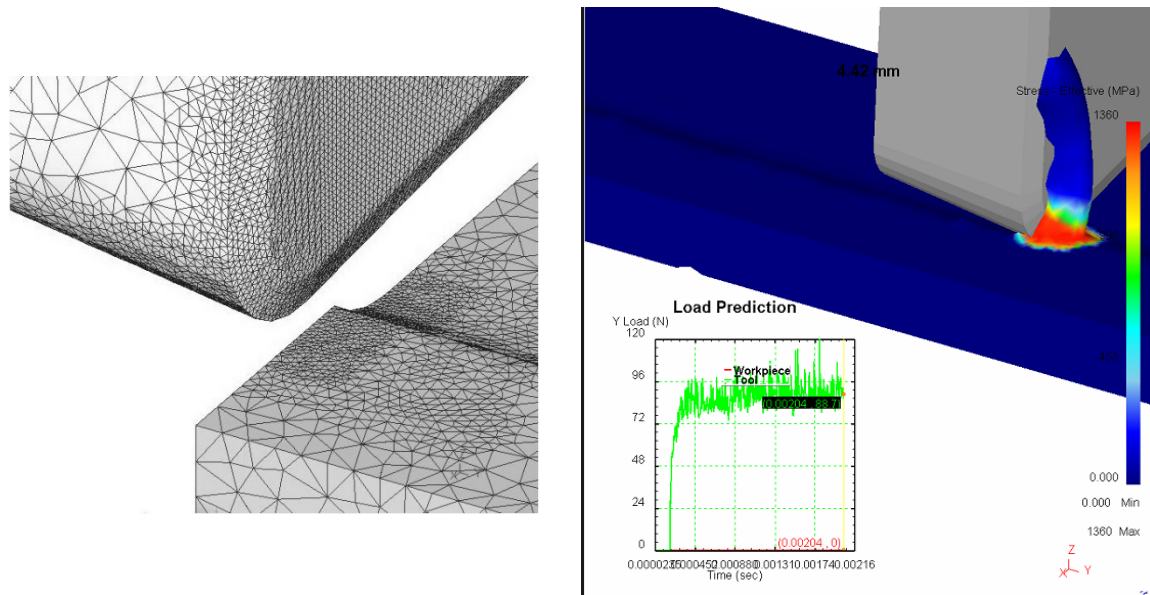
5. ábra. Felületi érdesség alakulása AISI H13 és D2 szerszámacélok keménysztergálása során ($a_p=0,1$ mm)

A vizsgált paramétertartományon belül AISI D2-es anyagnál valamennyi forgácsoló sebesség értéknél jellegzetes szegmentált (fűrészfog alakú) forgács alakult ki, AISI H13-as anyagnál viszont ez csak 200 m/min-es forgácsoló sebesség felett volt tapasztalható (6. ábra).



6. ábra. AISI D2 típusú anyag keménysztergálásánál keletkezett forgácsok hosszmetsete ($f=0,15$ mm, $a_p=0,1$ mm, e.n.=250x).

Deform 3D végelelemes szoftverrel numerikus analízist végeztünk a fentiekben leírt kísérletekkel megegyező forgácsolási paraméterekkel (7. ábra). Az eredmények összevetése alapján megállapítható, hogy a végelelemes analízis eredményeként nyert erőértékek általában nagyobbak, mint amit a kísérletek során mértünk. Az AISI D2-es anyagnál az eltérés kb. 10-20%-os [8], az AISI H13-as szerszámacélnál viszont már 45-120%-os [6]. Az eltérés nagyságát az alkalmazott anyagmodell, a kiinduló hálózás, az újrahálózási stratégia, valamint az anyagelválás kezelése is befolyásolja.



7. ábra. AISI D2-es szerszámacél keménysztergálásának végelelemes szimulációja

4. Forgácsképződés matematikai modellje

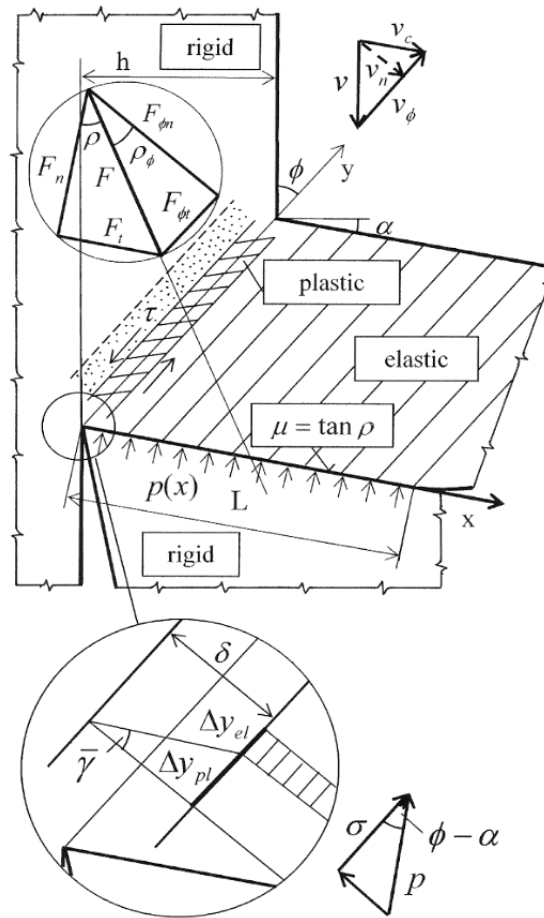
A forgácsképződés folyamatának matematikai leírásánál abból indultunk ki, hogy olyan módszert célszerű választani, amely lehetővé teszi a későbbiekben az eredmények kiterjesztését más fémalakítási technológiákra is. Számos alakítási technológia közös jellemzője, hogy a deformáció nagyrészt egy, vagy néhány szűk sávra koncentrálódik, amely lehetővé teszi ezek hasonló analízisét.

A keménysztergálás a forgácsolástechnológia olyan viszonylag új eljárása, amelynek elméleti vonatkozásai még több tekintetben feltáratlanok. Az már közismert tény, hogy a keménysztergálással leválasztott forgács ún. fűrészfog profilú, vastagsága igen intenzíven, periodikusan, de sokszor kváziperiodikusan intenzíven változik. Sajátosságai még jelenleg is széleskörű kutatás tárgyát képezik, ezért ebben a projektben is szükség volt a kísérleti programot e forgácsokra is kiterjeszteni. Vizsgálatainkból néhány jellegzetes hosszmetsetet a 6. ábra mutatott.

A forgácsok profilján jól látszik, hogy keletkezésük mechanizmusa csak a folyamat dinamikájának tanulmányozása révén tárható fel. A végelelemes módszernél ez számítások sorozatával, lényegében egymást követő pillanatképek létrehozásával, vagy matematikai modellel, a konkrét folyamatra illesztett differenciálegyenlet-rendszer megoldásával valósítható meg.

A 6. ábra szerint a forgácsképződésnél a 8. ábrán látható technológiai modellt alakítottuk ki [9],

olyan, a mérnöki technológiai gyakorlat által megalapozottnak tekinthető egyszerűsítő feltételezésekkel, amelyek a továbbiakban kezelhető matematikai modell alapjául szolgálhatnak.



8. ábra. A forgácstó technológiai modellje [11].

