

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Gyártástudomány és –technológia Tanszék

# **Kutatási beszámoló**

**Nanoszerkezetű anyagok forgácsolási tulajdonságainak és  
felületintegritásának vizsgálata**

**Nyilvántartási szám:** K 62762

**Témavezető:** Dr. Mészáros Imre, egyetemi docens

Budapest, 2009. július

## TARTALOMJEGYZÉK

<b>1. BEVEZETÉS.....</b>	<b>3</b>
<b>2. ULTRAFINOM SZEMCSÉS PRÓBATESTEK ELŐÁLLÍTÁSA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. A szemcsefinomodás hatása.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Ultrafinom és szubmikronos szemcseméretű próbatestek előállítás.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2.1. OFHC-réz.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2.2. Ultrafinom és nanoszerkezetű acél.....</b>	<b>6</b>
<b>3. MIKRO-FORGÁCSOLÁS ELMÉLETI MODELLJE.....</b>	<b>9</b>
<b>4. A MIKRO-FORGÁCSOLÁSI KÍSÉRLETEK.....</b>	<b>13</b>
<b>4.1. Nanoszemcsés acél anyagok mikro-forgácsolása CBN és keményfém szerszámmal.....</b>	<b>13</b>
<b>4.2. Nanoszemcsés réz mikro-forgácsolása.....</b>	<b>18</b>
<b>5. ÖSSZEFOGLALÁS.....</b>	<b>25</b>

## 1. BEVEZETÉS

A K 62762 nyilvántartási számú, „Nanoszerkezetű anyagok forgácsolási tulajdonságainak és felületintegritásának vizsgálata” című kutatási projektet, a munkatervnek megfelelően hajtottuk végre. A vizsgálataink kiterjedtek az ultrafinom, „nanoszemcsés” OFHC réz és acél próbadarabok előállítására, forgácsolási vizsgálataira, valamint a forgácsleválasztás modellezésére. Elemzésünk során összehasonlító vizsgálatot végeztünk. A kutató munkánk ráépült a „Kristályos szerkezetű anyagok forgácsolási tulajdonságainak és felületintegritásának vizsgálata” kutatási témára. Az ott elért eredmények és tapasztalatok birtokában elsősorban arra voltunk kíváncsiak, milyen változásokat okoz a kristálméret csökkenése a felület topográfiájában és ezek a változások a forgácsleválasztási modellen milyen változtatásokat igényelnek. A próbadarabok anyagminőségének választását egyrészt az eredmények ipari felhasználhatósága indokolta, másrészt a forgácsolásukhoz alkalmazható szerszámanyagok lényegesen eltérnek egymástól. Így lehetőségünk nyílt az iparban gyakran használt acél anyagok mikro-forgácsolására. A réz próbatestek gyémánt egykristály éllel forgácsolhatók. Az acél próbatestek forgácsolására polikristályos szerkezetű él anyag áll rendelkezésre. A két különböző szerkezetű él anyag, az anyagleválasztás modellezésére nincs lényegesen eltérő hatással, ugyanakkor a felület topográfia kialakulásában lényeges eltérést figyeltünk meg. A gyémánt egykristály éllel előállított felület jól közelíti az elméleti, geometriai-kinematikai megfontolásokból levezethető felületi érdességet. Az elméleti érdességtől való eltérés, az anyag anizotrop tulajdonsága, a szerszám geometriai kialakítása, a gép mozgásegyenletessége és stabilitása, valamint egyéb technológiai tényezők hatása miatt keletkezik. Acél anyagok forgácsolására még nem áll rendelkezésünkre CBN egykristály, annak ellenére, hogy már több mint 15 éve sikeres kísérletet tettek előállítására. A polikristályos él anyaggal forgácsolt felület érdessége lényegesen eltér az elméleti érdességtől. Az okokat már több kutató is vizsgálta, de ez ideig általánosan elfogadható magyarázat nem született. Ugyancsak nem született általánosan elfogadott magyarázat a leválasztható legkisebb rétegvastagság nagyságának megállapítására sem. Kutató munkánk során, támaszkodva a korábbi kutatásaink eredményeire, mindkét problémára új tudományos eredménynek számító megállapításokat tettünk.

## 2. ULTRAFINOM SZEMCSÉS PRÓBATESTEK ELŐÁLLÍTÁSA

### 2.1. A szemcsefinomodás hatása

Kutatási munkánkban többek között a szemcseméret csökkenésének a hatását vizsgáltuk a forgácsolás útján megmunkált felületi minőségre vonatkozóan. Mivel a szemcseméret csökkenése teljesen új forgácsolási feltételeket teremt, ezért további célunk volt az ultrafinom- és szubmikronos szemcseméretű anyagok előállításának részletes vizsgálata, a szemcsefinomodás mechanizmusainak az elemzése is.

Korábbi kutatási munkáink keretében végzett forgácsolási kísérleteink során bebizonyosodott, hogy az ultraprecíziós esztergálással, valamint a mikromarással megmunkált felületek minőségét nagymértékben befolyásolja a megmunkált anyag szövetszerkezete, azon belül is hőkezeltiségi állapota, illetve átlagos szemcsemérete.

A korszerű acélokkal kapcsolatos fejlesztések egyik fő iránya a szemcseméret csökkentése. A mérnöki gyakorlatban számos elnevezésbeli besorolás létezik struktúrák, alkatrészek, rendszerek, megmunkálási eljárások, pontosságok nagyságrendjére vonatkozóan. Fémek anyagok szövetszerkezetének átlagos szemcseméret szerinti értékelése az alábbiak szerint történhet:

- Ultrafinom szemcsés anyagok: 1 – 5  $\mu\text{m}$
- Szubmikronos anyagok: 100 – 1000 nm
- Nanoszemcsés anyagok: < 100 nm

A szakirodalom, valamint korábbi tapasztalataink alapján az ultrafinom szemcsés, valamint a szubmikronos anyagok három fő, részben tényleges, részben pedig várható előnye a hagyományos szemcseméretű anyagokkal szemben az alábbiakban foglalhatók össze:

1. Szilárdságnövekedés a Hall-Petch féle összefüggés értelmében:

$$\sigma = \sigma_{i0} \cdot \frac{1}{\sqrt{d}},$$

ahol  $\sigma$  a folyási feszültség,  $k$  egyfajta szilárdulási együttható (a szemcsehatár ellenállása),  $\sigma_{i0}$  a diszlokációvándorlás megindításához szükséges kezdeti feszültség, valamint  $d$  a szemcseméret.

2. Magasabb hőmérsékleten fellépő szuperképlékenység lehetősége.
3. Megnövelt felületi minőség forgácsoláskor.

Meg kell jegyeznünk, hogy különösen nagymértékű szemcsefinomodás nyomán megváltoznak a hagyományos szemcseméretű anyagok esetében érvényes, szövetszerkezethez köthető mechanizmusok (pl. deformációs folyamatoké), illetve az azokat leíró anyagi törvények. Példaként említhetjük a Hall-Petch-féle összefüggés által szolgáltatott egyenes meredekségét. A szemcseméret és az anyag mechanikai tulajdonságai közötti kapcsolat jellege talán még fontosabb is, mint a tényleges méretbeli meghatározottság. Ennek megfelelően nanoszerkezetűnek akkor tekinthetünk egy fémek anyagot, ha annak valamely tulajdonsága 1  $\mu\text{m}$ -nél kisebb kristallit méret mellett már nem a szokásos szemcseméretű anyagokra érvényesnek talált összefüggéseket követi. Egy adott fém vagy ötvözet nanoszerkezetűnek értékelhető, ha a „ $\sigma$ ” – „ $d^{-1/2}$ ” koordináta rendszerben ábrázolt Hall-Petch-féle összefüggés egyenes vonala az 1  $\mu\text{m}$  alatti szemcseméret-tartománynál töréspontot, illetve eltérő meredekséget mutat a görbe korábbi szakaszához viszonyítva.

Az átlagos szemcseméret értékelésénél figyelembe kell vennünk azt a tényt, hogy a nagymértékű, de elsődleges alakítás hatására főként kisszögű szemcsehatárok keletkeznek. A kisszögű határok még csak ún. szubszemcséket hoznak létre a korábbi szemcsén belül, a

köztük lévő kis orientációs különbség még nem biztosítja teljes mértékben azokat a mechanikai tulajdonságokat, mint amelyek a nagyszögű szemcsehatárok által létrejött szemcsefinomodásnál érvényesek. Nagyszögű szemcsehatárról abban az esetben beszélünk, ha két szomszédos szemcse közötti orientációs különbség legalább 10-15°-os. Ezt a kritériumot is figyelembe véve tehát megfogalmazható, hogy nanoszerkezetű tömbi anyagokról csak akkor beszélhetünk, ha az 1 µm alatti „szemcséket” nagyszögű szemcsehatárok választják el.

Jelenleg nagyipari gyakorlatban a melegen hengerelt, nagyszilárdságú, mikroötvözött acélok szokásos szemcsemérete legfeljebb az 5 µm-es értéket éri el. Néhány speciális acéltípus esetében az 1-3 µm-es szemcseméret a jellemző (pl. az elsősorban felhőkarcolókban, tengerjáró hajókban alkalmazott HIAREST-acél, High Crack Arrestability Endowed Steel Plate, illetve a gépjárművek alvázaként alkalmazott Super-HSLA-acél, High Strength Low Alloy Steel).

