FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA

Kolozsvár, 2004. március 26-27.

FEJLŐDÉSI TRENDEK A MIKROMÉTER- ÉS A NANOMETER PONTOSSÁGÚ GYÁRTÁSBAN

Dr. Szabó Ottó

ABSTRACT. In the leading industrial countries of the world a new culture of production has developed based on automation, computer science, and microelectronics. It is called ultraprecision production, sub-micron or nanotechnology. Its specific characteristics are exceeding the magic $1\ \mu\text{m}$ accuracy limit, the accuracy $T = 1\ \mu\text{m} \dots 1\ \text{nm}$, and/or the generation of flat surfaces of a surface roughness less than $R_a \leq 0,02\ \mu\text{m}$. The main classifications of the ultra-precision technologies helping to force this development are precision engineering, micro-engineering (MST/MEMS/MOEMS) nanoscience and nanotechnology.

Összefoglalás. A vezető ipari országokban az automatizálás, a számítógépek és a mikroelektronika bázisán új gyártási kultúra kutatása-fejlesztése és bevezetése történt meg. Ezt az új területet hívják ultraprecíziós, mikrométer alatti vagy nanotechnológiának, amit az jellemez, hogy átlépte a bűvös $1\ \mu\text{m}$ -es pontossági határt. A tűrések akár $T = 1\ \mu\text{m} \dots$, illetve néhány nm nagyságúak, és/vagy a felületi érdességek kisebbek, mint $R_a \leq 0,02\ \mu\text{m}$. Az ultraprecíz pontosságú technológiák legfontosabb kutatási területei a precíziós- és a mikrogépészet, a nanotudomány, valamint a nanotechnológiák kiszolgálását végzik.

BEVEZETÉS

A gyártástechnológiában világszerte két fő hajtóerő mutatkozik. *Egyik:* Az automatizálás és a számítógéppel irányított rugalmas gyártás, amelynek célja a költségek csökkentése, a minőség fokozása, a fő- és mellékidők rövidítése. Ebben a számítógéppel segített konstrukciós és technológiai tervezés, illetve gyártás (CAD/CAM); a rugalmas gyártórendszerek (FMS); valamint számítógéppel integrált gyártás (CIM) meghatározók. *Másik:* A nagy pontosságú gyártás igénye, a termékek (gyártmányok) fokozódó pontossági (méret, alak, helyzet) és felületminőségi követelményeiből adódik, amelyek különleges eljárásokkal, gépekkel és gyártóeszközökkel valósíthatók meg. Ennek részeredményeit villantja fel a dolgozat.

1. A PONTOSSÁG NÖVEKEDÉSÉNEK TRENDJE

1776-BAN James Watt az első gőzgépeinél félpennys pénzérme vastagságával veti össze a gőzhenger és dugattyú közötti rés (illesztési játék) nagyságát. Ez a rés (játék) kb. $1\ \text{mm}$ és akkori eszközökkel (Wilkinson-eszterga) csúcsnak számít. A pénzérme itt az első „idomszerek” egyike. Watt a gőz-gépet szabadalmaztatja. Az akkori gőzgépek teljesítménye néhány lóerő, hatásfok nagyon kicsi, ennek ellenére a század végére több mint 500 ilyen gép működött Anglia bányáiban. A későbbi gőz-gépeket már úgy reklámozták, hogy már 20 bányaló munkáját helyettesíti és lényeges a gazdasági megtakarítás, egyéb előnyök mellett. Innen származik a teljesítmény lóerő (LE) mértékegysége. És talán Watt munkájától számíthatjuk a gépipari gyártás korszakát is.

Több mint 100 év múlva, 1900 körül már a gyártási tűrések $0,1\ \text{mm}$ nagyságúak. Azóta a gyártási tűrések exponenciálisan csökkennek, a megmunkálási pontosság nő. Ezt Taniguchi 1983-ban szemléletesen vázolta [1].

Napjaink korszerű gépipari termelésében - funkcionális okok miatt - a tűrések század mm alá „szorultak”, sőt ultrapontos iparágakban (pl. számítástechnika, video- és fotóipar, fénymásoló berendezések egyes alkatrészeinél) 0,001 mm alá. A pontosság határai atomrács méreteknél található (~0,3 nm). Görögül a „nanos” törpét jelent. Például a néhányszor 10 nm nagyságú fém részeket és a nanorészecskéket a fizikusok és a kémikusok közel száz éve kutatják és az egyetemi oktatás szerves részét alkotják. Az atom- és molekula-fizikát - „nano-fizikának”, a kémiát „nano-kémiának” nevezhetnénk. A közemúltig a nanorészecskék sokaságát csak statisztikai módszerekkel lehetett kísérletek tárgyává tenni [5]. Az 1980-as évektől a nano-fizika és nano-kémia megkezdte az egyedi atomok és molekulák vizsgálatát. Ehhez újelvű pásztázó alagútmikroszkópokat (Scanning Tunneling Microscope: STM) atomerő mikroszkópokat (Atomic Force Microscope: AFM) megalkották és ezek bázisán kialakulóban vannak olyan eljárások, amelyek az anyag nanométer pontosságú megmunkálását lehetővé teszik [3, 4]. A „nano-fizikus”, a „nano-mérnök”, a „nano-technológus” még pl. a mikroelektronikában is törpének számító építőelemeket felhasználva szeretne mikrogépeket, mint pl. mikromotorokat, mikrorobotokat, mikroaktuátorokat építeni, illetve minél előbb ipari sorozatgyártásba adni. Erre már vannak külföldi és hazai példák [3, 4].