Az ábra szerinti technológiai modell lényege a nyírási zónában egy aktív és egy deformáció szempontjából passzív sáv feltételezése. Előbbiben megy végbe a forgácsot létrehozó deformáció, az utóbbi csak a termikus folyamatokban vesz részt. Így a folyamat fizikai állapotjellemezői az aktív zónában a τ nyírófeszültség, γ deformáció (szögtorzulás) és a T hőmérséklet, az inaktív zónában pedig a T_0 hőmérséklet. Ilyen módon ennek a négy állapotjellemezőnek a meghatározásához szükséges a matematikai modell, amely négy közönséges, autonóm differenciálegyenletből áll:

$$\frac{d\hat{T}_0(\hat{t})}{d\hat{t}} = \varsigma [\hat{T}(\hat{t}) - 2\hat{T}_0(\hat{t})] - \frac{1}{\delta\hat{t}} \hat{T}_0(\hat{t}) \quad (1)$$

$$\frac{d\hat{T}(\hat{t})}{d\hat{t}} = \eta\hat{\tau}(\hat{t})F(\hat{t}) - \varsigma [\hat{T}(\hat{t}) - \hat{T}_0(\hat{t})] - \frac{1}{\delta\hat{t}} [\hat{T}(\hat{t}) - \hat{T}_0(\hat{t} - \delta\hat{t})] \quad (2)$$

$$\frac{d\hat{\gamma}(\hat{t})}{d\hat{t}} = [F(\hat{t}) - F(\hat{t} - \delta\hat{t})] \frac{1}{\delta\hat{t}} \quad (3)$$

$$\frac{d\hat{t}}{d\hat{t}} = \frac{1 - F(\hat{t})}{[1 + f(\hat{t})]^2} - 2 \frac{\hat{t}}{h} \frac{dh}{d\hat{t}} \quad (4)$$

Ezek kiegészülnek még az

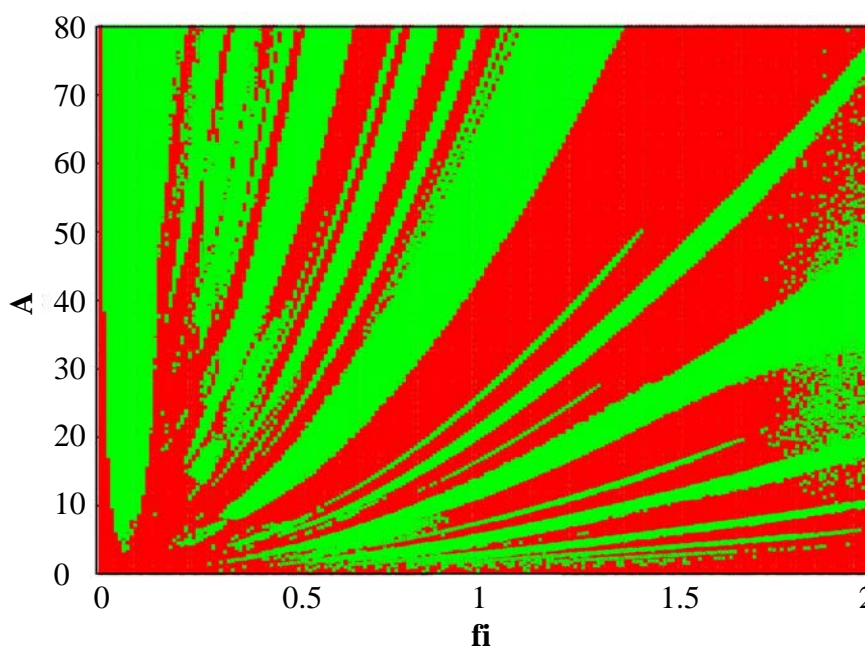
$$F(\hat{\gamma}, \hat{t}, \hat{T}) = F(t) = \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\epsilon}_\Phi} = \frac{\hat{T} + 1}{\hat{T}_\Phi + 1} \exp \frac{\tau - \frac{1 + \epsilon_\Phi^n \cdot \dot{\gamma}^n}{1 + \epsilon_\Phi^n} + a(\hat{T} - \hat{T}_\Phi)}{b \cdot (\hat{T} + 1)} \quad (5)$$

konstitutív egyenlettel [9-11]. Az egyenletrendszerben kettő egyenlet időeltolásos (1. és 2. egyenletek), amelyeknél a δt időeltolás az az idő, amely alatt az anyag a nyírési zónán áthalad. Szükségesnek mutatkozott a modellt továbbfejleszteni úgy, hogy az az időben – pl. rezgés miatt – változó sebességnél, illetve a leválasztott anyagréteg vastagságának az ingadozása esetén is érvényes maradjon [9,10].

Utóbbi esetben, pl. az ún. regeneratív jelenség fellépése esetén (amikor a periodikusan ismétlődő műveletrészt a megelőző műveletrész is befolyásolja) a modell kiegészül még egy állapotjellemezővel, ez az aktuálisan leválasztott anyagréteg vastagsága. Ez is autonóm differenciálegyenlettel írható le, amely szintén időeltolásos. Itt az időeltolás esztergálásnál a munkadarab egy körülfordulásának az ideje. Ekkor természetesen a fenti egyenletek is kiegészülnek az új állapotjellemezővel.

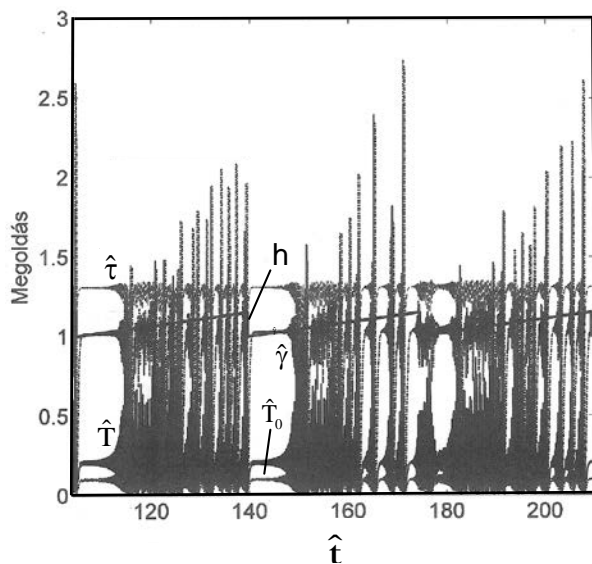
A modell megoldására 3 példa:

1. A rezgés miatt effektíve változó forgácsoló sebesség akár nulla vagy „negatív” (megszakad a forgácsleválasztás!) is lehet, amely függ egyrészt a technológiától, másrészt a rendszer rugalmasságától. Ennek a kettőnek a függvényében a 9. ábra azt mutatja, mennyire esetleges, hogy folyamatos-e a forgácsképződés vagy pedig szakadozott (abszcisszán a sebességgel, az ordinátán a rugalmassággal arányos mennyiség látható).

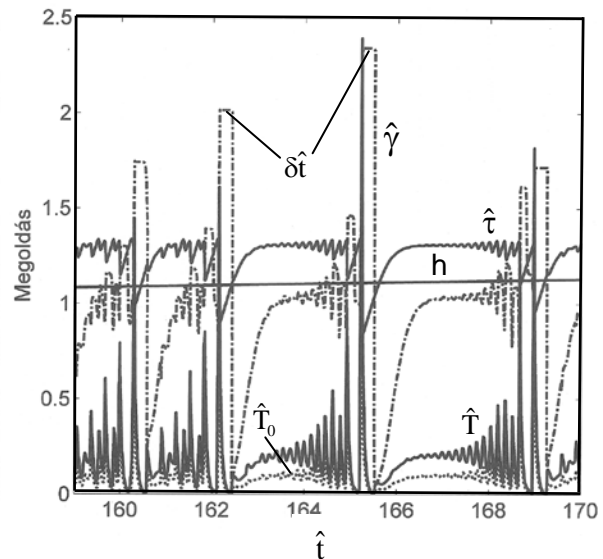


9. ábra. A v_c forgácsoló sebesség irányában rezgő rendszer folytonossági/megszakadási térképe (zöld: folyamatos, piros szakadozott forgácsképződés, [9]).