## 2.2. Ultrafinom és szubmikronos szemcseméretű próbatetek előállítása

A forgácsolási kísérleteinkhez ultrafinom és szubmikronos szemcseméretű anyagokat állítottunk elő intenzív képlékeny alakítással, valamint ezt kiegészítő hőkezelési eljárással. Kísérleti anyagként OFHC (oxygen free high conductivity) réz és 0,1%C-Mn acél szolgáltak. Ha az ipari vagy a tömegszerű gyárthatóság igényét is szem előtt tartjuk, akkor főleg azok az eljárások jöhetnek szóba, amelyeknél a kiinduló anyag is tömbi anyag.

### 2.2.1. OFHC-réz

Az OFHC-réz nagymértékű képlékeny alakítása könyöksajtoló berendezéssel történt (2.1. ábra). Az így nyert próbatetek, valamint a kiinduló, 16 mm átmérőjű, kör keresztmetszetű próbatest képe az 2.2. ábrán látható. A könyöksajtolás (ECAP – Equal Channel Angular Pressing) során általában kör vagy négyzet keresztmetszetű rúd anyagot sajtolnak át egy olyan szerszámon, amely két, egymásra merőleges csatornából áll. Az eljárás egyik előnye az, hogy a kiinduló anyag is tömbi anyag, így az ipari vagy a tömegszerű gyárthatóság igénye is előtérben marad. Az ECAP módszer alkalmazásával nem csak az volt a célunk, hogy a forgácsolási kísérleteinkhez megfelelően finom szemcsés anyagot állítsunk elő, hanem hogy megértsük a nanoszerkezetű tömbi anyagok előállítása során lejátszódó fémtani folyamatokat is.

Könyöksajtolásakor az első átsajtolási művelet meghatározó a végső szemcseméret szempontjából. Az első átsajtoláskor alakul ki az a jellegzetes elsődleges, illetve másodlagos lamináris szubszerkezet, amiből aztán a későbbi műveletek, illetve hőkezelések során nagyszögű szemcsehatárokkal elválasztott szemcseszerkezet fejlődik. Ha a kezdeti réteges szerkezet egyszer már kialakult, a rétegek közötti távolság viszonylag állandó. Az alakváltozás mértékének növekedésével ez a szerkezet alig finomodik tovább. Az átsajtolási művelet során a szövetszerkezeti változások a két, egymásra merőleges csatorna találkozási zónájában játszódnak le. A tartományt merőlegesen elválasztó középvonal az ún. fő nyírási sík. Az átsajtolás utáni elnyújtott lamináris szubszerkezet irányítottága közel párhuzamos a fő nyírási síkkal. A fő nyírási síkban fellépő nyírás ugyanis a korábbiakon túl olyan további csúszási síkokat aktivál, amelyek orientációja hasonló, mint a fő nyírási síké. Ha egy szemcsében a fő nyírási sík elérése előtt az aktiválódott csúszási rendszer a szemcse kiinduló orientációjától függően nagyobb szöveget zárt be a fő nyírási síkkal, akkor a sík elérésekor megváltozik az adott szemcse csúszási intenzitása. Ez az eset sokkal hatékonyabb a szemcsefinomodás szempontjából, mint az olyan kiinduló szemcsék esetében, ahol a kezdetben aktiválódott csúszási rendszer csak kis szöveget zár be a fő nyírási sík irányával. A fő

nyírási sík elérése előtt keletkezett elnyújtott lamináris szubszerkezetet az újonnan aktiválódott csúszással párhuzamos lamináris szubszerkezet feldarabolja, szegmentálja.

Az első átsajtolás során kialakult jellegzetes szövetszerkezet TEM felvétele a 2.3. ábrán látható, míg az ezt követően, az újrakristályosodás hőmérsékletén hőkezelt próba szövetének TEM felvételét a 2.4. ábra mutatja. A könyöksajtolás nyomán a próbatest mikrokeménysége 120 HV100, volt, ami a hőkezelés után 60-70 HV100 értékre csökkent.

Az elkészített próbatestek az esztergálási kísérletekhez:

<i>Sorszám</i>	<i>Jelzés</i>	<i>Anyag</i>	<i>Alakítás</i>	<i>Hőkezelés</i>
1.	ME1	OFHC	1x ECAP	-
2.	ME2	OFHC	-	-
3.	ME3	Elektróda réz	1x ECAP	-
4.	ME4	OFHC	1x ECAP	300°C, 2 óra
5.	ME5	OFHC	1x ECAP	320°C, 1 óra

### 2.2.2. Ultrafinom és nanoszerkezetű acél

A C-Mn-acél szemcsefinomításához a próbadarabokat előzetesen nagy hőmérsékletre leedzettük (1000°C-ról), amely után a szövetet léces martenzit alkotta. A nagy edzési hőmérsékleten kialakuló eldurvult ausztenites szövet következtében az ötvözetlen szerkezeti acél edzhetőségének növekednie kell. Az edzési hőmérsékleten az ausztenit szemcsemérete 200 µm-nél nagyobb. Az így kialakított szövetszerkezetet laboratóriumi körülmények között hengerléssel alakítottuk 50%-os mértékben (2.5. ábra), majd hőkezeltük 550°C-on 1 órán keresztül. Az eljárás során azért érhető el 1 µm alatti szemcseméret a relatíve kis mértékű (0,8) képlékenyalakítás esetén is, mert a léces martenzites szövet önmagában is nagy diszlokációsűrűségű. Az edzés mintegy kiváltja a hidegalakítást. Ezt a megállapítást jól alátámasztják a TEM-es vizsgálatok, amelyek során a léces martenzites szövetben jól felismerhető, a hengerlési irányba elnyúlt diszlokációs cellák figyelhetők meg, kb. 100-200 nm-es átlagos szélességgel (2.6. és 2.7. ábrák).

Az 50%-os alakítás utáni állapot elektronmikroszkópos képe az 2.8., 2.9. és 2.10. ábrákon látható. Megfigyelhető a könyöksajtolási műveletnél tapasztaltakhoz hasonló elnyújtott lamináris szubszerkezet. Az alakítás hatására főként kisszögű szemcsehatárok keletkeznek, emellett nagy a szemcsén belüli diszlokáció-sűrűség.

Az alakítás után a próbadarabokat 550°C-on, 1 órás hőntartással megeresztettük. Az így nyert szövetszerkezet jellegzetességei a 2.11 és 2.12 ábrák TEM felvételén követhetők nyomon. Többek között teljesen és részben újrakristályosodott tartományok figyelhetők meg, a szemcsék sokkal inkább ekviaxiális jellegűek, mint a megeresztés előtti állapotban. A diszlokáció-sűrűség még mindig viszonylag nagy, de már nagyszámú olyan szubszemcse is található, amelyek mentesek a belső diszlokációktól.

A martenzites állapotból kiinduló technológia hatékonyságát azzal magyarázzuk, hogy a léces martenzitnek morfológiai szempontból háromszintű felépítése van: lécek, blokkok és csomagok. Az egyes ausztenit szemcséken belül ennek a morfológiai helyzetnek megfelelően a belőle keletkező martenzitben a blokkok és a kötegek között nagyszögű szemcsehatár jön létre. Ez a bonyolult szerkezet vezet hidegalakításkor a már röviden jellemzett deformációs szerkezethez, majd megeresztés után a finomszemcsés acél létrejöttéhez.

Az elkészített próbatestek az esztergálási kísérletekhez:

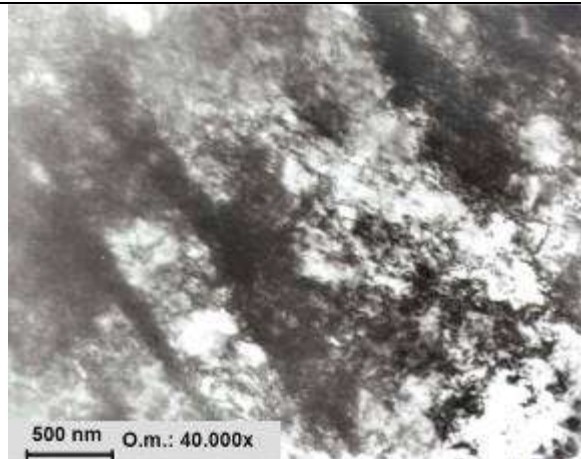
<i>Sorszám</i>	<i>Jelzés</i>	<i>Anyag</i>	<i>Alakítás</i>	<i>Hőkezelés</i>
1.	S3	0,1% C – Mn acél	-	-
2.	AK1	0,1% C – Mn acél	50% hengerelt	-
3.	AK3	0,1% C – Mn acél	50% hengerelt	500°C, 1 óra