Magát az ipari nanotechnológiát, annak tömeggyártás méretű indulását az integrált áramkörök fejlődése, azok további miniaturizálása és az ebből származó előnyök gerjesztik (pl. Gordon Moore 1970-es években kidolgozott tervei az Intel-nél). Ennek folytatása, pl. az 1990-es évektől a jövő kvantumszámítógépeinek vagy a celluláris neutrális, vagy nemlineáris hálózatok (CNN, Chua-Roska, 2002) kutatásának eredményei. A nano-fizika és informatika hazai kutató-fejlesztő munka eredményei nemzetközileg is elismertek. A legjelentősebb K+F témákat Dr. Gyulai József, Csurgay Árpád, Kroó Norbert és Roska Tamás akadémikusok vezetik. A nanotudomány és nanotechnológia nemzetközileg elfogadott definíciói még váratnak magukra. A nanotudomány foglalkozik a nanométer ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$) méretű és pontosságú jelenségekkel. Integrálja a fizika, a kémia, a biológia és a gépészeti tudományok új eredményeit. Tehát interdiszciplináris tudomány, sajátos hibrid megoldásokat hoz létre [4]. A bonyolult interdiszciplináris kapcsolatokat az ún. „nanotechnológiai fa” szemlélteti [3]. A nanotechnológia olyan szerkezetek és rendszerek kifejlesztését, gyártását és működtetését jelenti, amelyek alkatrészeinek méret-, alak- és/vagy helyzetűréseire, valamint felületi érdekességére néhány nm nagyságokat írunk elő. A miniaturizálás az alkatrészek méreteit a mm-tartományból átviszi a néhányszor tíz nm, vagy kisebb méretek világába. Átfogja az új elvű eljárások és új nanoanyagok kutatását, tervezését és gyártását.

2. ULTRA- ÉS NANO-PONTOSSÁGÚ GYÁRTÁS ALAPJAI

Az ultrapontos gyártás átvezet a nanopontosságú gyártásba és részben annak alapját képezi. Nanotechnológiához tartoznak, illetve építő elemei a következők:

- ultrapontos eljárások továbbfejlesztése; gépek, vezérlőrendszerek kifejlesztése néhány nanométeres tűrések és érdekességek biztosítására;
- új technikák fejlesztése, amely képes megfigyelni, beavatkozni, mérni, minősíteni és kezelni 3D-s formában a nanométeres és atomi nagyságokat;
- az új technikákkal alkalmas azonosítani, kezelni és „szerelni” - összekapcsolni - egyedi molekulákat és atomokat, illetve azokat leválasztani;
- számítógépes hardverek, szoftverek és matematikai modellek alkalmazása, amelyek képesek új anyagokat tervezni, előre megmondva a mechanikai, elektromos, mágneses, optikai és kémiai tulajdonságokat;
- az információ technológia területén gyors és hatékony technológiai transzfer a diszciplínák között.

Az előzőek lefedik a tulajdonságok pontos ismeretét, a tervezést, a modellezést, a gyártást, a metrológiát és egyéb jellemző tevékenységet, ami a nanoméret tartományban előfordul. Ide tartoznak:

- nanométer struktúrájú szerkezeti anyagok;
- nano megmunkálások és gyártási technikák;
- elektronikus szerkezetek, mikroáramkörök és számítógépek gyártási technikája;
- manipulátorok és szerszámgepek;
- scanning mikroszkópia,

- a mikrorendszerek technológiája (MST);
- önszerveződő és önszerelő molekuláris struktúrák;
- biológiai és bioorvosi rendszerek tervezése, megvalósítása és üzemeltetése.

Jóllehet pl. a biológiai molekuláris motorok a tervezés stádiumában vannak, viszont pl. az egyszerű manipulátorok és aktív beavatkozásokat végző érkatéterek már mindennaposak a orvostudományban. A nagy pontosságú mechanikai anyagleválasztó technológiák mellett egyre nagyobb területet, illetve új termékek (pl. félvezetők) gyártását fedik le azok a különleges technológiák, amelyek pl. valamilyen energia sugárral-, kémiai-, elektrokémiai-, villamos áram hőhatásával végzik az alakítást. Ez a gyártási terület alkalmazza mind az anyagleválasztó, mind a felrakó módszereket, amelyekben az energia sugaras eljárások kiterjedt használata dominál, pl. a VLSI áramkörgyártásban (Very Large Scale Integration = nagyon nagy sűrűségű alkatrészintegráció). Ezen a területen a ma kutatása eredményezi a holnap ipari technológiáját.

3. ALKALMAZHATÓ GYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK VÁZLATOS FELSOROLÁSA

A fontosabb technológiai lehetőségek az alábbiak:

- Egyélű gyémánt és köbös bórnitrid (CBN) késekkel ultrapontosságú forgácsolás (pl. ultraprecíziós esztergálás és marás) [9, 10, 11];
- Sokélű abrazív finom-forgácsolás: pl. gyémánt és CBN szerszámokkal köszörülés, illetve dörzsköszörülés, alakos felületek finommegmunkálásának új megoldásai, mint pl. hazai kutatások eredményei, stb. [7, 8];
- Szabad abrazív szemcsékkel végzett csiszoló eljárásokhoz sorolható a tükrösítés (leppelés), fényesítés (polírozás), rugalmas emissziós forgácsolás [11];
- Szelektív kémiai-mechanikai polírozás, elektrolitikus polírozás, stb.;
- Kémiai eljárások, mint a szabályozott maratásos megmunkálás, fotolitográfia;
- Energia-sugár eljárások (leválasztás és felrakás) például:
 - a lézersugaras vágás, fúrás és felkeményítés, stb.;
 - az elektronsugaras litográfia, hegesztés;
 - a szikraforgácsolás különböző válfái (súlylesztékes, huzalos);
 - az elektrokémiai (áram) sugaras (ECM) megmunkálás;
 - az inert ionsugaras mikroprofilozás;
 - a reaktív ionsugaras megmunkálás (maratás);
 - az epitaxiális kristálynövesztés (molekulárisan kicsiny rátétképzés új felső kristályrács előállítására), stb.

