

# FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA

Kolozsvár, 2001. március 23-24.

## MIKROMARÁSI TECHNOLÓGIA ELEMZÉSE A SZERSZÁMOLDALRÓL

Takács Márton

### Abstract

One of the most exciting field of manufacturing engineering is the miniaturization of components and systems. Up to now there have been existed some widespread technologies for the manufacturing of miniature parts of devices (different etching methods, LIGA process), but these can only be applied in limited cases. The transplantation of conventional chip removal processes into the micrometer scale dimensions shows a very promising alternative. Micromilling researches have been carried out to find the optimal process parameters for the machining of metallic materials with hard metal micro end mill. There are many results about the examination of the surface and the geometric quality of the micromachined structure.

### 1. Bevezetés

A harmadik évezred kezdetén az ipar szinte minden területén (pl. autógyártás, informatika, orvostudomány, mérés- és szabályozástechnika) általános igény, illetve törekvés mutatkozik alkatrészek és rendszerek miniaturizálása iránt. A mikroszerkezetek előállítására eddig is léteztek szélesebb körben elterjedt technológiák (a különféle maratósi technológiák, LIGA-eljárás), de ezek számos hátránnyal rendelkeznek, illetve csak bizonyos körülmények között alkalmazhatóak.

Kutatási munkámban fémes anyagok kisméretű marószerszámmal történő megmunkálásához keresek kísérleti úton optimális forgácsolási paramétereket, illetve vizsgálom a megmunkált anyag felületi minőségét és szerkezetét. Ezek mellett tanulmányozom a mikroméretű forgácsleválasztás sajátosságait, ugyanis ebben a mérettartományban igen fontos szerepet kap az egyes szemcsék, illetve a szemcsehatárok módosító hatása.

Ebben a tanulmányban a témával kapcsolatos eredményeimet ismertetem, különös hangsúlyt fektetve a mikromaró szerszámokkal kapcsolatos vizsgálódásokra.

### 2. Célkitűzés, motiváció

Esetünkben mikroméretű megmunkálás alatt a 1...1000 $\mu$ m mérettartományba eső forgácsleválasztást értem. A kisméretű alkatrészek előállításához használt LIGA-eljárás

hátránya például a csupán nagy darabszám melletti gazdaságosság, vagy a megmunkálható geometria behatároltsága. Ezzel szemben az egyedi és kissorozatú gyártásban a hagyományos forgácsleválasztási módszerek rendkívül kis mérettartományba történő átültetése figyelemreméltó alternatívát jelent. Ezek közül az eljárások közül a legváltozatosabb megmunkálási lehetőséget a marás kínálja [1], [2], [3].

Az 1980-as évek vége óta folynak mikromarással kapcsolatos kísérletek. Eddig azonban - az igazi problémákat elkerülve - főként műanyagok és nemvasfémek megmunkálására tettek kísérleteket. Ehhez gyémánt szerszámot alkalmaztak, mely számos más előnyös tulajdonsága mellett roppant kicsi éllekerekítési sugárral készíthető. A nagy befektetési költségeken kívül a gyémánt óriási hátránya azonban az, hogy a kémiai reaktivitás miatt vasfémek - így az ipar számára rendkívül fontos acélok - nem munkálhatóak meg vele. Emiatt volt szükség más, olcsó, de mégis megfelelő megoldás bevezetésére [4], [5]. A vizsgált mikromarás tervezett fő felhasználási területe a mikrofröccsöntő szerszámok gazdaságos előállítására.