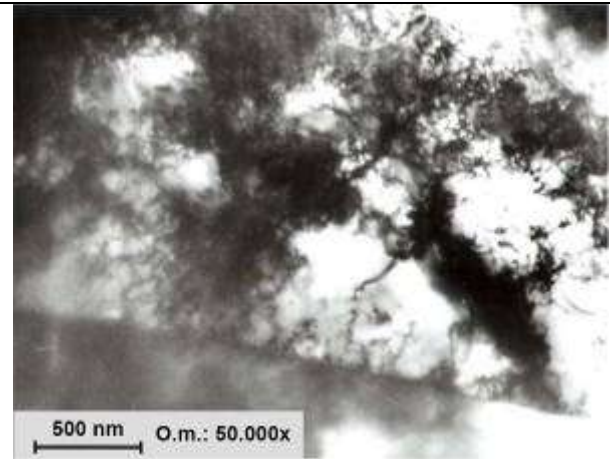
2.1. ábra. A kísérletekhez használt könyöksajtoló berendezés működés közben



2.2. ábra. Könyöksajtoló berendezésen egyszerűen átsajtolt OFHC-réz próbadarabok, valamint a kísérletekhez szolgáló, kiinduló rúd



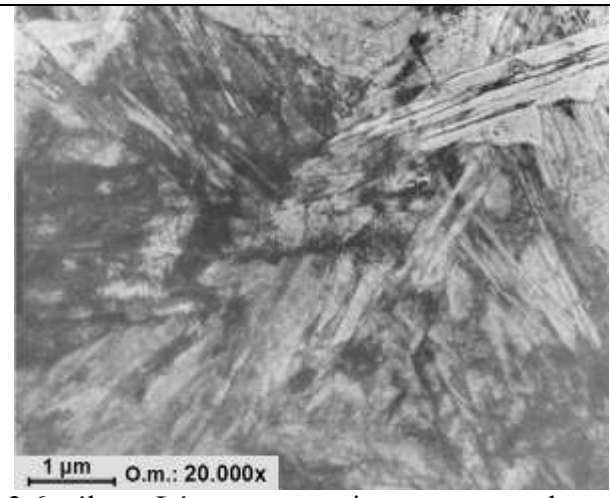
2.3. ábra. Egyszeresen átsajtolt OFHC-réz minta TEM-es szövetszerkezeti felvétele



2.4. ábra. Egyszeresen átsajtolt, majd hőkezelt OFHC-réz minta TEM-es szövetszerkezeti felvétele

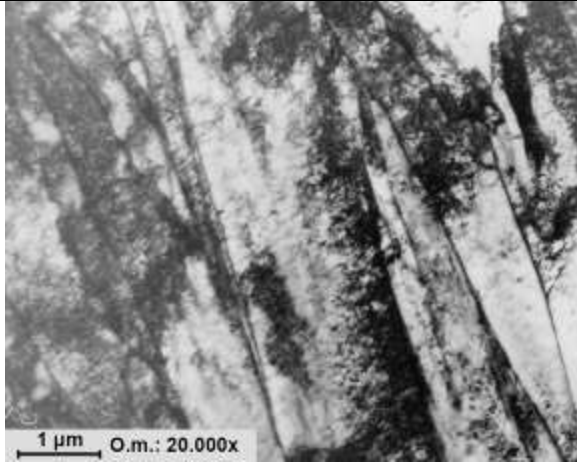


2.5. ábra. Laboratóriumi körülmények között végzett hengerlési kísérlet berendezése a különböző vastagságú,

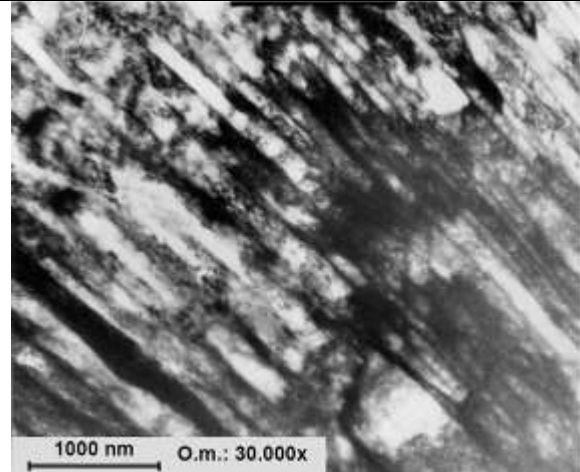


2.6. ábra. Léces martenzites szövetszerkezet TEM felvétele ötvöztelen acél nagy hőmérsékletéről történő leedzése után

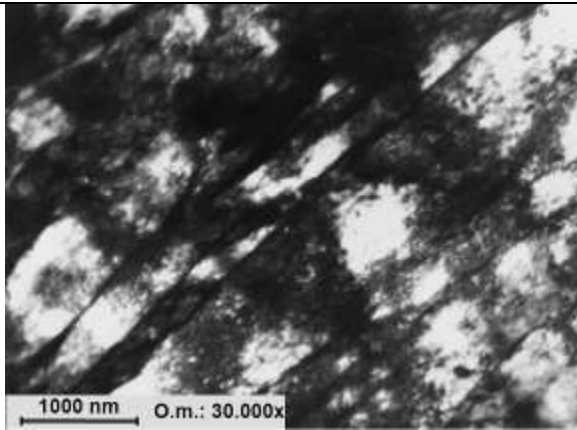
leedzett próbadarabokkal



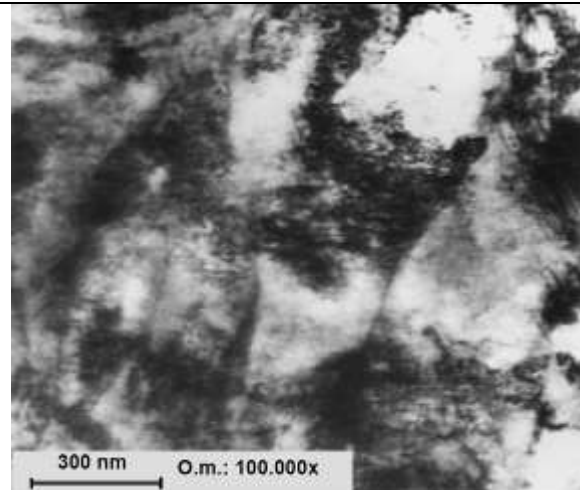
2.7. ábra. Léces martenzites szövetszerkezet TEM felvétele ötvöztelen acél nagy hőmérsékletéről történő leedzése után



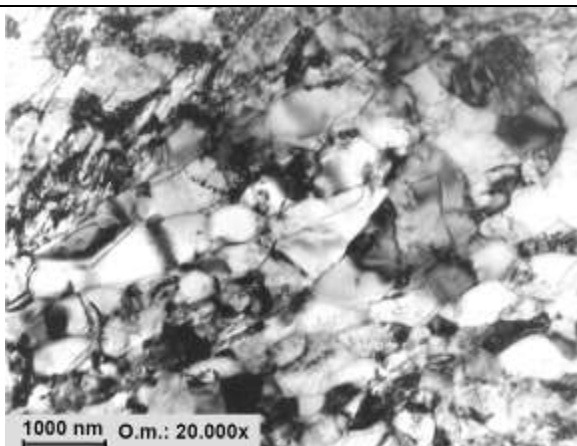
2.8. ábra. Az ötvöztelen acél szövetszerkezetének TEM-es felvétele 50%-os alakítás után



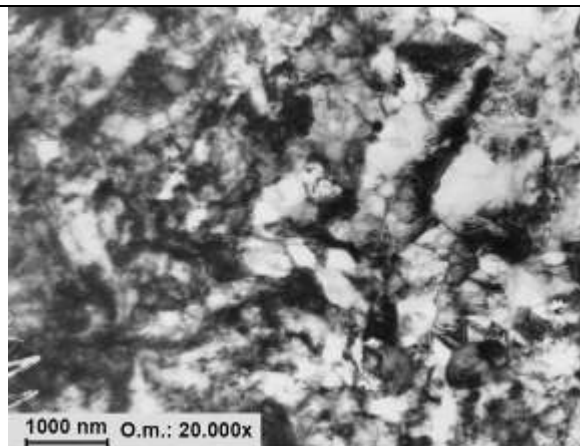
2.9. ábra. Az ötvöztelen acél szövetszerkezetének TEM-es felvétele 50%-os alakítás után



2.10. ábra. Az ötvöztelen acél szövetszerkezetének TEM-es felvétele 50%-os alakítás után



2.11. ábra. Az ötvöztelen acél szövetszerkezetének TEM-es felvétele 50%-os alakítás, valamint 550°C-ról végzett megeresztés után

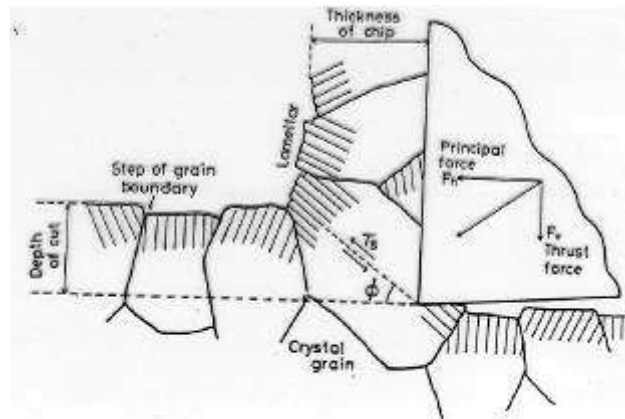


2.12. ábra. Az ötvöztelen acél szövetszerkezetének TEM-es felvétele 50%-os alakítás, valamint 550°C-ról végzett megeresztés után



### 3. MIKRO-FORGÁCSOLÁS ELMÉLETI MODELLJE

A napjainkban járatos gyártási eljárásokkal készülő kristályos szerkezetű **OFHC-réz** anyagok kristálymérete 100-500 mikrométer. Gyémánt egykristály éllel végzett forgácsolás esetén az alakítási zónában a forgácsvastagság lényegesen 1 mikrométer alatt van. A forgácstő mérete is 1 mikrométer alatti. A méretviszonyokat jól szemlélteti a 3.1. ábra. Kristályos szerkezetű anyag mikro-forgácsolásakor a fő alakváltozás egy kristályon belül játszódik le, az anyagrészek elcsúszása nem a nyírási síkban, hanem a csúszási síkokban történik. A csúszási síkok helyzete az éppen átvágott kristály orientációjától függ.