4. NAGYPONTOSSÁGÚ MIKROFORGÁCSOLÁS

4.1. Egyélű szerszámmal végzett ultraprecíziós esztergálás alkalmazásai

A nanotechnológia szilárd szerszámmal való megvalósításához a nagy tisztaságú alumíniumból készült diszk alapkorong (számítógép mágneslemez tárolója) esztergálása áll a legközelebb. Csak gondosan előkészített drágakő minőségű gyémántszerszámok alkalmasak a nagy pontosságú megmunkálásra. Ilyen minőségű gyémántszerszám ára 450...600 \$. Az utóbbi kb. 15 évben ultraprecíziós CNC gyémántszesztergák állandó számbeli növekedése és ipari bevezetése figyelhető meg, olyan alkatrészek „tükrös-megmunkálására”, mint: számítógép memória mágneslemez hordozói; nagy energiájú CO₂ lézerek rezonátorainak konvex tükrei; berilliumból, rézből, stb. készült gömb csapágy felületek; fénymásoló dobok; lézernyomtatók pásztázó elemei (szkennerek); elliptikus tükrök YAG (yttrium-alumínium-gránát) lézerek nyalábkollektoraihoz; röntgensugár tükrőtartók (foglalatok); termovíziós rendszerek germánium anyagú infravörös lencsái; szerszámgyártás: pl. aszférikus műanyag-lencsék (fotó- és videooptikákhoz) prés-szerszámai, stb.

Az ultraprecíziós minőségű esztergálás különleges feltételek teljesítése esetén valósítható meg [10, 11]. Ennek teljesülése esetén az elérhető R_m maximális felületi érdesség néhány nanométer. Ezt elméletileg és kísérletileg is vizsgáltuk a Miskolci Egyetem Gépgyártástechnológiai Tanszékén. Ennek néhány eredménye a következő 4.2 és 4.3 pontok alatt található [9... 13].

4.2. Ultraprecíziós esztergálásnál a feszültség- és hőmérséklet eloszlása

Az ultraprecíziós megmunkálások pontosságának növeléséhez, a nanométeres tartomány megközelítésének feltétele a mikroforgácsolási folyamat pontos ismerete, illetve szükség szerinti szabályozása, irányítása. A forgácsképződés folyamata (a munkadarabban, a szerszámban és a forgácsban létrejövő feszültségállapot és hőmérséklet-eloszlás, a forgácsoló erők) befolyásolja a megmunkált felület érdességét és felületi rétegek tulajdonságát (szövetszerkezet, HV_μ mikrokeménység és σ_m maradó feszültségi állapot), illetve a pontosságot. Nagyon fontos, hogy elemezzük a munkadarabon és a szerszámon belüli feszültségmező eloszlását. A munkadarabra ható teljes terheles nagymértékben függ a forgácsképződés mechanizmusától.

A korszerű fémmegmunkálási technológiafejlesztés törekszik a forgácsolási ráhagyások minimalizálására. A leválasztási eljárás jobb megértése tette lehetővé a különféle anyagú és geometriailag határozott vágóélű szerszámok használatát a forgácsolásnál. A hagyományos köszörüléssel összehasonlítva ennek a megmunkálási módnak az előnyei közé tartozik az eljárás nagyobb rugalmassága és az alacsonyabb energia-fogyasztás ugyanolyan teljesítményszint mellett. A legtöbb köszörülési módszertől eltérően a geometriailag határozott vágóélű megmunkálás általában hűtés nélkül végezhető.

A forgácsolásban sok paraméter, úgymint a forgácsolási hőmérséklet, a forgácsolóerő, a szerszámkopás, a szerszámhomlok és a forgács közti súrlódás, vagy a megmunkálási teljesítmény összefügg a forgácsképződési folyamattal. Mindegyikük ismerete (például a leválasztási eljárás hőmérséklete, vagy inkább a forgácsolási zónabeli hőmérséklet eloszlása) elősegítheti a gyakorlati problémák megoldását. Azok az eljárások, ahol a forgácsolt munkadarabban és a szerszámban ébredő feszültségeket a hőmérséklet ismerete nélkül vizsgáljuk, a folyamatokat csak szubjektíven becsülhetjük meg. Így a hőmérséklet kísérleti meghatározása -, amely térben és időben változik - feltétlenül szükséges.

Kísérletet végeztünk olyan céllal, hogy meghatározzuk a terhelési értéket a forgácsolási zónahatárokon. Az F_p , F_f és F_c forgácsolóerők három komponensét mértük piezo-elektromos erőmérővel (Kistler 9257B típus), mely az UP-1. típusú ultraprecíziós esztergapadon a szerszámtartóra szereltük, s összeköttöttük egy számítógéppel (1. és 2. ábra).