2. Élrátétképződésnél a leválasztott rétegvastagság ingadozik. A modell megoldásának egy részletét az 10. ábra szemlélteti, dimenziótlán változókkal. A jelenség domináns frekvenciája 92 Hz volt, azonban a részletesebb vizsgálat (11. ábra) kimutatott egy 1,4 kHz körüli felharmonikus is. Figyelemreméltó, hogy a folyamatok a finomabb időléptéknél hasonlóak.

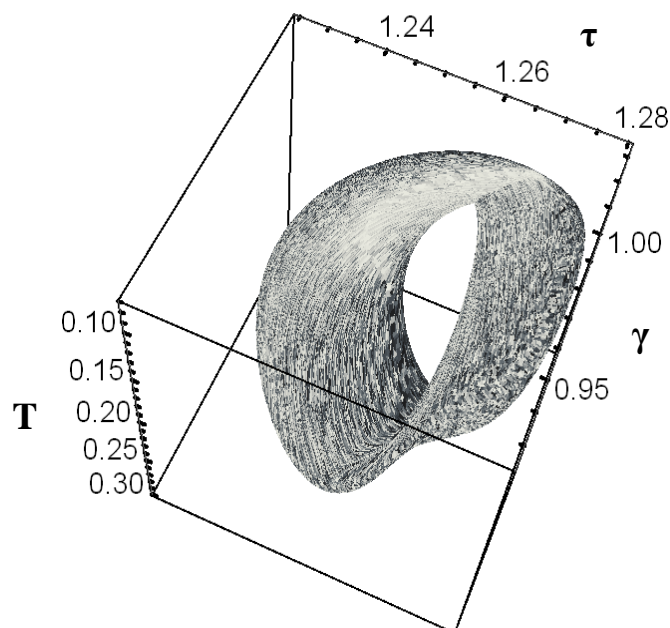


10. ábra. A forgácsképződés matematikai modelljének megoldása változó leválasztott rétegvastagságnál.



11. ábra. Az 5. ábra egy részletének kinagyítása

3. A regeneratív hatás számításaira jellemző a 12. ábra, amely a nyírási zónában a három állapotjellemző együttes kvázi-periodikus mozgását szemlélteti, szintén dimenziótlán változókkal [12].



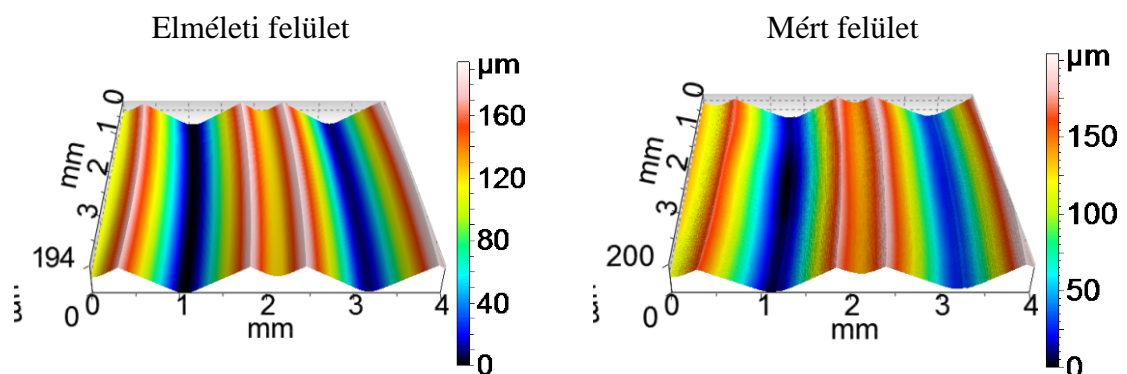
12. ábra. A nyírási zóna állapotjellemzői a regeneratív hatás érvényesülésekor [12].

A forgács keletkezésénél ilyen módon gyakran jelentkező rezonátor effektus frekvenciája ugyan magas, akár néhány 10 kHz nagyságrendű, a gyakorlati technológia szempontjából mégis fontos. Figyelembe kell ugyanis venni, hogy a modern szerszámgépek merevek, amely egyben azt is jelenti, hogy mechanikai sajátfrekvenciájuk is nagy, vagyis e kettő közel kerülhet egymáshoz. Akkor pedig rezonancia-közeli állapot állhat elő, amely a megmunkált felület mikrogeometriáját befolyásolja.

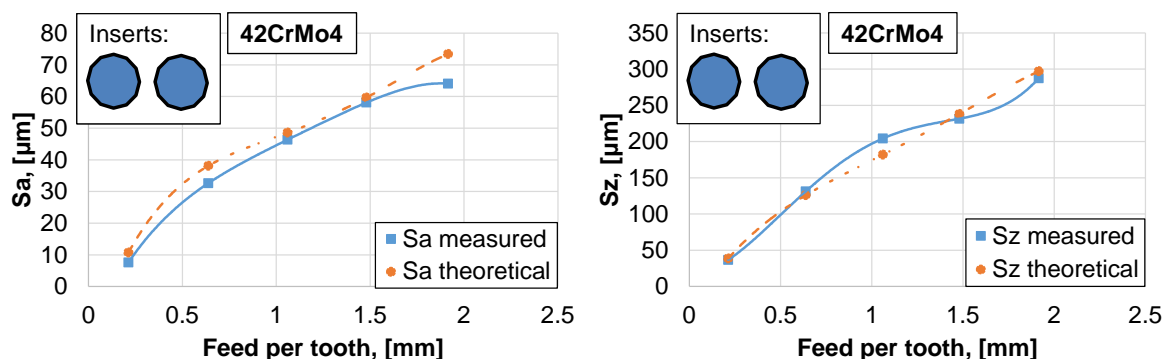
5. Felületi minőség elemzése

A keményesztergálásnál, mint a többnyire köszörülést helyettesítő befejező műveletnél különösen nagy jelentősége van a felületi minőségnek, ezért azt a feladatot tűztük magunk elé, hogy matematikai számítási módszert dolgozzunk ki a felületi érdesség meghatározására.

Ehhez CAD rendszerben, az Autodesk Inventor program alkalmazásával elkészítettük a forgácsolt felület modelljét, majd ezt átvittük az AltiSurf 520 felületi érdességvizsgáló berendezés AltiMap nevű kiértékelő szoftverébe, amellyel kiértékelhetővé vált a felületi topográfia. Az így kapott eredményeket ezután összehasonlítottuk a tényleges forgácsolási kísérletek során kapott valós érdességi adatokkal (13. ábra).