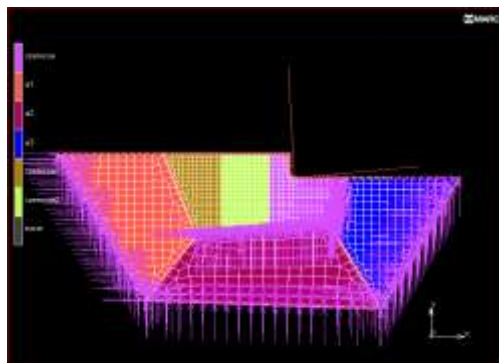
3.1. ábra: Mikro-forgácsolási folyamat modellezése (Moriwaki)

A „Kristályos szerkezetű anyag anizotrópiájának hatása mikroforgács leválasztásakor” kutatási téma keretében végzett vizsgálataink alapján bizonyítottuk, hogy az orientáció változásán túlmenően, a felület topográfiájának kialakulásában, a diszlokációk vándorlásának és az éppen átvágott kristályt körülvevő kristályok orientációjának is meghatározó szerepe van. A forgácsleválasztás modellje a 3.2. ábrán látható. A vizsgálatot MARC végeelem programmal végeztük.

Az analízis kiinduló adatai:

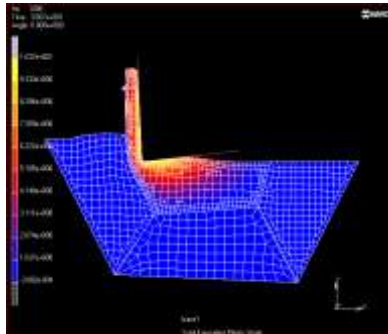
szerszámanyag:	gyémánt egykristály
anyagminőség:	réz ( <b>OFHC-réz</b> ),
fogásmélység:	$a = 0,01$ mm,
előtolás:	$f = 0,005$ mm/ford.
éllekerekítési sugár:	$r_\beta = 0,00005$ mm
Csúcssugár:	$r_\epsilon = 5$ mm

Az ábrán a különböző színek a különböző anyagtulajdonságokat, a különböző szemcséket jelölik.



3.2. ábra. Mikro-forgács leválasztás modellje MARC analízishez

Az analízis eredményét egyetlen ábra segítségével szeretnénk bemutatni. A 3.3. ábrán látható amint a szerszám él a kristályhatárt eléri. A szerszám hátfelületénél az anyag visszarugózik. A szerszám előtt és alatt a szomszéd kristályok deformálódnak. A színek a feszültségi állapot nagyságára utalnak.



3.3. ábra. Az analízis eredményének bemutatása

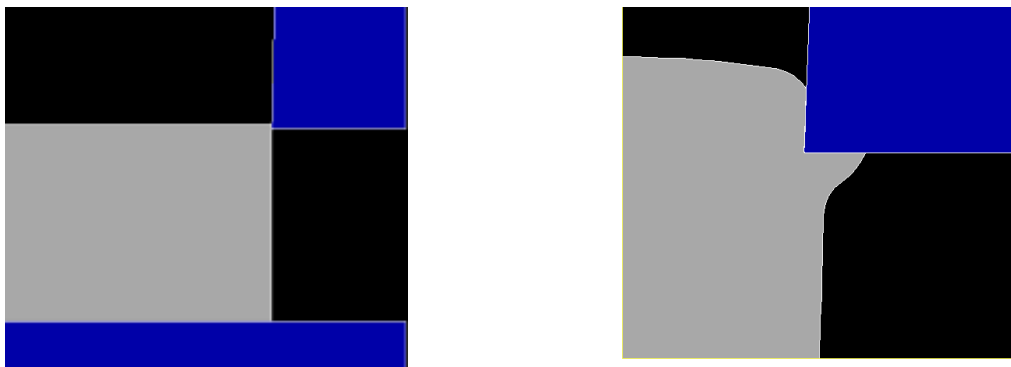
A kristályméretek csökkentésével a diszlokációs utak csökkennek, fokozatosan eltűnik keménységi különbség a kristály belseje és a szemcsehatár között. Amikor a szemcse mérete eléri a forgácsvastagság értékét, pontosabban a szemcse mérete a forgácsvastagság mérete alá csökken, a szerszám éle előtti alakváltozási zónában a kristályokon belüli csúszási síkok eltérő irányai miatt az alakváltozás eredőjét az elemi kristályok csúszási irányai határozzák meg. Ha a kristályméret lényegesen kisebb, mint a forgácsvastagság, a modellben a kristályszerkezet hatását elhanyagolhatjuk, kvázi amorf szerkezetűnek tekinthetjük. A modell így a nano-kristályos anyag forgácsleválasztási modelljének tekinthető.

A végeelem analízis bemenő adatai:

Fogásmélység:	$a = 0,01 \text{ mm}$ .
Előtolás:	$f = 0,005 \text{ mm/ford}$ .
Éllekerekítési sugár:	$r_{\beta} = 0,00005 \text{ mm}$ .
Csúcssugár:	$r_{\epsilon} = 5 \text{ mm}$
Homlokszög:	$\gamma = 0^{\circ}$ .
Anyagminőség: réz	<b>OFHC-réz</b> .
Szerszám anyag:	gyémánt egykristály

A szerszámot az analízisben végtelen merevnek tekintettük.

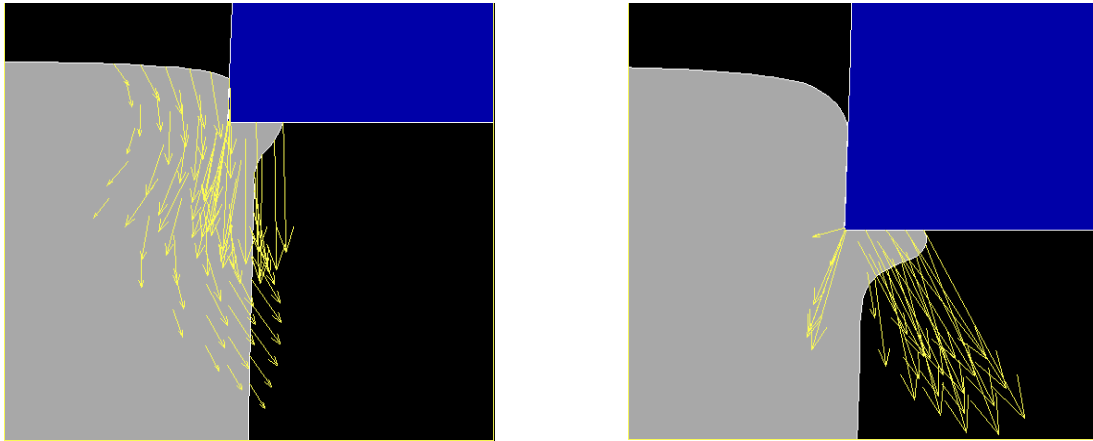
A folyamat kiinduló állapota a 3.4. ábra látható. Az ábrán a sötétkékre színezett (jobb felső sarok) a szerszám, a szürke a munkadarabot jelképezi. Az ábra alsó részén található kék mező, a befogó szerszámot szimbolizálja, amelyet szintén végtelen merevségűnek feltételeztünk.