Lábra Piezo-elektromos erőmérő UP-1. típusú
ultraprecíziós esztergára szerelve
(Miskolci Egyetem, Gépgyártástechnológiai Tanszék)

2. ábra Ultraprecíziós eszterga munkatere (Miskolci
Egyetem, Gépgyártástechnológiai Tanszék)

A forgácsolóerő jeleit töltéserősítőn (Kistler 5019A típus) keresztül továbbítottuk és adatrögzítőn (PC-n) rögzítettük, illetve a számítások megtörténtek. A testhatáron a felületi erők eloszlásának ismerete lehetővé tette a forgácsolási zóna bármely pontjában az elmozdulás és a feszültség kijelzését. Az 3. ábra bemutatja a Von Mises szerinti tényleges feszültség eloszlást a munkadarabban, a forgácsban és a szerszámban. A hőmérsékletmezőket a következő összefüggésekkel számoljuk:

$$\int_{\Omega} [T^*(\vec{r})q_v(\vec{r}) - T(\vec{r})q_v^*(\vec{r})]dv = \int_{\Gamma} [q(\vec{r})T^*(\vec{r}) - q(\vec{r})T(\vec{r})]dS \quad (1)$$

$$T(\vec{r}) = \sum_{i=1}^{NP} N_i(\vec{r})T_i \quad \dot{q}(\vec{r}) = \sum_{i=1}^{NP} N_i(\vec{r})\dot{q}_i \quad (2)$$

$$Ax = b \quad (3)$$

A forgácsolási hőmérséklet eloszlását a munkadarab - a forgács és a forgácsoló-szerszám térben a 4. ábra mutatja.

3. ábra Von Mises-féle tényleges feszültség eloszlás: munkadarabban, forgácsban és szerszamban (MPa).

4. ábra. A munkázónában a forgácsolási (cutting) hőmérséklet eloszlása (°C). Jelölések: ψ - nyírási sík hajlásszöge; p_1 - elsődleges képlékeny deformációk övezete; p_2 - másodlagos képlékeny alakítások helye.

A rideg és kemény anyagok megmunkálásánál célszerű olyan technológiát alkalmazni, amely mellett képlékeny módon munkáljuk meg az anyagot. Ennek feltétele a rendkívül merev MKGS-rendszer (munkadarab-készülék-gép-szerszám rendszer) és a kritikus fogás-mélységnél kisebb fogás megvalósítása. Igen eredményes az elliptikus rezgéssel végzett esztergálás [3]. Az üveget így a legkönnyebb képlékeny módon megmunkálni (5. ábra). A fogásmélység kb. 15-ször lehet nagyobb a hagyományos eljáráshoz viszonyítva. Ezzel az eljárással $R_{max} = 30$ nm érdességet lehet előállítani, ami optikai minőségnek felel meg. Az eljárás további jellemzője, hogy gyémánttal lehet edzett acélt esztergálni; nem jön létre a jól ismert diffúziós kopás, mert a szerszám a rezgőmozgás miatt igen rövid ideig érintkezik a munkadarabbal.

5. ábra. Rideg és kemény anyagok elliptikus rezgéssel végzett esztergálása; M - munkadarab; Δy - a rezgetés miatt keletkező mikrogeometriai hiba; S - szerszám; C - forgács

6. ábra. Mikrofurók és mikromaró: a) Rövid csigafűrő; b) Kúpos lapos (lapát) fűrő; c) Félkör keresztmetszetű lépcsős fűrő; d) Félkör keresztmetszetű üreges mikromaró.

4.3. Mikroforgácsolás vizsgálata molekuláris dinamikai szimulációval

A forgácsolási folyamat vizsgálatának egyik módszere a kontinuum-mechanikából ismert végeselem-módszer (VEM). A végeselem módszer kutatásának tudományos iskolája a Miskolci Egyetemen Prof. Dr. Páczelt István akadémikus vezetésével alakult ki. Egy másik számítási lehetőség a mikroforgácsolás területén - $a_p \leq 1 \mu m$ nagyságrendű fogások esetén - az ún. molekuláris dinamikai szimuláció (MDS). Ennek részeredményei [13] publikációnkban (szintén e kötetben) találhatók. Az MDS-hoz, illetve a mikroforgácsolás erő és energia igényének meghatározásához ion-egy kristály potenciális energiáját kell kiszámolni. Ennek elméleti alapjai röviden a következők. Az első közelítésben az ionokat pontszerű töltéseknek képzeljük el. Két pontszerű Q_i és Q_j nagyságú töltés között fellépő Coulomb-féle vonzóerőt (tasztítóerőt) figyelembe véve a kölcsönhatás potenciális energiája:

$$E_{pot\,ij}^* = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \frac{Q_i \cdot Q_j}{r_{ij}} = \frac{1}{k} \cdot \frac{Q_i \cdot Q_j}{r_{ij}} \quad (4) \text{ és } (5)$$

ahol: ϵ_0 - permittivitás, abszolút dielektromos állandó (pld. NaCl ionkristálynál:

$$8,85416 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm});$$

ϵ_r - relatív dielektromos állandó (esetünkben: 1);

Q_i - az i -edik ion töltése [pld.: $Q_i = Q = 1,6021917 \cdot 10^{-19} \text{ As}$];

Q_j - j -edik ion töltése (pld.: $Q_j = -Q = -1,6021917 \cdot 10^{-19} \text{ As}$);

r_{ij} - az i -edik és j -edik ponttöltések (ionok) közötti távolság (pld.: $2,81 \cdot 10^{-10} m$);

k - arányszám (pld.: $1,1126466 \cdot 10^{-10} \text{ As/Vm}$).

Az i -edik ion potenciális energiáját a következőképpen számíthatjuk:

$$E_{pot\,i} = \sum_j E_{pot\,ij} = \sum_j \left(\frac{\lambda}{r_{ij}^n} \pm \frac{1}{k} \cdot \frac{Q^2}{r_{ij}} \right) \quad \text{és} \quad r_{ij} = p_{ij} \cdot R \quad (6)$$

ahol:

R - alapesetben az R_0 rácsállandót jelenti,

λ - kristályszerkezettől függő arányossági tényező,

n - kristály merevségére jellemző szám,

$Q = Q_i$ - az i -edik ion töltése,

k - arányszám.