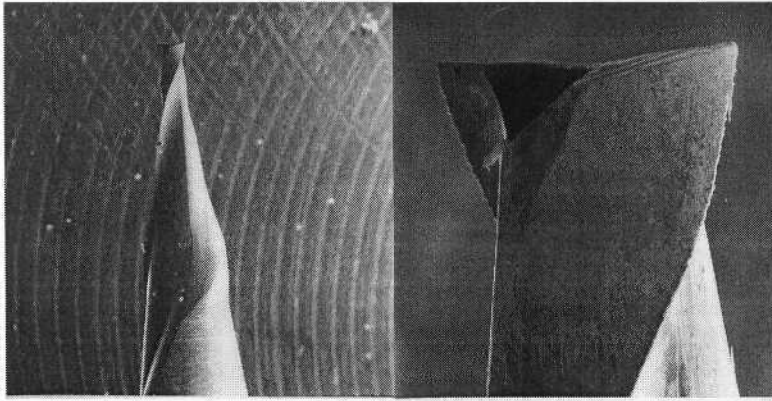
### **3. Kísérleti körülmények**

A mikroméretű forgácsleválasztásnak számos speciális követelménye van a hagyományoshoz képest. Ezek közül a legfontosabbak: a kis szerszámtér mértéke miatt a megfelelő vágósebesség biztosításához elengedhetetlenül szükséges magas fordulatszám, illetve a megnövekedett géppoldali követelmények (a nagy felbontás, a pontosság és a rezgésmentesség).

A kísérleteket egy 3 tengelyes, kifejezetten mikromarási célokra konstruált szerszámgépen végeztem. A kerámia csapágyazású főorsó fordulatszám tartománya: 30000... 160000 1/min. Kísérleteimhez több gyártó cég („magaforce”, „HAM”, „Jabro Tools”, „KOBELCO”) szerszámai is rendelkezésemre álltak. Az alkalmazott kétélű, bevonat nélküli keményfém szármarók 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m, 300  $\mu$ m, 400 $\mu$ m, illetve 600  $\mu$ m névleges átmérőjűek voltak. A kísérletek során több, a forgácsolás szempontjából eltérően viselkedő anyagot munkáltam meg: sárgarezet (CuZn39Pb3), nemesíthető acélt (42CrMo4) és különböző hőkezelésű, így különböző anyagszerkezetű szénacélt (CK45).

### **4. Keményfém mikromaró szerszámok**

A keményfémek előállítása területén rohamos fejlődés tapasztalható, különös tekintettel a nanoméretű porok megjelenésére. A szemcseméret állandó csökkenése miatt ezen anyag típus egyre inkább a figyelem középpontjába a mikromaró szerszámok gyártása területén is. A karbid szemcsék méretével fordítottan arányosan nő egy keményfém szerszám keménysége és hajlítószilárdsága. A szemcseméret a szerszámon kialakítható éllekerekítési sugár nagyságát is befolyásolja. Ultrafinom szemcsés keményfém szármarók már számos gyártótól beszerezhetőek a piacon mind sarkos, mind pedig rádiuszos véggel (1. ábra).



*1. ábra: Ø150µm-es mikromaró szerszám*

A vizsgált mikromaró szerszámokat porkohászati úton állítják elő ultrafinom szemcsés porból. A WC alapú, Co kötőanyagú szerszámok a „K” forgácsolási főcsoportba tartoznak. Anyaguk szerint igen kopásállóak, kedvező élszilárdsággal rendelkeznek, így élezésnél elvileg megfelelően kicsi éllekerekítési sugár alakítható ki rajtuk. Ez elengedhetetlen követelmény a mikrotartományban keletkező forgácsok méretét tekintve. Az energiadiszperzív kémiai analízis mindegyik gyártó szerszámánál szinte azonos anyagfelépítést mutat, a geometriában azonban már fellelhetők különbségek, főként a forgácsorony kialakításában. A még teljesen új szerszámokról készült felvételek a szerszáméi és a szerszámcsúcs kitöredezését mutatják. Ez a gyártás folyamán történő élezési problémákra hívja fel a figyelmet. A szerszámon megfigyelhetők az élező korong szemcsekarcolatai, melyek a szerszám méretéhez viszonyítva túl nagyok. A szerszám éllekerekítése kb. 1...5µm, melyet a szemcsenagyság korlátoz. Ez a sugár igen jelentős a leválasztott forgácsvastagságot figyelembe véve, és azt jelenti, hogy a szerszám negatív homlokszöggel forgácsol.

A szerszám elhasználódása mindig törést jelent, mely a szerszáméi kopása nyomán megnövekedett forgácsolási erő miatt következik be. A szerszám kopása minden esetben aszimmetrikus. Ebből az következik, hogy a megmunkáló szerszám nem központosán dolgozik, vagyis az egyik él intenzívebben forgácsol, mint a másik. Ez utóbbi csak keni az anyagot, vagy éppen hogy csak súrolja azt. Valószínűleg ez az él van erőteljesebb koptató hatásnak kitéve. Olyan periodikus forgácsleválasztásnál, mint a marás a fogak magas frekvenciájú, dinamikus terhelésnek vannak kitéve,  $n=6500$  1/min-es fordulatszám mellett ez 1083 Hz-es gerjesztést jelent. A keményfém szerszám különösen érzékeny az ilyen típusú terhelésekre, kettős repedésháló alakul ki, mely a kopási folyamatokat erősen felgyorsítja. Főleg hátfelületi kopások figyelhetők meg, erős éllekerekedés mellett.