13. ábra. Az elméleti és a mért felületek topográfiája homlokmarásnál ($f_z = 1,06$ mm, tizenkétszög alakú váltólapkánál)

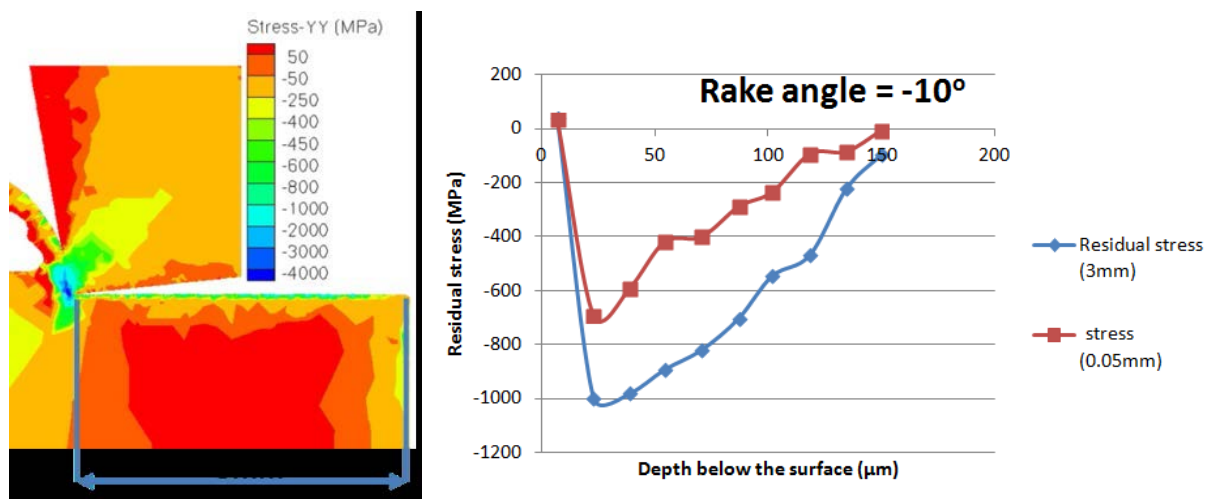


14. ábra. A vizsgált 3D-s érdességi paraméterek összehasonlítása két tizenkétszög lapkával végzett homlokmarásnál.

A mért és a számított topográfia egyezése, amint azt a 13 ábra is érzékelteti, jó. Az így kialakított topográfiai modell alapján számított érdességi jellemző egyezése pedig kiváló (14. ábra). Ezzel lehetővé vált olyan empirikus képlet kidolgozása, amellyel a modellezéssel meghatározott érdességi jellemző nagy megbízhatósággal átszámítható a méréssel megállapított érdességre, amely által a felületi érdességi jellemzők tervezhetővé válnak adott szerszám/anyag párosítás esetén.

A módszer egyik nagy előnye, hogy mivel az elméleti és a valós érdességi adatok meghatározása ugyanazon szoftver felhasználásával történik, a számítási módszerek eltérései miatti hibák kiszűrhetők. Ez új megközelítése az elméleti érdesség számításának. További előny, hogy mivel a kidolgozott program nem csak profilok, hanem háromdimenziós felületek átvitele is lehetséges, így a háromdimenziós érdességi paraméterek becslésére is alkalmas a módszer (Irodalmi hivatkozások [13-16]).

Keményforgácsolásnál a felületi érdesség mellett a felület un. integritása is igen fontos, amely az érdesség mellett a felületi réteg keménységét és maradó feszültségi állapotát jelenti (15. ábra). Ez irányú vizsgálataink ahhoz a fontos megállapításhoz vezettek, hogy a technológiai paraméterek, pl. a szerszám homlokszög célszerű megválasztásával a munkadarab felületi rétegében a maradó feszültségi állapot optimalizálható [17].



15. ábra. Felületi integritás vizsgálata.

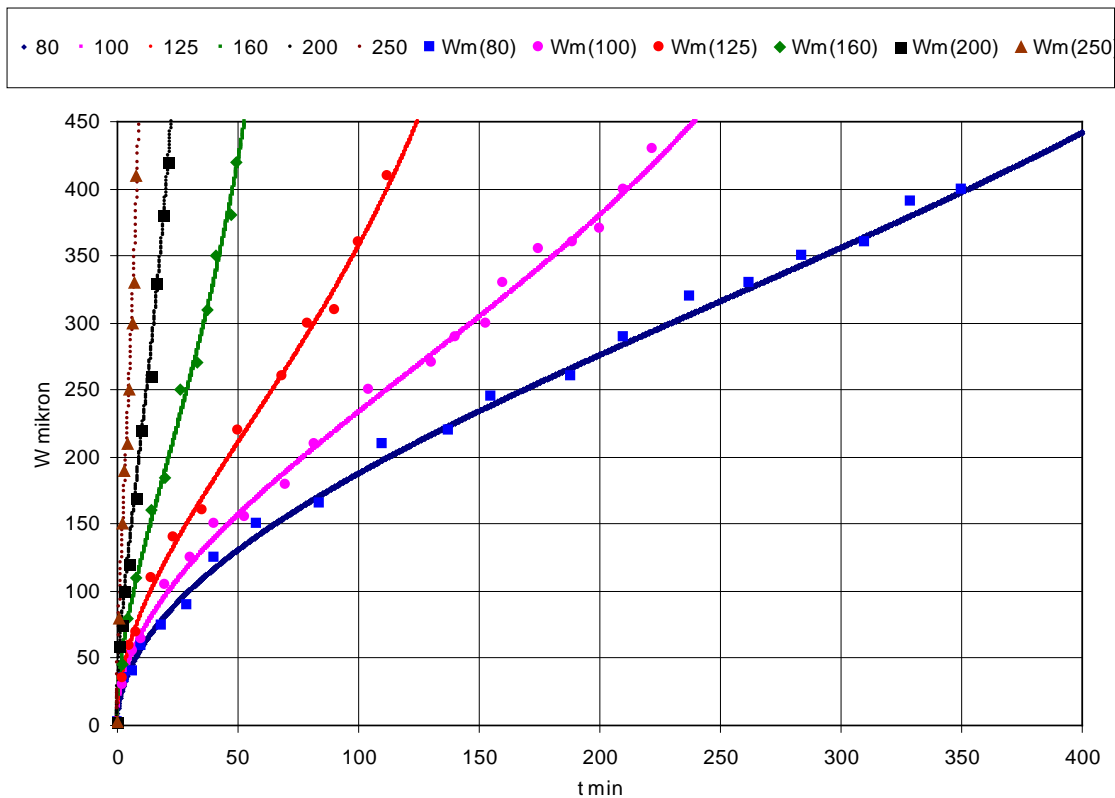
a) Feszültségállapot szimulálása a forgácsolásban és a felületi rétegben, b) Feszültségek különböző mélységben [17]

6. Szerszám degradációjának elemzése

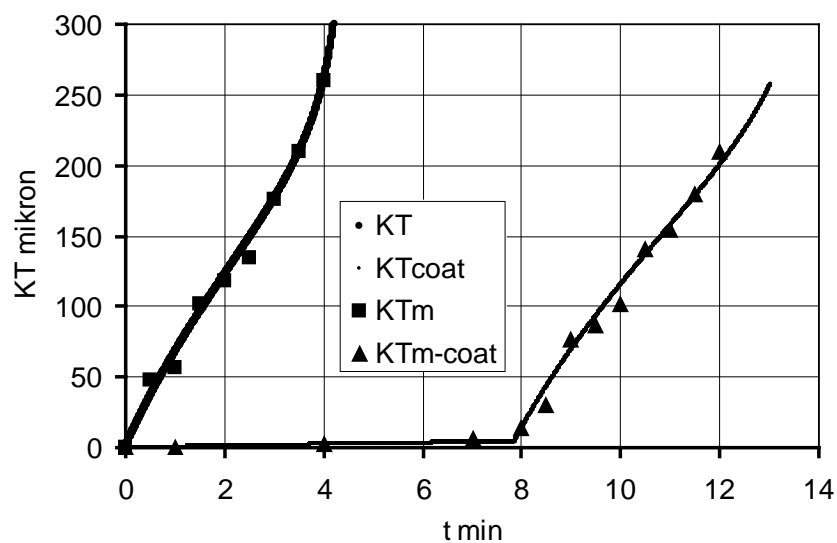
A forgácsleválasztás termomechanikai folyamatainak vizsgálati eredményeire és a fizikai metallurgia módszereire is támaszkodva a szerszám degradációját matematikai modellel - differenciálegyenlettel – sikerült leírni [18-24]. Ennek helyességét a hátkopásra vonatkozóan a 16. ábrán látható kísérleti eredmények [21], a homlokfelületen végbemenő hátkopásra vonatkozóan pedig a 17. ábrán szemléltetett mérések [18] igazolják.