Az r_{ij} -t behelyettesítve és átalakítva kapjuk, hogy:

$$E_{pot\,i} = \frac{\lambda}{R^n} \cdot A - \frac{1}{k} \cdot \frac{Q^2}{R} \cdot \alpha \quad (7)$$

ahol:

$$A = \sum_j \frac{1}{p_{ij}^n} \quad \text{és} \quad \alpha = \sum_j (\mp) \frac{1}{p_{ij}} \quad (8)$$

$$E_{pot\,i} \Big|_{R=R_0} = -1,28 \cdot 10^{-18} \text{ J} \quad (9)$$

vagyis az NaCl kristályrácsban egy ion potenciális energiája: $-1,28 \text{ E-}18 \text{ J}$. Az α az ún. Madelung-állandó, amelynek NaCl-ra az értéke: $\alpha = 1,747558$

A vizsgálataink alapján mindössze annyit jegyzünk meg, hogy az ionok potenciális energiáját leíró függvény Madelung-állandója nagyon lassan konvergál és ez komoly nehézségeket okoz a szimuláció során. A Madelung-állandó (előjele, nagysága) nagymértékben függ a szimuláció során figyelembe vett azonos és ellentétes töltésű közvetlen és távolabbi szomszédok számától. Az MDS szimulációhoz szükséges ionok számát és számítógépi futtatások eredményeit a [13] dolgozat tartalmazza.

4.4. A mikrofúrás pontossága és a szerszámkihajlás

A kisméretű és nagy pontosságú alkatrészek (pl. fűvókák) forgácsolása különleges kihívást jelent a szerszámgyártóknak és technológus mérnököknek. A fontosabb követelmények a következők:

- megfelelően nagy forgácsolósebesség biztosítása;
- szerszám radiális ütésének, ill. kihajlásának minimalizálása;
- kellően nagy szerszámmerevség,

illetve ezekkel összhangban kidolgozott technológia.

A kis szerszámtérkékből ($d_s = 1 \dots 0,1$ mm) következik a magas fordulatszám igénye, ami akár $n = 10^4 \dots 2 \cdot 10^5 \text{ min}^{-1}$ nagyságrendű is lehet, amire megfelelő megoldások megszülettek (pl. légturbinás hajtás). A 6. ábra különböző mikrofúrákat és egy jellegzetes mikromarót mutat. Fúrásnál állandó keresztmetszetű forgács folyamatos leválasztása történik. Jó közelítéssel a forgácsolóerő nem változik. A megmunkálás pontosságát és a furat helyzetpontosságát a szerszám kihajlása határozza meg. A szerszám szár (amit befogunk) jóval nagyobb átmérőjű, mint a forgácsoló rész és azzal egy felfogásban gyártják.

A szerszám kihajlása, különösen akkor, ha központfúrás, ill. szerszámvezetés nélkül kell dolgozni, sajátos helyzetet teremt. A szerszám csúcsára ható F oldalirányú erő (pl. excentricitás vagy keresztí asszimetria) miatt kihajlás következik be, ami pontosság rovására megy, illetve szerszámtörést okoz. A feladat kezelhetőségét a következő mechanikai modell, illetve számítások adják. Egyik végén mereven befogott $L_s = L$ kinyúlású fúróra F oldalirányú erő hat, aminek hatására a szerszám rugalmasan deformálódik. A rugalmas szálát

$$y'' = \frac{F(L-x)}{I \cdot E} = \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (10)$$

másodrendű differenciálegyenlettel adhatjuk meg. Feltevéseink: A koordináta rendszer x tengelye megegyezik a fúró tengelyével és a koordináta rendszer origóját a befogás helyére vettük fel. A szerszám állandó keresztmetszetű homogén rúdnak fogható fel, annak másodrendű inerciája I és E az ún. Yung-féle rugalmassági modulusa ismert. A differenciál-egyenletet kétszer integrálva megkapjuk az általános megoldást:

$$y' = \frac{F}{IE} \left(Lx - \frac{x^2}{2} \right) + C_1 = \frac{dy}{dx}, \quad (11)$$

$$y = \frac{F}{IE} \left(L \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) + C_1 x + C_2. \quad (12)$$

Az $y(0) = 0$ és $y'(0) = 0$ kezdeti feltételek behelyettesítése után $C_1 = C_2 = 0$ adódik, tehát a keresett partikuláris megoldás:

$$y = \frac{F}{IE} \left(L \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right). \quad (13)$$

A szerszám végén (csúcsánál) a kihajlást $x=L$ helyettesítéssel kapjuk:

$$y(L) = \frac{F}{IE} L^3 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{6} \right) = \frac{FL^3}{3IE}, \quad (14)$$

és az α szögelfordulás irántangense:

$$y'(L) = \frac{F \cdot L^2}{2IE} = \operatorname{tg} \alpha \quad (15)$$

összefüggésből számítható. Az előző (8) összefüggés ultraprecíziós esztergálásnál a szerszám lehajlásának számításához is alkalmas.