3.4. ábra: Az analízis kiinduló állapota

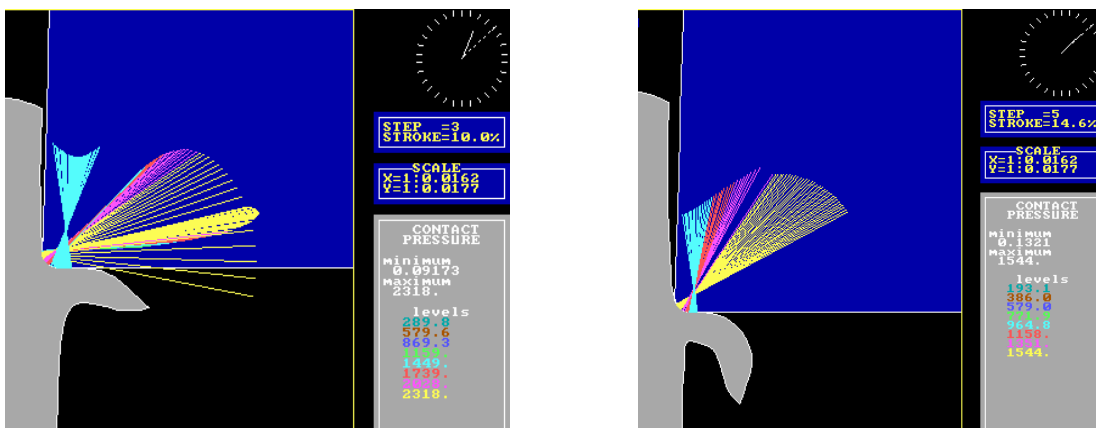
### Az alakváltozás sebességének alakulása

Az analízis során vizsgáltuk az alakváltozások irányát és sebességét. A 3.5. ábrán a nyilak nagysága, az anyagáramlási sebességével arányos, iránya az áramlás irányát mutatja. Az analízis lehetőséget ad a forgácsolt felületi réteg felkeményedésének, maradó feszültségi állapotának a vizsgálatára.



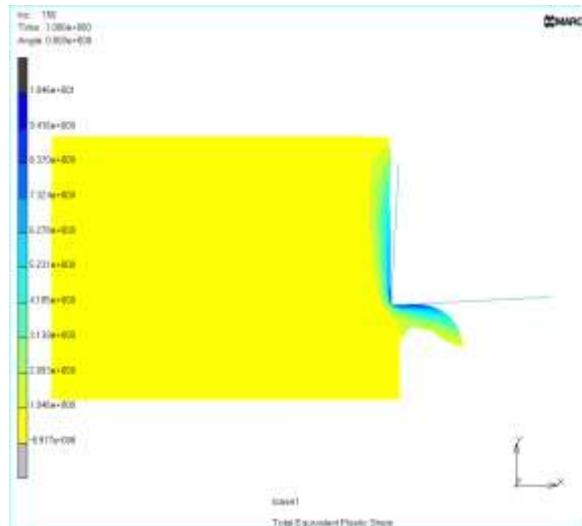
3.5. ábra: Alakváltozási sebesség alakulása

A 3.6. ábrán a szerszám hát- és homlokkfelülete előtt ébredő feszültségeket mutatják. A forgácsdoban uralkodó feszültségi állapotból a szerszám terhelése számítható. Az analízis alapján számított erők nagysága 1 Newton nagyságrendbe esik.



3.6. ábra: Szerszámon ébredő feszültség alakulása

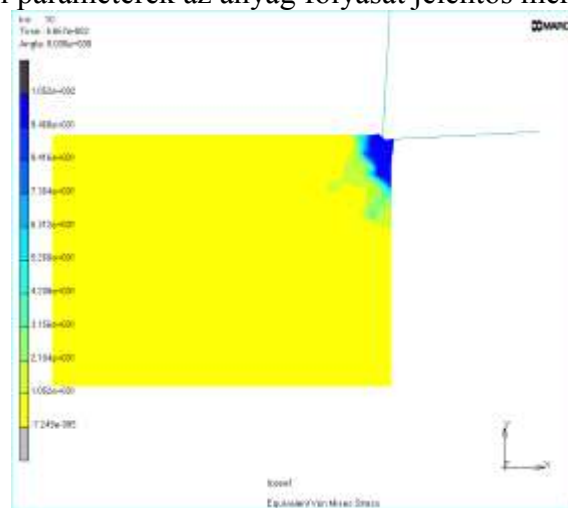
A szerszám élén, valamint az él környezetében (az anyagoldalon) fellépő feszültség nagyságát a 3.7. ábrán láthatjuk. A feszültség nagyságából az anyag rugalmas és képlékeny alakváltozása is számítható.



3.7. ábra: A feszültség alakulása a munkadarab anyagában

A 3.8. ábra a munkadarabban ébredő feszültségi állapotot mutatja a szerszám belépésének pillanatában. A modell és a végelemzés segítségével magyarázatot tudunk adni a mikro-forgácsoláskor tapasztalt jelenségekre. Például a sorja képződésre a szerszám be- és kilépési oldalán, az él kitöredezésére, stb.

A szerszám belépésekor az anyag kifelé, „visszafelé” folyik. A szerszám geometriai kialakítása és a forgácsolási paraméterek az anyag folyását jelentős mértékben befolyásolják.



3.8. ábra. Feszültségi és alakváltozási állapot a szerszám belépésekor

## 4. A MIKRO-FORGÁCSOLÁSI KÍSÉRLETEK

### 4.1. Nanoszemcsés acél anyagok mikro-forgácsolása CBN és keményfém szerszámmal

A 2.2.2 fejezetben ismertetett anyagminőségeken keményfém és CBN szerszámokkal forgácsolási kísérleteket végeztünk. A szerszámok élezésekor arra törekedtünk, hogy az él-lekerekedési sugár ( $r_B$ ) mindkét szerszám esetén minimális legyen. A kísérlet során a keményfém szerszámnál rendkívül gyors kopást tapasztaltunk, ezért a kísérleteket csak a CBN éllel végeztük el. A 2.2.2. fejezetben leírtak szerint az S3 jelű próbatestet tekintettük a kiinduló, „referencia” állapotnak, míg az AK1 volt a finomabb szemcsés és az AK3 volt a legfinomabb szemcsés próbatest.

A kísérleteket először az Ultratum UP1 ultraprecíziós esztergán végeztük el, majd a forgácsolási kísérleteket megismételtük a Slantbed-Mikrotum 50 CNC gépen.

A próbatesteket ragasztással rögzítettük a korong alakú befogó tartóra, így a forgácsolás keresztesztergálással történt.

A forgácsolási kísérletek során erőmérést is végeztünk, azonban a mérési eredmények a megszakított forgácsolás miatt jelentős mértékben szórtak, következtetések levonására alkalmatlannak bizonyultak.

Forgácsolási kísérletek az Ultratum UP1 gépen.

A beállítási paraméterek az 1. *Vizsgálat* alkalmával:

Forgácsolási sebesség:	220 m/min
Előtolás:	10 $\mu\text{m}/\text{ford}$
Fogásmélység:	20 $\mu\text{m}$
Csúcsgugár sugár:	1,2 mm

A beállítási paraméterek alapján az ideális állapotban elérhető felületi érdesség a következő képlet alapján számítható:

$$R_z = \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon}$$

Ezek alapján a számított felületi érdesség értéke:

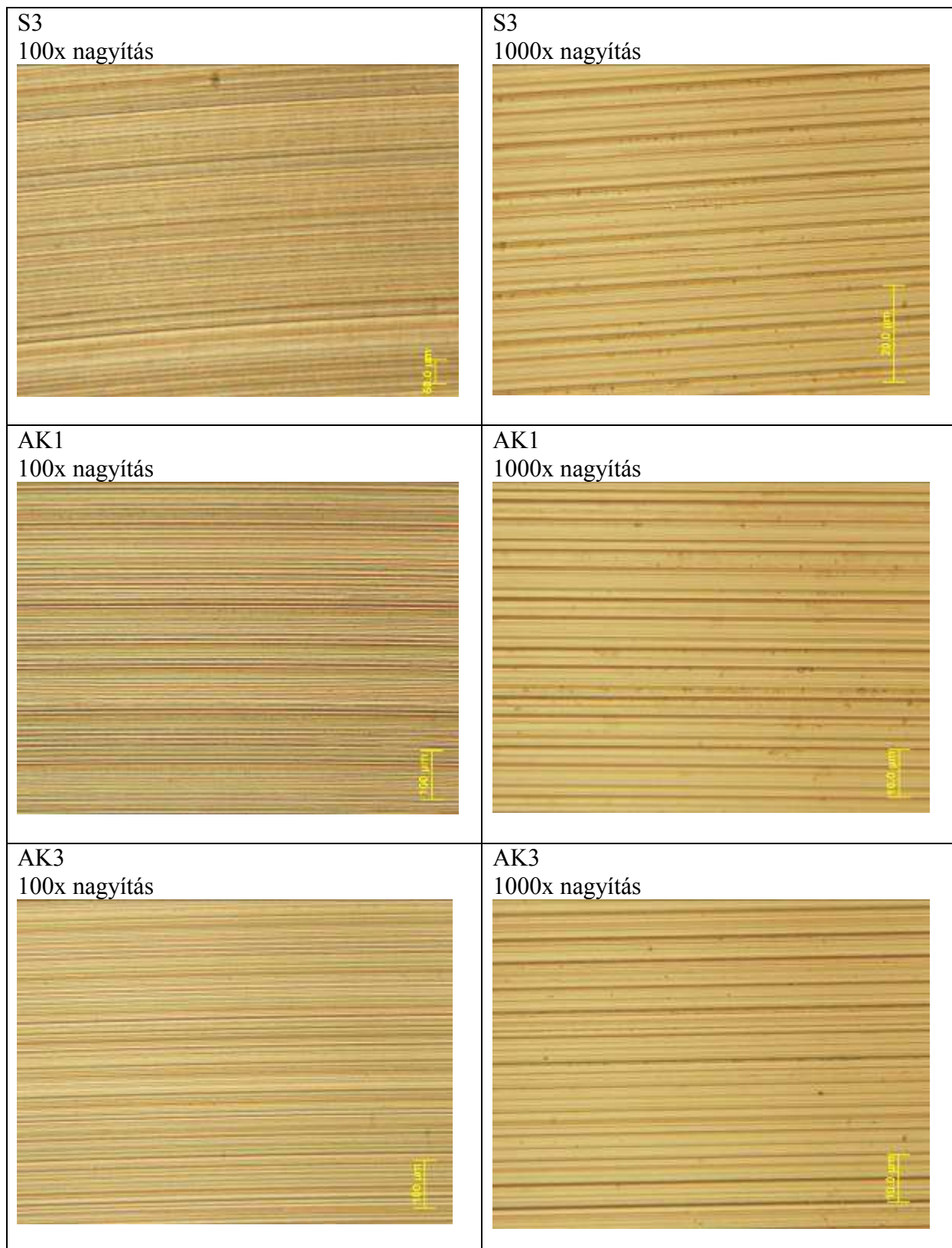
$$R_z = 0,0104 \mu\text{m} \quad \rightarrow \quad R_a = 0,00208 \mu\text{m}$$