Gyakori, hogy a szerszámok szakaszosan vagy folyamatosan változó technológiai feltételekkel pl. sebességgel dolgoznak, amikor a szokványos éltartam-függvények már használhatatlanok. E problémát megoldja azt az időben változó feltételekre kidolgozott számítási módszerünk, amely a nemlineáris kumulatív kárhalmozódáson alapszik [25, 26]. Természetesen ez a változás

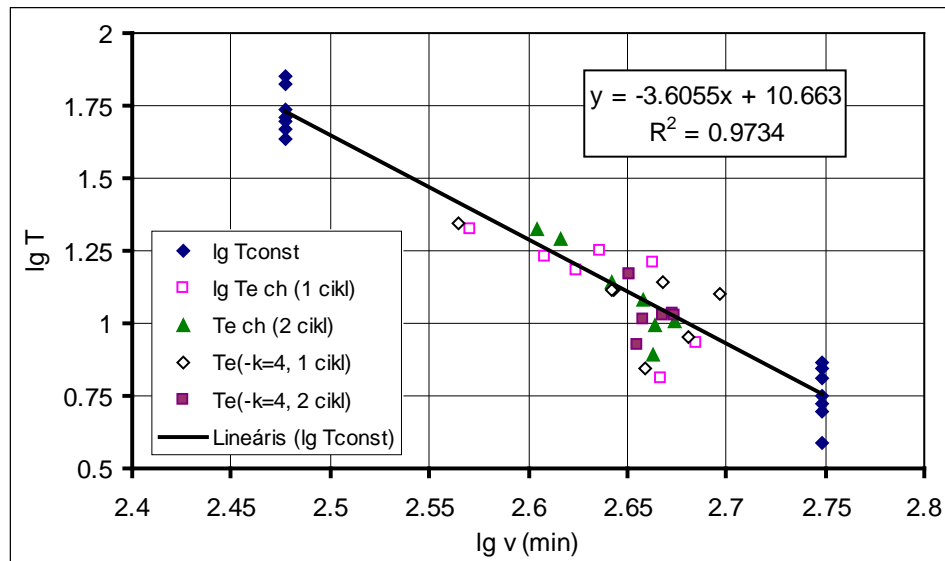
folyamatos is lehet, mint a kúp- vagy kereszttesztgálásnál. Ezekre az esetekre meghatározható egy olyan ekvivalens forgácsoló sebesség, amelyre már alkalmazhatók a technológiai tervezésben használatos éltartam-függvények. Az elméleti eredmények igazolásának egyik mérési sorozatát szemlélteti a 18. ábra [25].



16. ábra. A számított kopásgörbék illeszkedése a mérési eredményekhez [21].

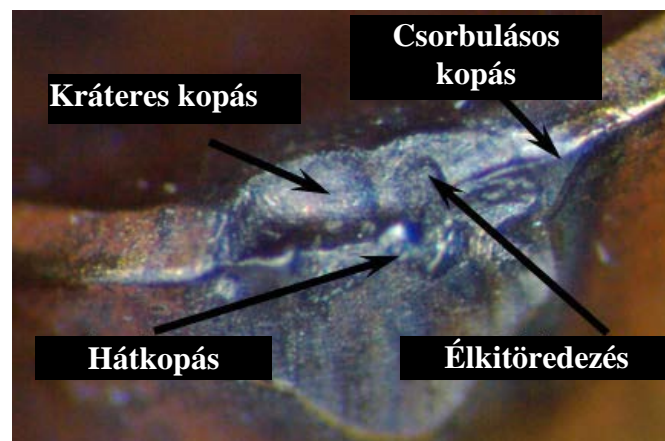


17. ábra. Számított (KT) és mért (KT_m) kráterkopás bevonatlan és bevont HSS szerszámnál ($v_c=52\text{m/min}$, $f_x a_p=0.25 \times 2.5\text{mm}^2$) [18].



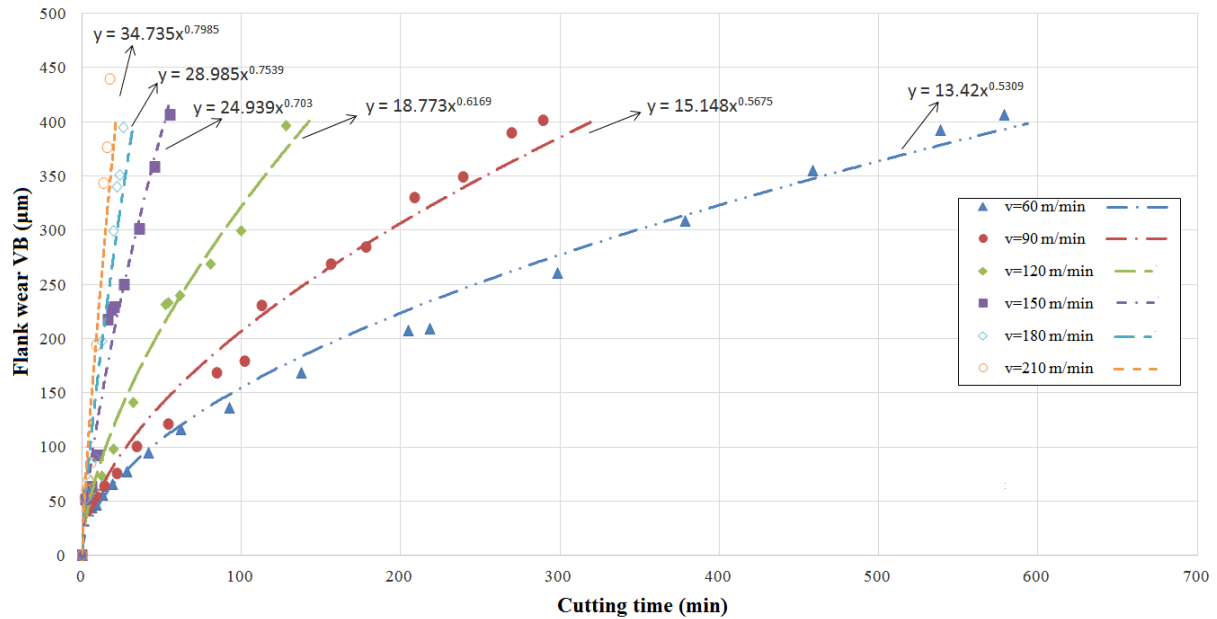
18. ábra. A hagyományos ill. ekvivalens forgácsolósebességgel számított szerszám éltartamok az ellenőrző kísérletek szerint [25]

Keményforgácsolásnál a szuperkemény CBN szerszám elhasználódása a megmunkált felület jellegétől függően, pl. külső vagy belső hengeres felület esztergálásánál eltérő lehet, a 19. ábrán látható kopásnyomok valamelyike válik kritikussá. A 20. ábra a hátkopás görbéit szemlélteti [27].