4.5. A mikromarás pontossága és a fellépő rezgések

A mikromarásnál változó forgácskereszt-metszetek szakaszos leválasztása történik. E miatt a forgácsolóerő változik, bonyolult dinamikai viszonyok alakulnak ki, amelyek szerencsétlen technológiai adatválasztás esetén rontják a megmunkálási pontosságot és felületminőséget, illetve fokozott szerszám-kopást, esetleg szerszámtörést okoznak. A marás dinamikáját a következő állandó együtthatójú, másodrendű, inhomogén differenciálegyenlet írja le:

$$F(t) = m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + ky = my'' + by' + ky, \tag{16}$$

ahol $F(t)$ marás erőfluktuációjából származó erőfüggvény; m -a rezgő szerszám tömege, b - csillapítás; k - rugóállandó. Az előző differenciálegyenlet megoldása attól függ, hogy a valós MKGS-rendszer a) erős; b) gyenge csillapítású; vagy c) az ún. aperiodikus határesetnek felel meg. A számításokat mérésel, rezgékép felvétellel kell ellenőrizni vagy korrigálni. Itt erre terjedelem hiányában nem térek ki. A mikromarást kisméretű, acélból készült mikrofröccsöntő szerszámok egyedi és kissorozatban történő megmunkálásánál gazdaságosan lehet alkalmazni. A mikromarók anyaga igen finom szemcsés keményfém. A finom szemcseméret magyarázza a hagyományos keményfémeknél nagyobb keménységet, szívósságot és élszilárdságot.

4.6. A mikroforgácsolás kötött szemcsézetű abrazív szerszámokkal

A nagy pontosságú megmunkálás olyan szerszámok alkalmazását igényli, amelyek képesek nagyon kis forgácsvastagságok leválasztására. Ha a forgács vastagsága kisebb, mint pl. $1\ \mu\text{m}$, a nyírófeszültségek mind a munkadarabban, mind a szerszámban meredeken megnövekednek és gyors szerszámkopást eredményeznek. Ennek oka az, hogy $1\ \mu\text{m}$ -nél kisebb fogásmélység esetén (7. ábrán a 4. jelű pontok) a forgácsoló erőnek, a nagyon nagy értékű kristályatomok közötti kötőerőket kell legyőznie. Ez a pont, amikor általában az egyéltű szerszámmal végzett forgácsolásról áttérünk a köszörülésre, amelynek során finom szemcsézetű abrazív anyagot használunk azért, hogy kezdetben nagyobb forgácsot távolítsunk el, de a további megmunkálás során azonban a munkadarabról egyre finomabb forgácsokat válasszunk le.

7. ábra. A h_f forgácsvastagság és a k fajlagos forgácsolási ellenállás kapcsolata különböző technológiák esetén: 1 - szakítóvizsgálat; 2 — esztergalása; 3 - dörzsölés, finomesztergalás; 4 - köszörülés, dörzsköszörülés.

A fokozott pontosság kielégítésére a köszörülőgépeknél megjelentek a hidrosztatikus csapágyazás mellett a légcsapágyazások, illetve olyan főorsók, melyek kis hőtágulású anyagból készülnek. A légcsapágyazott orsóknál - konstrukcióból adódóan - a radiális és axiális ütést $0,05\ \mu\text{m}$ alá szorították. A főorsóra közvetlenül csatlakozó gyémánt- vagy CBN-szemcsézetű köszörűkorong közvetlen kapja a hűtő-kenő folyadékot (8. ábra). A legújabb fejlesztésű, nagymerevségű köszörűgép Japánban készült, amely 400 mm átmérőjű szilícium lapok egyszerre, kétoldalon történő köszörülését végzi. A síktól való eltérés kisebb mint 100 nm (9. ábra). A két korongos köszörűgép (Double Disk Grinder) tervezési koncepciója teljesen újszerű: ötszögletű keresztmetszetű ággal-, ill. háromszög merevítéssel készül [3]-

8. ábra. Légcsapágyazású köszörűorsó részlete a fazékalakú gyémánt, vagy CBN köszörűkoronggal és a hűtő-kenő folyadék bevezetése: 1 - radiális csapágyazás; 2 - axiális csapágyazás; 3 - kis hőtágulású köszörűtengely; 4 - köszörű-korong; 5 - köszörűkorong gyémánt szemcsés működő része.

9. ábra. Szilíciumlemez megmunkáló nagymerevségű, kétkorongos köszörűgép: 1 - ágy; 2 és 4 - hasáb alakú vezetékek „V” hornyokkal; 3 - szegnyereg az egyik köszörűkorong hajtással; 5 - merevítő; 6 - gerenda; 7 - másik köszörűkorong és hajtása; 8 - munkadarab.

4.7. Szabad szemcsékkel végzett csiszolás

A köszörű korongok az anyagleválasztáshoz nagy fajlagos energiát használnak fel, miközben lokálisan nagy hőmérséklet keletkezik; a vágóélek az előálló nagy mechanikai feszültség és hőfok miatt gyorsan kopnak, valamint elkerülhetetlen a munkadarab felületi és közvetlenül a felület alatti rétegének a sérülése. Ezért kemény anyagokhoz rugalmas tükrösítést és fényesítést (leppelés és polírozás), az ún. „szabad szemcsékkel végzett köszörülést” használják egyre szélesebb körben. Ezt a rendszert úgy is hívják, hogy rugalmas-emissziós megmunkálás, amelynek során a részecskeeltávolítási (leválasztási) folyamat nagyon kicsiny, atomnyi méretű is lehet [9]. Egy poliuretán golyó vagy henger forog és a körülvevő folyadékban finoman szuszpenzált csiszoló szemcsék (méretük 10 nm alatti) felgyorsulva érintőlegesen nekiütköznek a munkadarab anyagának és ezáltal nagyon kis részecskéket távolítanak el. Jellemző adatok: a síklapúság 0,1...0,05 μm , emellett a sérült felületi réteg csupán néhány nanométer mélységű. A módszer nagyon alkalmas kemény, sík kerámiafelületek szupersima, sérülésmentes polírozására.

5. NAGYPONTOSSÁGÚ KÜLÖNLEGES TECHNOLÓGIÁK

A nagypontosságú különleges (nem hagyományos) technológiák az utóbbi 20 évben tömegesen jelentek meg. Ezek teljes „lettára” helyett csak néhányat mutatok be.