## **5. Szerszámdeformáció**

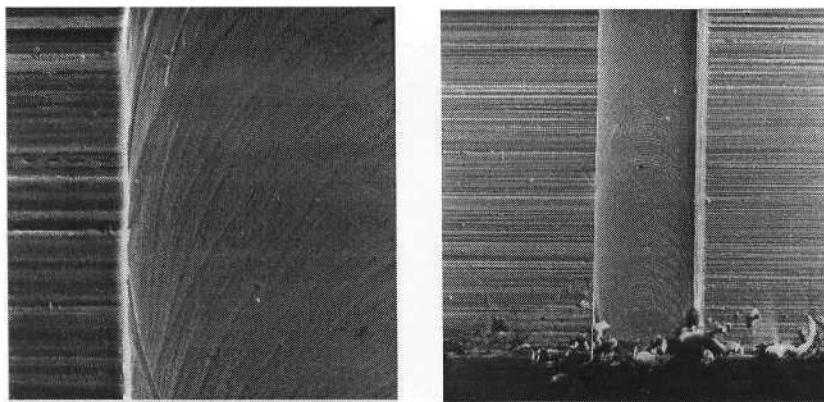
A sárgaréz jelentősége a miniatűr alkatrészek és szerszámok előállítására területén elenyésző, viszont a rajta végzett kísérletek az anyagszerkezete és jól forgácsolhatósága miatt számos alapkérdés tisztázására adnak lehetőséget. A sárgaréz mintadarabokba mart hornyok keresztmetszeti geometriája érdekes és figyelemreméltó problémát vet fel. A horony alja

minden esetben párhuzamos a próbatest felületével, a horony falai azonban már ívesnek mutatkoznak. Ez a jelenség minden anyag esetében megfigyelhető, de itt célszerű vizsgálni, mivel ennél az anyagnál nagyobb fogásmélységgel dolgozhatunk. A probléma oka a kicsi inerciájú marószerszámnak a forgácsoló erő következtében történő elhajlása. A forgácsolás közben fellépő hajlítónyomaték a kis átmérőjű szerszámot a szerszám hosszával négyzetesen arányosan terheli. Az ismert képlet alapján a számított elhajlás:  $f = \frac{F_c \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I_y} \approx 13 \mu\text{m}$  (ahol  $F_c$

a forgácsolási erő,  $I$  a szerszám tehetetlenségi nyomatéka,  $E$  a szerszám anyag rugalmassági modulusza,  $I_y$  a fő tengelyre vonatkoztatott tehetetlenségi nyomaték), mely megfelel a mért  $15 \mu\text{m}$ -s értéknek (4. ábra).

## 6. Megmunkálási minőség

A különböző hőkezeltségű szénacélok mikroforgácsolása alapján megállapítható, hogy a felületi minőség az anyag keménységével együtt növekszik, az éltartam viszont jelentős mértékben csökken. A legoptimálisabb forgácsolhatóságot a V450-es acél mutatja, mely



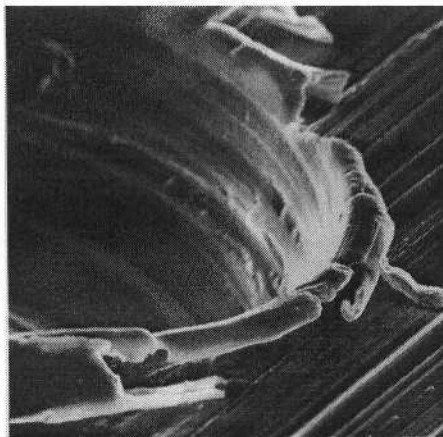
2. ábra: 300 $\mu\text{m}$  széles mikromart horony

450°C-on lett 2 órán át megersztve és 40 HRC keménységű. Az anyag keménysége és a szerszám kis inerciája miatt megfelelő éltartam biztosítása végett a fogásmélység nem választható 5...15 $\mu\text{m}$ -nál nagyobbra.