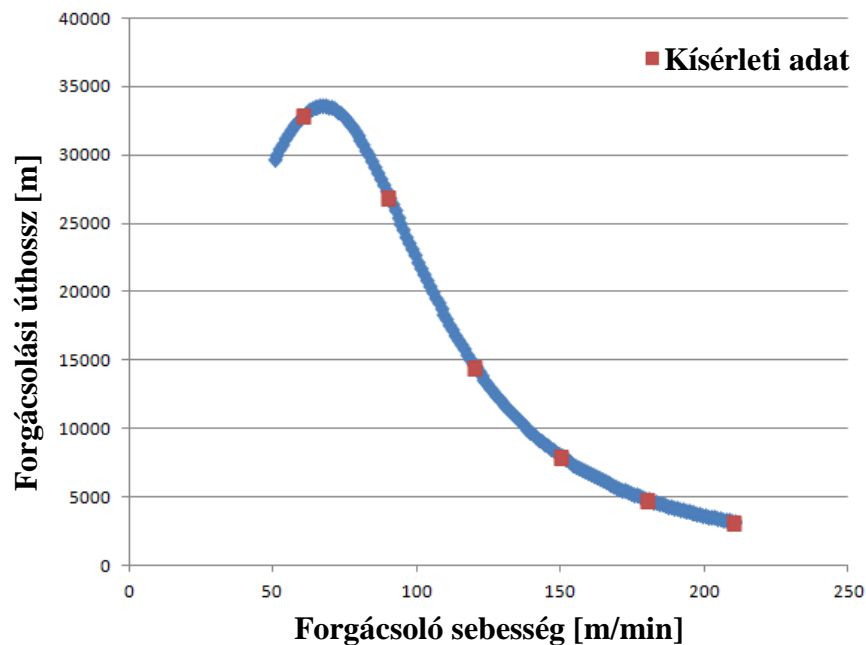


19. ábra. CBN szerszám elhasználódása a homlok- és hátfelületen [27]

A technológiai tervezésnél szükséges szerszám éltartam-függvény Taylor-féle hagyományos alakja esetenként nem használható, mert az éltartam-függvénynek szélsőértéke van. Ez jellemző a keményforgácsolásra akár az éltartamot, akár az elhasználódásig végigforgácsolható úthosszat vizsgáljuk. A probléma kezelésére új éltartam-függvény kidolgozására került sor, amelynek a kísérletek igazolták [27], és 21. ábra szemléltet. Ezen az a fontos kapcsolat is látható, amely az éltartam és a végigforgácsoló úthossz között kimutatható, és az optimális technológiai paraméterek kiválasztásánál lényeges.



20. ábra. CBN szerszám hátkopásának idő-görbéi különböző forgácsoló sebességnél [27].



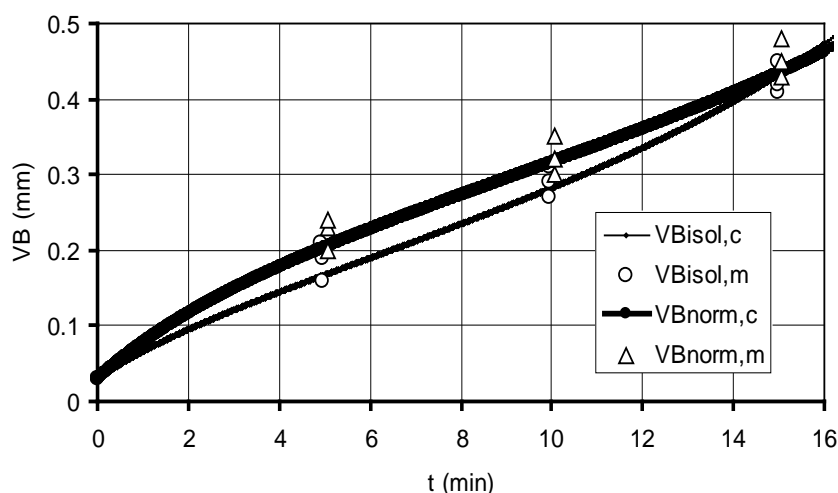
21. ábra. A szerszám elhasználódásáig végigforgácsoló úthossz a forgácsoló sebesség függvényében [17]

A szerszámkopás hatását 100Cr6 edzett golyóscsapágy acél alacsony CBN tartalmú szerszámmal végzett keménysztergálásakor is vizsgáltuk. A kopási rátákat a kísérletek során mért hátkopások alapján határoztuk meg a forgácsolási időre és a forgácsoló térfogatra vonatkozóan. A kopási ráták változását a hátkopás és a forgácsoló sebesség függvényében elemeztük. A fogásmélység és az előtolás állandó ($f=0,12$ mm/ford. $a_p=0,1$ mm) értékű volt, a forgácsoló sebesség $v_c=60-210$ m/min között változott. Az eredményekből arra a következtetésre jutottunk, hogy függetlenül attól, milyen vizsgált paraméterekre (forgácsolási

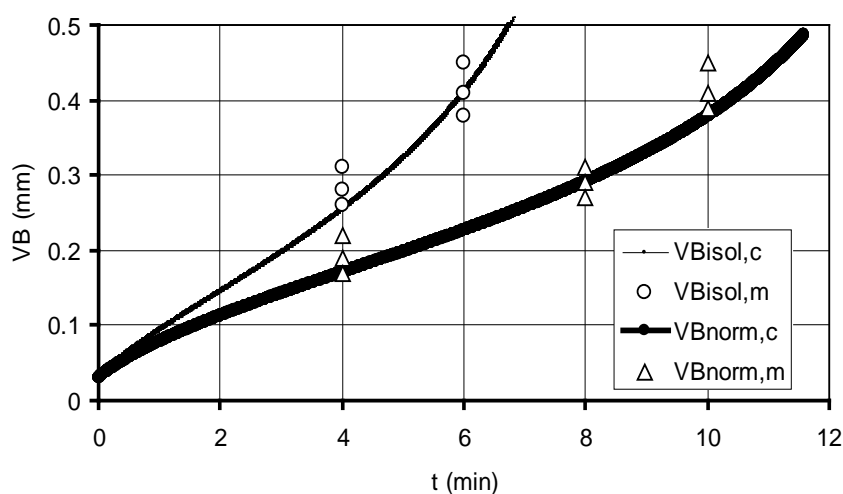
idő, forgácsolt hossz vagy forgácsolt térfogat) vonatkoztattuk a kopási rátákat, a görbék jellege hasonlóságot mutat. Megfigyelhető az is, hogy a kopási ráták jellege a különböző sebességeknél eltérő. A forgácsolás kezdetén – a szerszám bekopási szakaszában – egy kezdeti nagy értékről minden forgácsoló sebességnél meredeken csökken, majd 120 m/min sebesség alatt a kopási ráta lassú csökkenést mutat, miközben a 120 m/min-nél nagyobb sebesség értékek esetén a kezdeti hirtelen csökkenés után növekedni kezd. A vizsgálatok eredményei alapján megadhatóak azok a jellemző értékek, amelyek a CBN szerszámokra jellemző kopásmechanizmusok eredményei, ill. amelyek alapján az optimális forgácsolási paraméterek meghatározhatóak [28].