5.1. A fotomaratás

A fotolitográfia olyan módszer, amely nagyon hatékony lehet mikrotechnikai alkatrészek, mint pl. tintaszóró fúvóka vagy miniatűr nyomásérzékelő (10. ábra) előállítására. Ez a technológia a szilícium anizotróp maratásán alapul.

10. ábra. Fotomaratással készült mikro-nomásérzékelő: 1 - szilícium lemez; 2 - diffúzióval felvitt fém ellenállásréteg; 3 - üveg-olvadék kötések; 4 - fém alap lemez; p_r - referencia nyomás; p_x - mérendő nyomás.

11. ábra. Ion-sugaras megmunkálás.

5.2. Energiasugaras eljárások

A nanotechnológiák tartományában sok szuperpontos megmunkálás az energiasugaras eljárásokon alapszik, amelyek egyaránt képesek anyagleválasztásra és -felvitelre. Az ionsugaras megmunkálás különösen említésre méltó módszer, amely lényegében „atomi méretű” beavatkozással dolgozó eljárás. Az ionsugár mágneses tekercsekkel (optikával) jól irányítható. A 11. ábrán az inert-ion eljárást láthatjuk (pl. argon ion, más inert gázt is használhatunk), amelyek $U=10$ keV nagyságrendű kinetikai energiaszintre gyorsítunk. A munkadarab felületét atomokkal bombázzuk és erodáljuk, amelyek hatásukat összekapcsolódással és eltávozással (emisszió) fejtik ki. Ezt a jelenséget „ion porlasztás”-nak („ion sputter”) nevezik. Az $U=1$ keV melletti ion behatolást az elektron-diffrakciós jelenség alapján lehet becsülni kb. $5\text{ }\mu\text{m}$ -re. Az eljárás nem okoz elviselhetetlen mértékű hőkeletkezést, sem lényeges sérülést a felületi rétegben. Bizonyos mennyiségű argonion a munkadarab atomjainak helyébe lépve visszamarad. Ez az eljárás kb. 10 nm -es megmunkálási lépcsőt eredményez.

Nagypontosságú megmunkálás céljaira az energiasugaras eljárásokat az alábbi területeken használják: üveglencsék aszferikussá tételére, lencsék keményfém öntőmintáinak kialakítására; gyémánt rovátkoló szerszámok élesítésére; gyémánt mikrotom (szeletvágó) kések és forgácsoló szerszámok éleinek megmunkálására; miniatűr piezo-mozgatók kialakítására; mikrorugalmas csapágyak gyártására; miniatűr hullámvezetők készítésére; optikai diffrakciós rácsok felvitelére; integrált áramkörhöz rajzolatmaratásra; buborékmemória magok létrehozására, stb.

Az utóbbi három alkalmazás esetén egy mintamaszkot helyeznek a munkadarabra, így ultrafinom rajzolatot érnek el. A legújabb kutatási eredmények lehetőséget biztosítanak ultraprecíziós mikrorajzolatok közvetlen felvitelére nagyon kicsiny két- és háromdimenziós munkadarabokon.

5.3. Egyéb különleges eljárások

Ezek közül két területet emelek ki. Egyik atomokból építkező eljárás: epitaxiális kristálynövesztés, a másik az ún. nanostencilezés. Az atomi méretű, „építő” eljárások az epitaxiális kristálynövesztési módszerek. Néhány energia-anyagsugárnak kiválogatott anyagfajtákkal való kombinációja révén szabályozott módon lehet előállítani ilyen szuperrácsú kristályokat, amelyeket szabályozott elektron energiakötés tart fenn. Az ilyen típusú új szintetikus anyagok egészen rendkívüli szuperrács konstrukciójukak lehetnek. A méretük nagyságrendje egy atomrétegtől $0,3\text{ mm}$ -ig terjed. Az eljárás fő szakaszai: epitaxiális kristálynövesztés, molekuláris sugár-eljárás, ionsugár betáplálás (ion-implantáció) és ionsugaras eltávolítás. A PVD és CVD (Physical/Chemical Vapour Deposition) eljárás különféle filmszerű bevonatok (pl. TiC, TiN, gyémánt, CBN) felvitelét teszi lehetővé. A PVD eljárás egyik válfaja az ún. nanostencilezés. Ennek a, b, és c, munkafázisait a 12. ábra szemlélteti.

12. ábra. Mintakészítés párologtatással: ún. nanostencilezés: 1 - alakzattal kiképzett nyílások a szilíciumnitrid maszkon; 2 - hordozó alaplemez; 3 - párologtatott fémgőz; 4 - felvitt, lecsapódott anyag; Fázisok: a) pozicionálás; b) párologtatás, ill. lecsapódás; c) kész nanostencilezett áramkör.

5.4. A megmunkálhatóság

A megmunkálhatóság, amely a hagyományos technológiában a forgácsolandó anyagtól erősen függ, szinte szóba sem kerül a nem hagyományos, villamos, termikus vagy kémiai energiát alkalmazó megmunkáláskor. A nem hagyományos eljárások normál esetben nem váltanak ki olyan nagy erőhatásokat, amelyek a vékony vagy törekeny alkatrészeket tönkretennék. A felületi rétegben általában nem marad jelentős húzó-maradó feszültség, ami alacsony kifáradási élettartamot okoz.

6. KÖVETKEZTETÉSEK

A nanotechnológiával kapcsolatos kilátások, a jövőbeni fejlődés-, és a piacok rendkívül biztatóak. Számos piac-elemző előretekintés bizonyítja ezt. Az elemzések trendje teljesen egyértelmű. A rendkívül erős a törekvés a miniaturizálásra, az alacsonyabb költségekre, a nagysorozat- és a tömeggyártásra. Nagyon sok gépen és rendszerben keveredik a nano-, mikro-, és makro értelemben vett technológia, illetve megoldás.