A forgácsolási kísérletek eredményének értékelése:

A mért felületi érdesség értékei

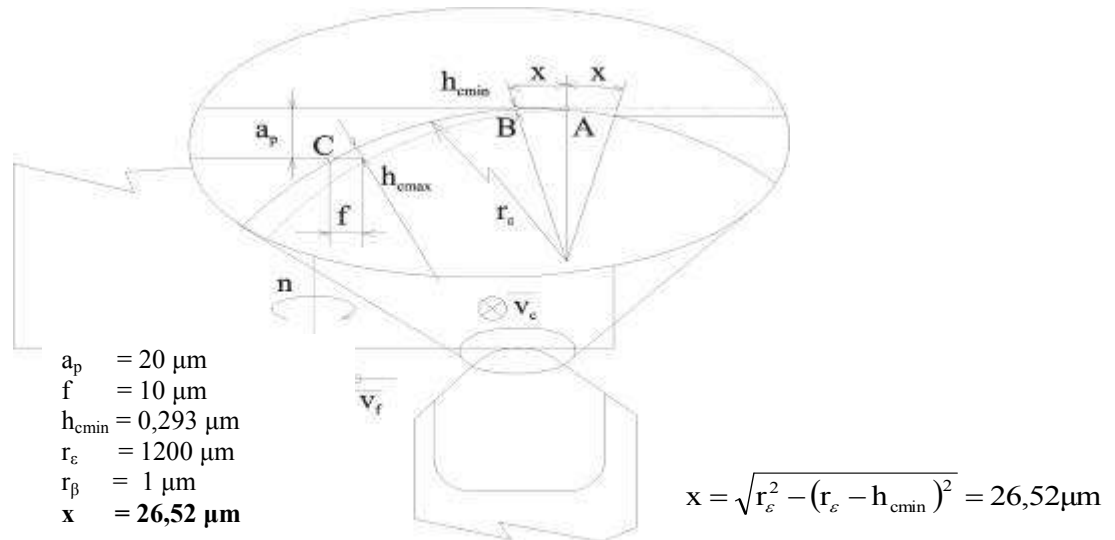
S3 esetén:	$R_a = 0,09 \mu\text{m}; (0,09),$	$R_z = 0,77 \mu\text{m} (0,77)$
AK1 esetén:	$R_a = 0,117 \mu\text{m}; (0,085; 0,15),$	$R_z = 0,95 \mu\text{m} (0,71; 1,19)$
AK3 esetén:	$R_a = 0,095 \mu\text{m}; (0,09; 0,1),$	$R_z = 0,805 \mu\text{m} (0,8; 0,81)$

A felületekről készített mikroszkópiai vizsgálatok:



Ha a mérési eredményeket az elméleti értékekkel összevetjük, a tapasztalattal és az irodalmi adatokkal egybevágó következtetésre jutunk.

N. P. L'Vov szerint a minimális forgácsvastagság értéke ( $h_{cmin}=0.293 \cdot r_\beta$ ). Ha azt feltételezzük, hogy az éllekerekedési rádiusz  $r_\beta=1\mu\text{m}$ , a minimális forgácsvastagság  $h_{cmin}=293\text{ nm}$ . Ez azt jelenti, hogy az A pont előtt a szerszám élén az előtolás irányában az  $x=26,52\mu\text{m}$  hosszban a szerszám már nem képes anyagot leválasztani. Az anyag a szerszám éle alatt rugalmasan és képlékenyen deformálódik. A rugalmas és képlékeny deformáció miatt körülbelül ugyanekkor szakaszon érintkezik a szerszám éle a munkadarabbal az „A” pont mögött. Ha megvizsgáljuk a „B” pontot, megállapíthatjuk, hogy a szerszám  $2x$  hosszúságú szakasza legalább ötször áthalad felette, míg azt végleg elhagyja és kialakul a felület végleges alakja. (4.1.1. ábra)



4.1.1. ábra: Elméleti forgácsvastagság a forgácsoló élén

A felületről készített mikroszkópi felvételek sem L'Vov, sem Brammerz, normálszemcsés anyagokra kidolgozott felvetését nem igazolják. A szerszám éléről készített mikro-geometriai felvétel, valamint az él mozgásának figyelembe vételével, Fourier analízis segítségével, előállítható a forgácsolt felület érdességi görbéje. Tehát a „nanoszerkezetű” anyagok mikro-forgácsolására is igaz, a nagy pontosságú keménysztergálásra kidolgozott elmélet, nevezetesen, hogy a forgácsolt felület érdessége a szerszám élén elhelyezkedő CBN szemcsék karcoló (forgácsoló) hatása következtében alakul ki.

A forgácsolási kísérleteket megismételtük az időközben rendelkezésünkre álló Slantbed-Mikroturn 50 CNC gépen.

A megmunkálási paraméterek a következők voltak:

Forgácsolási sebesség:	220 m/min
Előtolás:	5 $\mu\text{m}/\text{ford}$
Fogásmélység:	20 $\mu\text{m}$
Lekerekítési sugár:	1,2 mm







A fent említett paraméterek alapján az ideális állapotban elérhető felületi érdesség

$$Rz = 0,0026\ \mu\text{m} \quad \rightarrow \quad Ra = 0,00052\ \text{nm}$$

A felületi érdességi vizsgálatok eredményei:

S3 esetén:	$Ra = 0,063\ \mu\text{m}; (0,06; 0,066),$	$Rz = 0,562\ \mu\text{m} (0,57; 0,554)$
AK1 esetén:	$Ra = 0,043\ \mu\text{m}; (0,04; 0,046),$	$Rz = 0,414\ \mu\text{m} (0,45; 0,378)$
AK3 esetén:	$Ra = 0,066\ \mu\text{m}; (0,07; 0,06; 0,069),$	$Rz = 0,529\ \mu\text{m} (0,47; 0,57; 0,547)$

A megmunkált felületekről készített mikroszkópiai felvételek:

<p>S3 100x nagyítás</p>  <p>A micrograph showing a surface with a fine, regular texture. The texture consists of closely spaced, slightly wavy horizontal lines. There are some small, dark spots scattered across the surface. A yellow scale bar in the bottom right corner indicates 50.0 μm.</p>	<p>S3 1000x nagyítás</p>  <p>A high-magnification micrograph of the S3 surface. The texture is much more detailed, showing individual ridges and valleys of the horizontal lines. The dark spots are more prominent. A yellow scale bar in the bottom right corner indicates 5.0 μm.</p>
<p>AK1 100x nagyítás</p>  <p>A micrograph showing a surface with a fine, regular texture. The texture consists of closely spaced, slightly wavy horizontal lines. There are some small, dark spots scattered across the surface. A yellow scale bar in the bottom right corner indicates 50.0 μm.</p>	<p>AK1 1000x nagyítás</p>  <p>A high-magnification micrograph of the AK1 surface. The texture is much more detailed, showing individual ridges and valleys of the horizontal lines. The dark spots are more prominent. A yellow scale bar in the bottom right corner indicates 5.0 μm.</p>
<p>AK3 100x nagyítás</p>  <p>A micrograph showing a surface with a fine, regular texture. The texture consists of closely spaced, slightly wavy horizontal lines. There are some small, dark spots scattered across the surface. A yellow scale bar in the bottom right corner indicates 50.0 μm.</p>	<p>AK3 1000x nagyítás</p>  <p>A high-magnification micrograph of the AK3 surface. The texture is much more detailed, showing individual ridges and valleys of the horizontal lines. The dark spots are more prominent. A yellow scale bar in the bottom right corner indicates 5.0 μm.</p>