Igen kellemetlen hatás a sorjaképződés (3. ábra). Amennyiben a szerszám nem képes az anyagot leválasztani, a nagy hőmérsékleti és nyomásviszonyok miatt az anyag megfolyik, méghozzá a számára szabad irányban, felfelé és hátrafelé. A kísérleti tapasztalatok azt mutatják, hogy a sorjaképződés mértéke elsősorban a fogankénti előtolástól függ - egyre nagyobb előtolás mellett csökken, illetve meg is szűnik -, de döntő a szerszám geometriája, kopottsági állapota és a megmunkált anyag is. Sárgaréz esetében nem tapasztaltam sorjaképződést. A sorja igen kellemetlen jelenség, de a tapasztalatok alapján sikeresen eltávolítható, pl. elektrokémiai polírozással. A fogankénti előtolás a sorjaképződés mellett jelentősen befolyásolja a felületi érdesség alakulását is. A legnagyobb és legkisebb előtolás között létezik egy optimális, ahol a felületi érdesség egyértelműen a legjobb. Túl kicsi előtolás esetén még nem érjük el a minimális forgácsvastagságot, vagyis nincs igazi, jól

kontrolált anyagleválasztás.

Megfigyelhető, hogy egy konkrét horony mentén a felületi érdesség egy ideig javul, majd a minimum elérése után folyamatosan romlik egészen a szerszám töréséig. Ez a jelenség már a

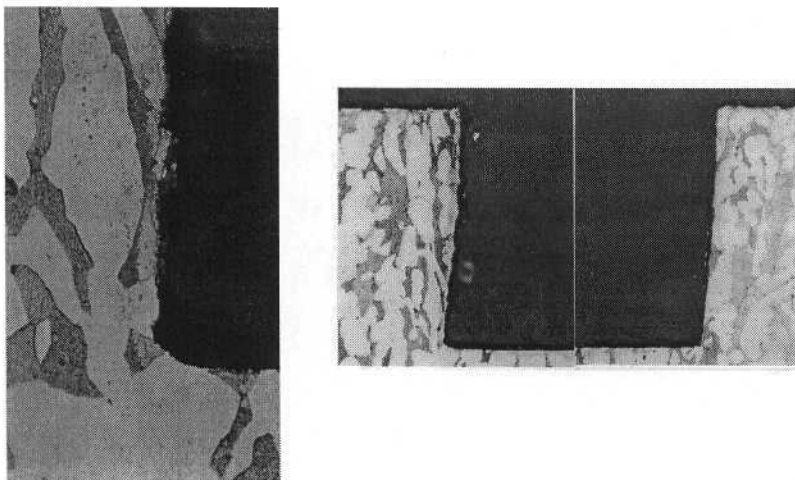


3. ábra: Sorjaképződés a mikromart horony vésén

hagyományos marásnál is tapasztalható, és azt feltételezi, hogy a szerszámnak a forgácsolási folyamat elején "be kell kopnia". A felületi érdesség a horony keresztmetszetében sem állandó. A mérések alapján a két szélén érzékelhetően rosszabb, mely a szerszám kopásával is magyarázható. Ezen túlmenően megállapítható, hogy az egyenirányú oldalon jobb a kialakított felületi minőség, mint az ellenirányún. A mikromart horony közepén szintén egy kiugróan rossz szakasz figyelhető meg. Itt tulajdonképpen a vágási sebesség zérus, tehát csak anyagdeformáció lehet szó.

### 7. A szemcsék hatása mikromaráskor

A keresztmetszetről maratott állapotban készített nagy nagyítású felvételeken megfigyelhető felületi egyenetlenség a megmunkált anyagban jelenlévő különböző fázisok eltérő rugalmassági modulusával, keménységével és keményedési képességével magyarázható. Mikromarás során a fogásmélység (acél esetében akár  $5\mu\text{m}$ ) és a fogankénti



4. ábra: A szerszámelhailás és az egyes szemcsék átvágása mikromart horony

előtolás (0,1 $\mu$ m) rendkívül kis mérettartományba esik. Ennek nyomán a forgácstő méretei jelentősen kisebbek, mint a megmunkálandó polikristályos anyag átlagos szemcsemérete. Ezért a mikroszerszám szemcsehatáron belül dolgozik, szemcsehatárokat vág át. Egy-egy szemcsehatár átlépésével megváltozik a szemcseorientáció, a kés irányára vonatkozó rugalmassági modulusz, így értelemszerűen módosul az anyag ellenállása, ami a kisméretű szerszámnak intenzív, dinamikus terhelésingadozást jelent (4. ábra).