A termék konstrukciós tervezése, az anyag, a megmunkálási eljárás kiválasztása és a technológiai tervezés - természetesen - összekapcsolódik. A kutatás, a tervezés, a gyártás és az üzemeltetés szorosan összefügg az egyetemi képzéssel. A nanotechnológia multidiszciplináris tudást követel a tudósoktól és a mérnököktől, ami igen fontossá teszi az oktatást ezen a téren. Mivel az ismereteken túlmenően a jártasság is nagyon fontos, ezért az oktatás csak multidiszciplináris posztgraduális tanfolyamok keretében lehet sikeres. A megfelelő képzése a fiatal fizikusoknak, matematikusoknak, kémikusoknak, anyagtudósoknak, biológusoknak és mérnököknek nagyon fontos, mert csak így biztosítható az ipar számára a folyamatos nanotechnológus utánpótlás. Fontos, hogy a fiatal tudósok és mérnökök oktatásának és a gyakorlati ismeretek megszerzésének helye, megfelelő infrastruktúrával legyen ellátva.

Egy aktuális „nano-gépészeti” hírrel zárom dolgozatomat: az eddig ismert legkisebb pörgettyűt - elektromechanikus rotort - állították elő a Berkeley Kalifornia Egyetemen. A pörgettyű lapátjai kétezerszer kisebbek, mint a hajszál átmérője, anyaga arany. A pörgettyű tengelye dupla falú szén nanocső. Változó feszültség keltette forgó mágneses tér hatására nagy fordulatszámmal forog. A fejlesztést Alex Zettl professzor vezeti [14]. Egyelőre ez az ilyen legkisebb forgó szerkezet, ami a nanotudomány egyik termékét a grafitból készített szén nanocsövet használja. Hol használható az ilyen nano-gép”? Valószínűleg igen meglepő alkalmazásai lesznek az űrhajózáson és repülésen túl a gyógyászatban is.

A kutató-fejlesztő munkát pályázati úton elnyert OTKA támogatással végezzük. OTKA nyilvántartási számok: T030668 és F019105.

IRODALOM

- [1] Taniguchi, N.: **Current status in and future trends of ultraprecision machining and ultrafine materials processing**. Annals of CIRP, 1983. 32(2) pp.573-582.
- [2] McKeown, P.A.: **High precision manufacturing and the British economy**. The Institut of Mech. Eng. Proceedings 1986. Vol.200. No.76. 19p.
- [3] Corbett, J. - McKeown, P.A. - Peggs, G.N. - Whatmore, R.: **Nanotechnology: International developments and emerging products**. Annals of the CIRP, 2000. 49(2) pp.523-545.
- [4] Gyulai József: **Nanotudomány és nanotechnológia- elvárások és várakozások**. Testing 2003. Szeminárium, Budapest, 2003.09.08-09. (előadás).
- [5] Szabó Bertalan: **Braun mozgás vizsgálata**. Fizikus szakdolgozat. Pázmány Péter Tudomány Egyetem, Budapest, 1935.
- [6] Dudás Illés: **Gépgyártástechnológia III**. Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 2003.
- [7] Szabó Ottó - Tajnafői József: **Befejező finomforgácsoló szerszám és eljárás sokszög-, ellipszis-, kör- és egyéb vezérgörbéjű henger-felületek befejező finommegmunkálásához**. OTH 190840 lajstromszámú szabadalom. Tulajdonos: NME. Bejelentés napja: 1983.05.16. Budapest.

- [8] Szabó Ottó: **Optimisation of technology and „quasi honing” of polygon bores.** Journal of Materials Processing Technology. Publied by Elsevier Science B.V., Dublin, 2001. 119. pp.117-121.
- [9] Szabó Ottó: **Ultraprecíziós gyártás - nagypontosságú konstrukció.** Géptervezők IX. Országos Szemináriuma, Miskolc, MAB, 1993.09.30-10.01. GTE-MEGET-MAB kiadvány I. pp.134-139.
- [10] Szabó Ottó: **Installation of an ultraprecisional CNC lathe laboratory, ist accuracy and application.** Mechatronics, Pergamon Press, Oxford, 1993.3. pp.215-219.
- [11] Szabó Ottó: **Ultrapontos termékek gyártásához optimális környezeti feltételek tervezése.** Gép, 2002. LEI. 8-9. pp.23-27.
- [12] Szabó Ottó - Zebala Wojciech: **Mathematical Modelling of Ultraprecision and Precision Turning and Experiments.** Advanced Methods and Manufacturing Systems. Hungarian-Polish Intergovernmental S and T Coop. Miskolc-Cracow, Sept. 2000. Pr.No.PI-11/97. Project Co-ordinators: prof. Dr. Dudás Illés and Prof. Dr. Gawlik Josef. Pp.13-17.
- [13] Szabó Ottó - Gurzó József: **Ion-kristályok megmunkálási folyamatának molekuláris dinamikai szimulációjához az ionszám meghatározás.** FMTÜ-2004. kiadványa. EME, Kolozsvár, 2003.03.26-27. 4p.
- [14] Fennimore, A. et al: **Rotational Actuators Based on Carbon Nanotubes.** Nature. 424. 24.07.2003.

Dr. Szabó Ottó, C.Sc, PhD., egyetemi docens
 Miskolci Egyetem Gépgyártástechnológiai Tanszék.
 3515. Miskolc-Egyetemváros
 Telefon: (46)565-111/15-21; E-mail: ggvtso@gold.iini-miskolc.hu