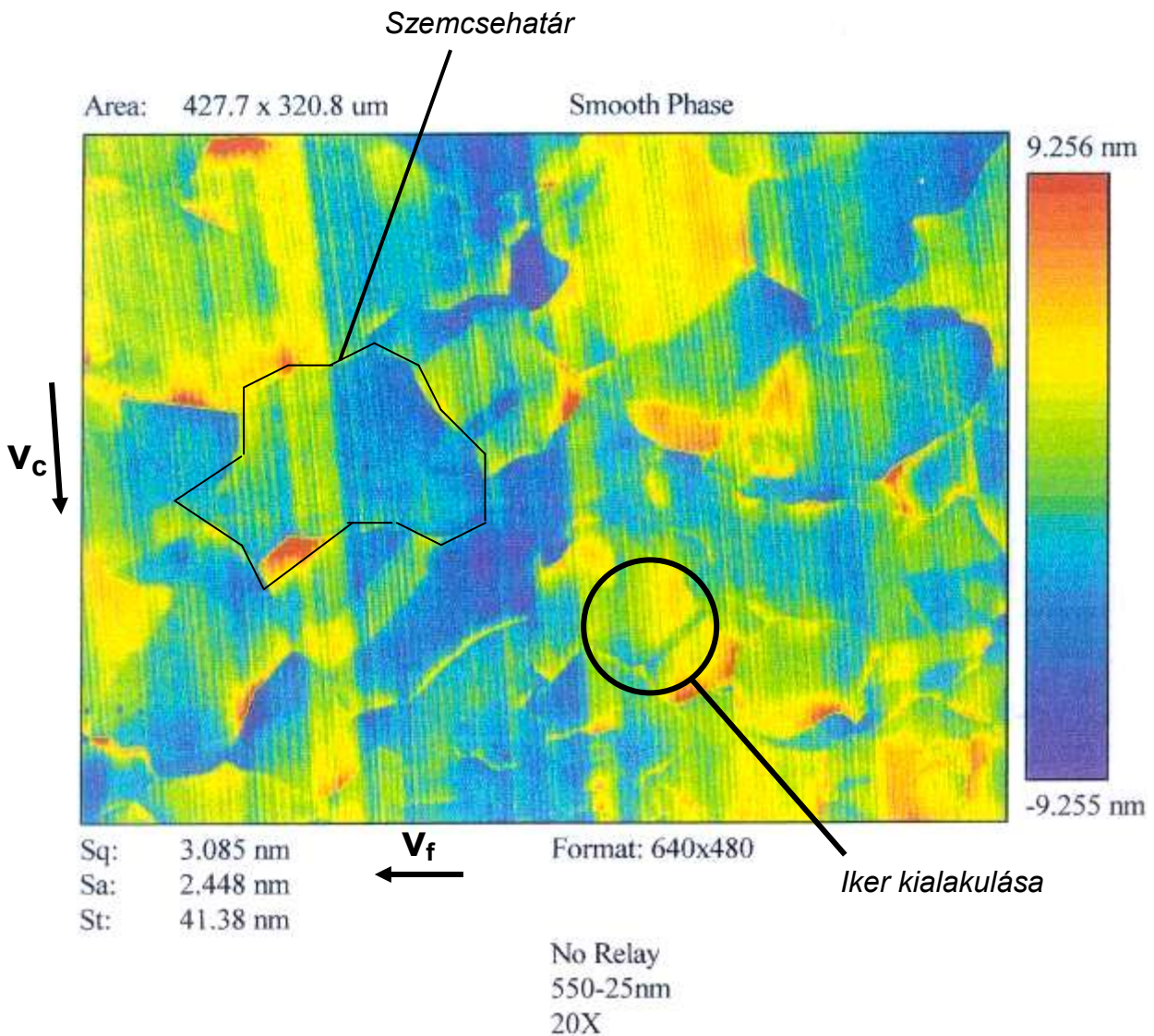
A felületi érdesség javulása részben az előtolás csökkentésének tudható be, azaz a 4.1.1. ábrán látható kontakt szakaszon, a forgácsoló szerszám többször haladt át, mint az első esetben. Az elemi karcok finomabb struktúrát eredményeztek.

**Összefoglalás:**

A mikro-forgácsolási kísérleteket tanúsága szerint, acél anyagok esetén, a szemcsefinomodás hatása a felület érdességének javulására nem mutatható ki. A forgácsolás körülményeinek a megváltoztatásával változik a felület érdessége, de sem az anyag anizotrópiájának hatása nem mutatható ki, sem az elméleti felületi érdességet nem lehet megközelíteni. A forgácsolt felület mikro-geometriáját a szerszám él érdessége, a geometriai és kinematikai viszonyok határozzák meg, miközben a szerszám él mikro-geometriája az él kopása miatt folyamatosan változik.

## 4.2. Nanoszemcsés réz mikro-forgácsolása

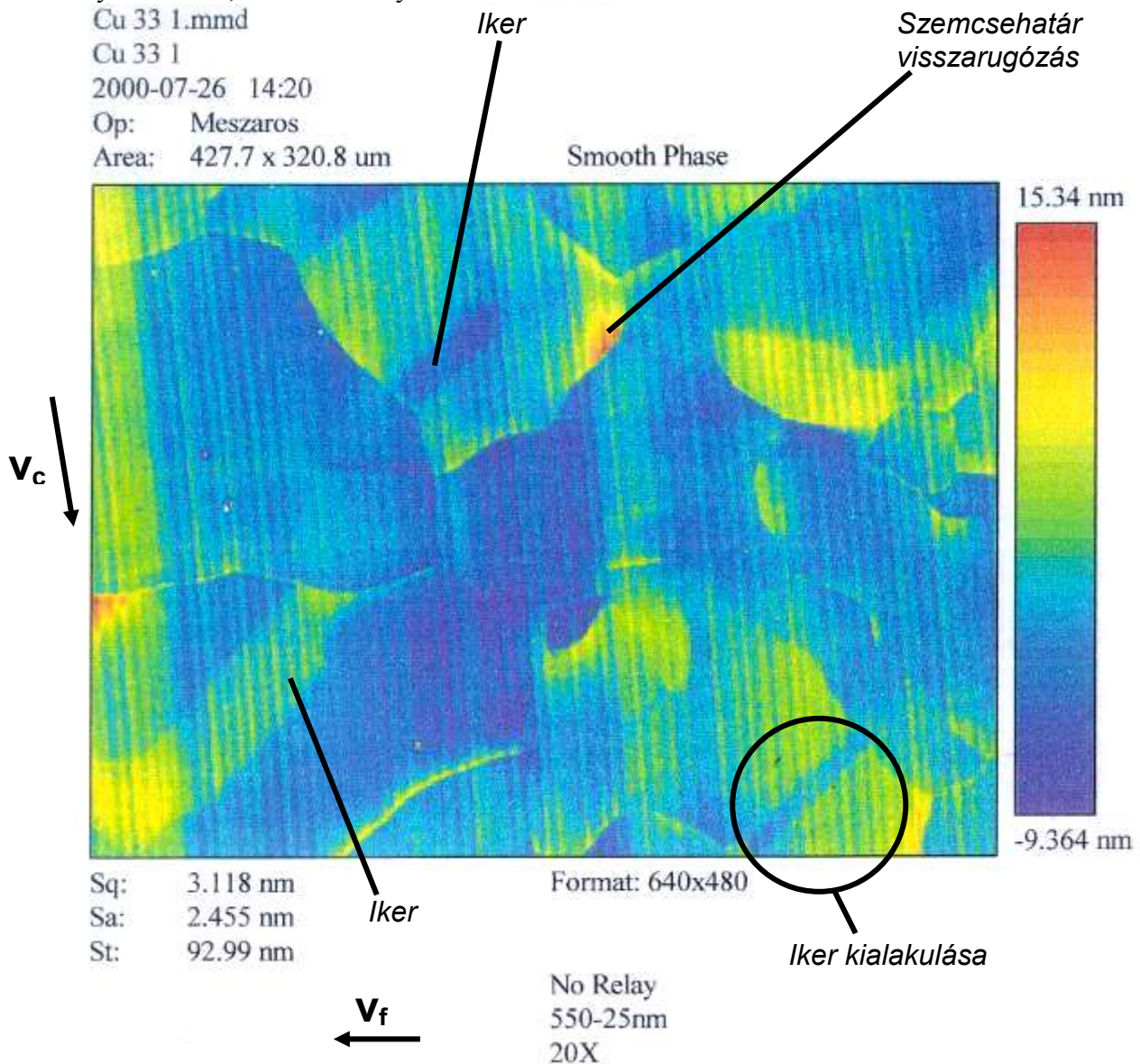
A nano-szemcsés réz forgácsolási vizsgálatok rendelkezésünkre állt a kristályos szerkezetű anyagok mikro-forgácsolási tapasztalata. Kristályos szerkezetű anyagok mikro-forgácsolásakor (az átlagos szemcse méret több mikrométer nagyságú), a forgácstő azonos orientáltóságú szemcsén belül helyezkedik el. A felület kialakulásában az anyag anizotrópiai tulajdonsága döntő szerepet játszik.