7. Seebeck-effektus hatásának elemzése

Régtől ismert tény, bár hatását eddig alig vizsgálták, hogy a forgácstőben a Seebeck-effektus következtében amper nagyságú örvényáram alakulhat ki. Ennek hőhatása nyilvánvalóan



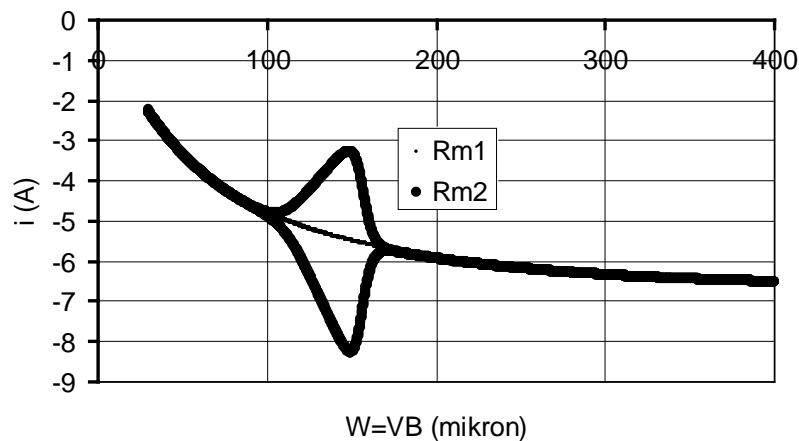
22. ábra. A számított kopásgörbe illeszkedése a mérési eredményekre ($v_c=200$ m/min, $R_m=1,4$ m Ω)



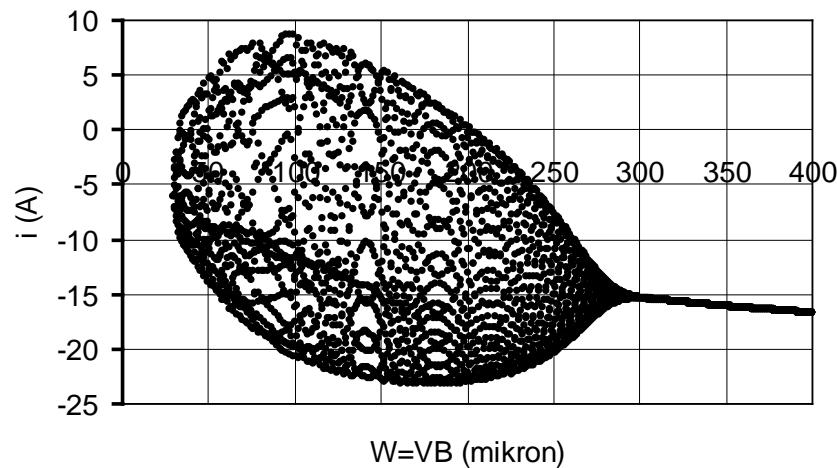
23. ábra. A számított kopásgörbe illeszkedése a mérési eredményekre ($v_c=250$ m/min, $R_m=1,6$ m Ω).

befolyásolja a szerszám elhasználódását, eddig a forgácsoláselmélet mégis figyelmen kívül hagyta. A forgácsstőben kialakuló örvényáramokat olyan modellel írtuk le, amelyben három áramkört tételeztünk fel: az egyik közvetlenül a forgács és szerszám homlokfelületén zárul, a másik a szerszám hátfelületén, a munkadarabon és a forgácson keresztül, a harmadik pedig a gépen is átfolyik. Ilyen módon lehetővé vált egy olyan modell kialakítása, amelynek révén számítani lehet a hátfelületen átfolyó elektromos áram erősségét, ennek hőhatását és a szerszámkopásra kidolgozott kopásmodellünk segítségével [21] a szerszámkopást is. A számításokat a forgácsolási kísérletek igazolták, a 22. és 23. ábra szerint számított kopásgörbék jól illeszkednek a mérési eredményekre [29, 30].

Amiatt a nyilvánvaló hatás miatt, amelyet a szerszám hátfelületén átfolyó áram a kopásra gyakorol, érdemes ezt az áramot közvetlenül is vizsgálni. A 24. ábra a számított áram erősségét a kopás függvényében mutatja, és itt egy érdekes jelenségek mutatkoznak. Az $R_m=1,163 \text{ m}\Omega$ ellenállásnál pl. a kopás növekedésével a vékony vonal szerint nő az áramerősség, viszont alig valamivel kisebb, $R_m=1,1579 \text{ m}\Omega$ belső ellenállásnál az áramerősség a kopás egy értékénél (itt $W \approx 100 \mu\text{m}$) ingadozni kezd, amely az ábrán csak a hullámok csúcspontjaival van ábrázolva. Amint a kopás növekszik, először az ingadozás mértéke is nő, aztán csökkenni kezd, majd megszűnik. Még érdekesebb az $i(W)$ függvény akkor, ha feltételezzük, hogy a szerszám és a munkadarab közé egy külső feszültségforrás van kapcsolva. Ilyen esetet szemléltet a 25. ábra, itt is csak a hullámzó függvény csúcspontjait mutatva. A számítás szerint a kopott szerszámon átfolyó elektromos áram erőssége kaotikus jellegű [30].



24. ábra. A számított áramerősség a $W=VB$ kopás függvényében ($R_{m1}=1,163 \text{ m}\Omega$, $R_{m2}=1,1579 \text{ m}\Omega$) [30].



25. ábra. Az áramerősség növekedése a $W=VB$ függvényében ($v_c=250$ m/min, $E_m=40$ mV) [30].

8. Összefoglalás

Az elméleti és gyakorlati kutatás során új eredményeket értünk el az alábbi részterületeken.

AISI H13 és D2 típusú szerszámacélok, valamint 100Cr6 golyóscsapágyacél szisztematikus kísérleti megmunkálása, valamint a forgácsleválasztás végeselemes szimulációja révén részletesen elemeztük a forgácsolási paramétereknek és a szerszámgeometriának a keménysztergálási folyamatra gyakorolt hatását.

A nemlineáris dinamika eszközeinek felhasználásával olyan matematikai modell készült, amely lehetővé tette az időben változó sebességű és változó leválasztott rétegvastagságú forgácsolási folyamat specifikumainak tanulmányozását. Ennek elméleti és gyakorlati jelentőségét az adja, hogy bebizonyosodott, a forgácsképződés a szélsőséges anyagalakítási viszonyok (igen nagy, gyors deformáció, hirtelen hőmérsékletváltozás) következtében oszcillátorként is funkcionál, amelyhez a periodikusan ismétlődő anyagleválasztásból eredő regeneratív hatás is kapcsolódik. A modell képes reprodukálni a különböző technológiai feltételek között kialakuló forgácsokat, azaz a tényleges forgácsképződést.

A forgácsleválasztás termomechanikai folyamatainak vizsgálati eredményeire és a fizikai metallurgia módszereire is támaszkodva a szerszám degradációját matematikai modellel – differenciálegyenlettel – sikerült leírni. Ennek helyességét a hátkopásra és a kráter kopásra vonatkozó kísérletek is igazolták.

A szokványos éltartam-függvények szakaszos vagy folyamatosan változó technológiai feltételekkel végzett megmunkálás esetén már nem alkalmazhatók. Időben változó körülményekre dolgoztunk ki olyan számítási módszert, ami a nemlineáris kumulatív károsodáson alapszik.