A szerszám éllekerekítési sugara is sokszor nagyobb, mint a fogankénti előtolás, így a mikro méretű forgácsleválasztást új alapokra kell helyezni a hagyományossal szemben. Azt váránk, hogy a minimálisan leválasztható forgács vastagsága megegyezik a szerszám éllekerekítési sugarával. A kísérletek viszont azt mutatják, hogy lényegesen kisebb vastagságú forgács is leválasztható. Még az 1 $\mu$ m-nél kisebb fogankénti előtolás mellett is jól definiált forgácsot kapunk, ami viszont azt jelenti, hogy  $h_{\min} \leq 0,1\rho$ , ahol  $\rho$  a szerszám éllekerekítési sugara. Telibe mart hornyok esetén a szerszámfogak minden egyes bekezdési szakaszára elmondható, hogy nem történik anyagleválasztás, amíg a forgácsvastagság el nem ér egy kritikus vastagságot. A szerszám csak csúszik az anyagon, képlékenyen és rugalmasan alakítva azt. Ennek nyomán az anyag lokálisan felkeményedik. A forgácsolási paramétereket figyelembe véve egy adott ponton a szerszám akár 100-szor is áthalad anélkül, hogy anyagleválasztás történne. Az anyag képlékeny alakváltozási feszültsége csökken, rugalmas alakváltozási feszültsége nő. Mindezek nyomán jelentősen megváltoznak az egyes szemcsék, és így az egész anyag forgácsolási viszonyai. Ez a lokális felkeményedés elsősorban a szemcsék méretétől és orientációjától függ. A szemcsék szélein látható kitöredezés is feltehetőleg ennek a felkeményedésnek a következménye.

## 8. Összefoglalás

Alkatrészek, mikrofröccsöntő szerszámok egyedi és kis sorozatban gazdaságosan állíthatók elő keményfém marószerszámmal történő mikro forgácsolás útján. Az említett szerszámok nemcsak olcsóak, de általuk lehetőség van az eddigieken túlmenően acél megmunkálására is. Az eddigi tapasztalatok azt mutatják, hogy a mikroméretű forgácsleválasztás sokban hasonlít a hagyományoshoz, azonban itt, főként a méretekből adódóan számos körülmény átértékelésre szorul. Az egyik legfontosabb tényező a különböző orientációjú és nagyságú szemcsék szerepének előtérbe kerülése, hatása a mikroforgácsolási folyamatra.

## Irodalomjegyzék

- [1] K. Weinart, G. Guntermann, Ch. Schwietering: Mikrofräsbearbeitung schwerzerspanbarer Werkstoffe, Werkstatttechnik Nr. 88 (1998) H. 11/12
- [2] H.-W. Hoffmeister; J. Gábler: Mikrosysteme in der Fertigung - Fertigung von Mikrosystemen, Mitteilung der TU Braunschweig, Jahrgang XXXI, Heft 11/1996
- [3] M. Weck; M. Vos: Gedrehte und gefräste Mikrostrukturen, VDI-Z 137 (1995), Nr. 7/8
- [4] M. Vos; M. Weck: Der Span erobert die Mikrosystemtechnik, TransferNr. 44, 1995
- [5] E. Westkämpfer; H.-W. Hoffmeister; J. Gábler: Spanende Mikrofertigung: Flexibilität durch Schleifen, Bohren, Fräsen, Feinwerktechnik Mikrotechnik Mikroelektronik (F&M) 104 (1996) 7-8, S. 525-528

**Takács Márton, PhD hallgató (II. éves)**

Budapesti Műszaki Egyetem Gépgyártástechnológia Tanszék, 1111, Budapest, XI. Ker., Egry J. u. 1.

**Telefon:** +36 1 463 2641, **Fax:** +36 1 463 3174, **E-mail:** tm@manuf.bme.hu