Abból a régtől ismert, de hatását eddig negligált tényből kiindulva, hogy a forgácstőben a Seebeck-effektus következtében amper nagyságú örvényáram alakulhat ki, amely hőhatásával eddig figyelembe nem vett módon befolyásolhatja a szerszámfelület igénybevételi viszonyait,

elektrotermikus folyamatok modellezésére is sor került, amelynek validálása forgácsolási vizsgálattal megtörtént

A kutatási eredmények a forgácsolási technológiában közvetlenül is hasznosíthatók, így hozzájárulnak ahhoz, hogy a jellemzően 45-68 HRC keménységű anyagok megmunkálása, mint a korszerű gyártástechnológia egyik kitüntetett fontosságú eljárása jól tervezhető, biztosan kézben tartott és ismételhető módon történhessen.

A kutatás eredményeit jelentős számú konferencia előadásban, valamint folyóirat cikkben mutattuk be mind bel-, mind pedig külföldön.

9. Irodalomjegyzék

[1] Mészáros Imre, Farkas Balázs Zsolt, Keszenheimer Attila: Development and Experimental Testing of CBN Inserts, Proceedings of 11th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology conference, Lake Como, Olaszország, 2011.05.23-2011.05.26., pp. 369-372

[2] Takács, M.: Numerical Simulation of Chip Removal Process Performed by Cutting Insert with Unique Edge Geometry, Proceedings of the 2nd International Conference on Mechanical Engineering and Mechatronics, Toronto, Canada. August 8-10. 2013. Paper No. 202.

[3] Marton Takacs: Validation of 3D finite element simulation of chip removal process performed by unique insert geometry, Key Engineering Materials 581, 2014, pp. 505-510

[4] Farkas Balázs Zsolt: Finite Element Analysis of Orthogonal Hard Turning with Different Tool Geometries, Key Engineering Materials 581, 2013, pp. 163-168

[5] Szabó Gergely: Maradó feszültségek alakulása a munkadarab felületi rétegében a szerszám-homlokszög nagyságának függvényében, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészaka XVIII. konferenciakiadványa, Kolozsvár, 2013. március 21-22., pp. 367-370

[6] Takács, M., Farkas, B.Zs.: Theoretical and Experimental Investigation of Machining of AISI H13 Steel, Advanced Materials Research 818, 2013, pp. 187-192

[7] Takács Márton: Keménysztergálás művelet végeelemes analízisének lehetőségei, OGÉT 2014: XXII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó konferenciakiadványa, Nagyszeben, Románia, 2014.04.24-2014.04.27., pp. 379-382

[8] Takács, M., Farkas, B.Zs.: Hard Cutting of AISI D2 Steel, Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Mechatronics, Prague, Czech Republic. August 14-15. 2014., Paper No. 176.

[9] Pálmai Z.: Egy lokális deformációval megvalósuló fémtechnológia matematikai modellezése. Anyagok Világa (Materials Word), ISSN 1586-0140, XI. évf. (2013) No. 2., pp 1-33

[10] Pálmai, Z., G. Csernák: Effect of built-up edge-induced oscillations on chip formation during turning, Journal of Sound and Vibration 332 (2013) pp. 2057-2069

[11] Pálmai Z.: Az acél nagy gyors deformációjánál fellépő anomália dinamikai vizsgálata. GÉP LXIV. évf. (2013) No. 2., pp 15-18

[12] Pálmai Z.: A forgácsképződés modellezése esztergálásnál a regeneratív hatás figyelembevételével. XII. Magyar Mechanikai Konferencia, Az előadások összefoglalói, Miskolc-Egyetemváros, 2015. augusztus 25-27. ISBN 978-615-5216-73-2

- [13] Felhő, Cs., Kundrak, J.: CAD-based modelling of surface roughness in face milling, *World Academy Of Science Engineering And Technology* 8:(5), 2014, International Conference on Manufacturing, Information and Industrial Engineering. Firenze, Olaszország: 2014.05.08 - 2014.05.09., pp. 71-75
- [14] Felho Cs, Kundrak J: Comparison of theoretical and real surface roughness in face milling with octagonal and circular inserts, *Key Engineering Materials* 581 (2014), pp. 360-365
- [15] Csaba Felhő, János Kundrák: Investigation of the Topography of Machined Surfaces, *Applied Mechanics And Materials* 693 (2014), pp. 412-417
- [16] Felhő Csaba, Kundrák János: Investigation of theoretical and real surface roughness in face milling of 42CrMo4 steel, *Development in Machining Technology Vol.3.*, Cracow University of Technology, Tadeusz Kosciuszko, 2013., pp. 82-91
- [17] Kundrák J., Szabó G., Markopoulos A. P.: Numerical investigation of the influence of tool rake angle on residual stresses in precision hard turning, *Proceedings of 8th International Congress on Precision Machining (ICPM 2015)*, 01-03. Oct. 2015., Novi Sad, Serbia
- [18] Pálmai, Z.: The modelling of crater wear in cutting with TiN coated high speed steel tool. *Materials Science Forum Vol. 812.* (2015), pp. 227-232
- [19] Pálmai, Z.: A new physically defined equation to describe the wear of cutting tools, *Annals of Faculty Engineering Hunedoara – international Journal of Engineering XII.*, ISSN: 1584-2665 (print), ISSN: 1584-2673, (2014) No. 2., pp. 111-116
- [20] Pálmai Z.: A forgácsolószerszámok kopásának matematikai modellezése felületi degradációjuk vizsgálata alapján, *Anyagok Világa (Materials Word)*, Vol. XII. (2014) No. 1., ISSN 1586-0140, pp. 8-50
- [21] Pálmai, Z.: Proposal for a new theoretical model of the cutting tool's flank wear, *WEAR* 303 (2013), pp. 437-445
- [22] Pálmai, Z., M. Takács, B.Zs. Farkas: Validation of new mathematical model of flank wear by different methods, *Materials Science Forum Vol. 729.* (2013), pp. 169-174
- [23] Pálmai Z.: A forgácsolószerszám éltartamának meghatározása munkadarab méretellenőrzéssel sorozatgyártásnál, *GÉP LVIV.* (2013) No. 2., pp. 19-22
- [24] Pálmai, Z.: Kráter kopás modellezése TiN bevonatú gyorsacél forgácsolószerszámánál, IX. Országos Anyagtudományi Konferencia, Balatonkenese 2013. okt. 13-15.
- [25] Pálmai, Z.: A model of non-linear cumulative damage to tools at changing cutting speeds. *Int. J. Manuf. Technol.* (2014) 74, pp. 973-982
- [26] Pálmai, Z.: Cutting Tool Life in Machining at Various Speed. *Key Engineering Materials Vol. 581* (2014), pp 38-43
- [27] J. Kundrák, A.P. Markopoulos, T. Makkai: Assessment of tool life and wear intensity of CBN tools in hard cutting, *Proceedings of 8th International Congress on Precision Machining (ICPM 2015)* 01-03. Oct. 2015. Novi Sad, Serbia.
- [28] Kundrák, J., Ráczkövi, L., Gyáni, K.: Machining performance of CBN cutting tools for hard turning of 100Cr6 bearing steel, *Applied Mechanics and Materials*, 474, 2014, pp. 333-338
- [29] Pálmai Z., Csobod L.: Elektromos (Seebeck)-effektusok hatásának matematikai modellezése forgácsolásnál. *Anyagok Világa (Materials Word)* (ISSN 1586-0140) Vol. XIII. (2015) No. 1., pp. 58-97

[30] Pálmai Z.: A Seebeck-effektus hatása a forgácsolás hőjelenségeire és a szerszámkopásra. X. Országos Anyagtudományi Konferencia konferenciakiadványa, Balatonalmádi, 2015. október 11-13., pp. 52-53