4.2.1 ábra: Réz tükörfelület topográfiai képe

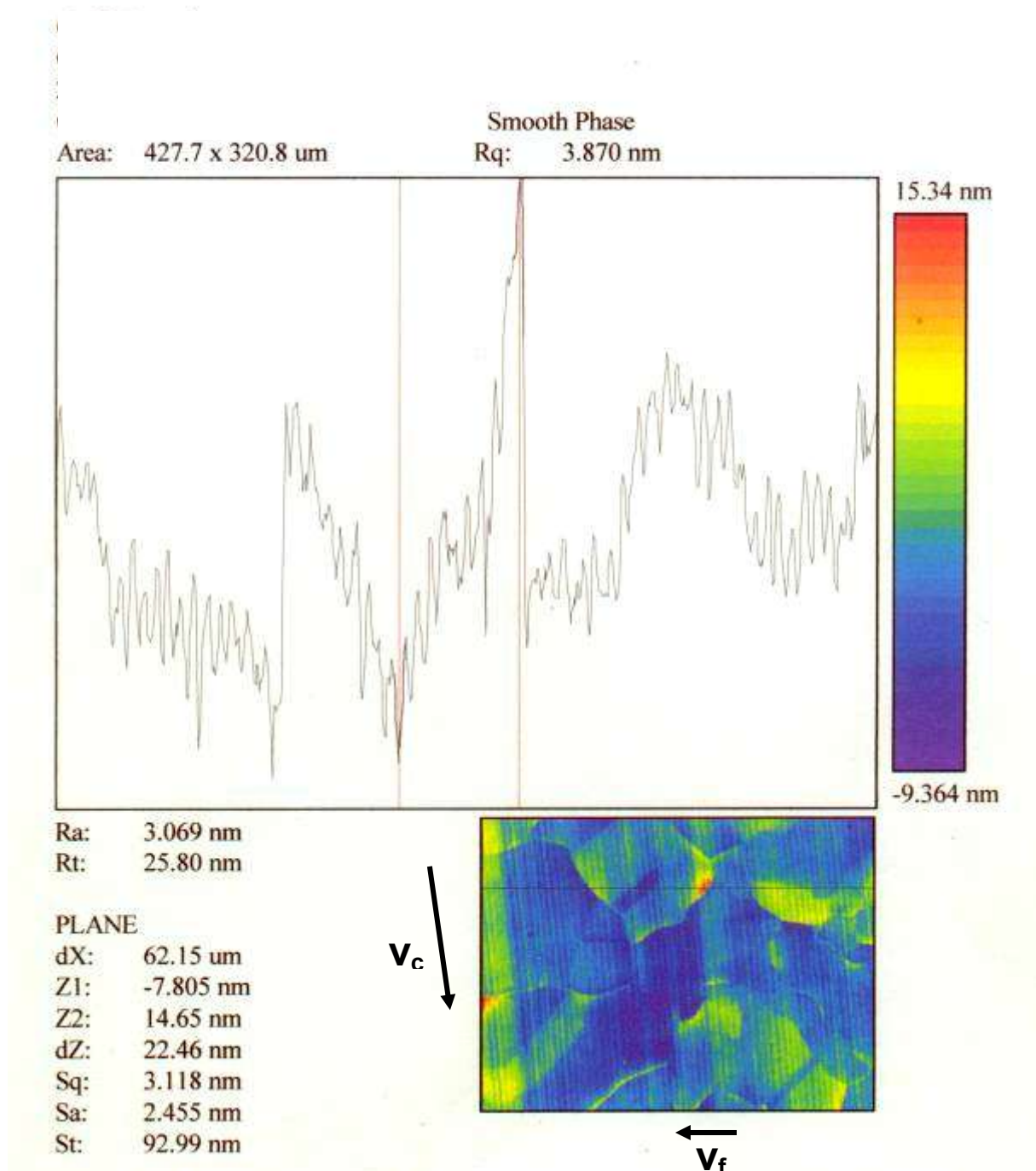
A 4.2.1. ábra felület topográfiai képén jól kirajzolódnak a szemcsehatárok. A piros színnel jelölt részek a felület legmagasabb pontjai. A különböző szemcsék részben különböző magasságban helyezkednek el. Ez a szemcsék eltérő orientációjának a és az anizotrópiának a hatása. A szemcse határok kiemelkedései a diszlokáció áramlással magyarázhatók. Vizsgálataink szerint az anizotrópián és a diszlokáció áramlásán túl az egyes szemcsék kiemelkedésére a szomszédos szemcse orientációja is hatással van. A felvétel egy központi részletét nagyobb nagyításban is elkészítettük, amelyet az alábbiakban láthatunk. (4.2.2. ábra).

A kinagyított képen ismét jól megfigyelhető az elmondottakon túlmenően az orientáció hatása. Az elemi kristályon belül elhelyezkedő iker kristály felülete lényegesen alacsonyabban helyezkedik el, mint a kristály többi része.



4.2.2. ábra. Iker kristály hatása a forgácsolt felületre

A 4.2.3. ábrán a felület metszetét készítettük el. Az ábrából közvetlen információt nyerhetünk a felülettopográfia és a felületi érdesség mérőszámai között fennálló különbségekre.



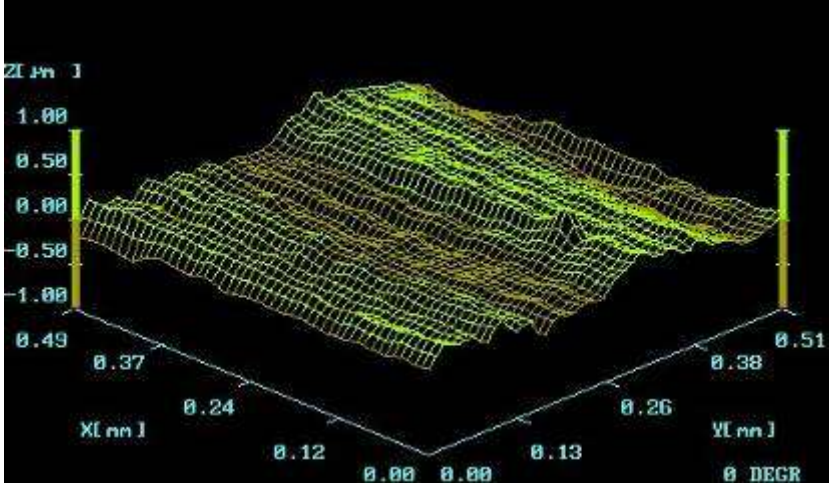
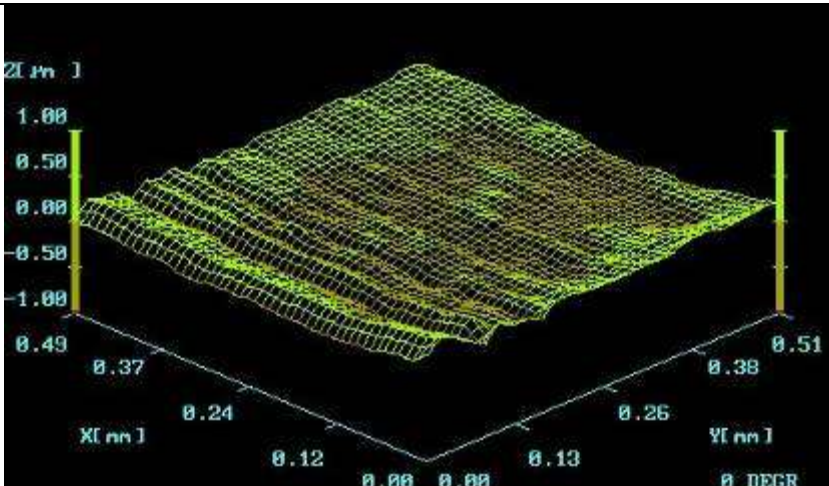
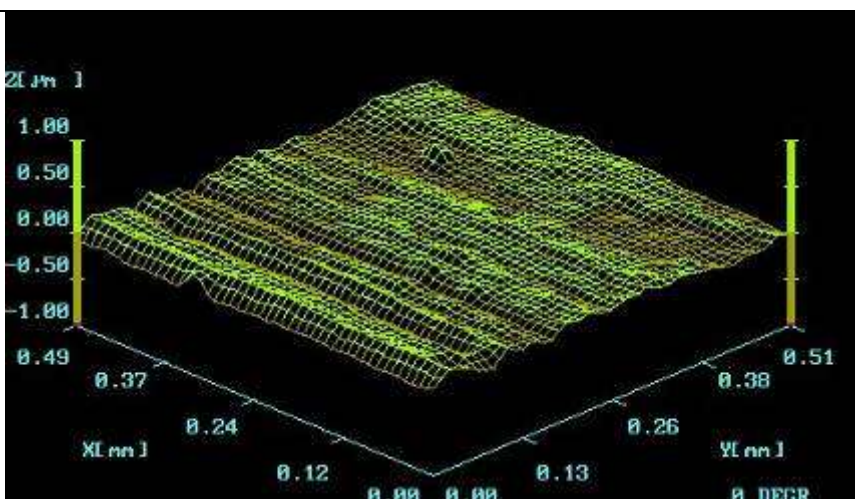
4.2.3. ábra. Érdességi profil a jelzett helyen

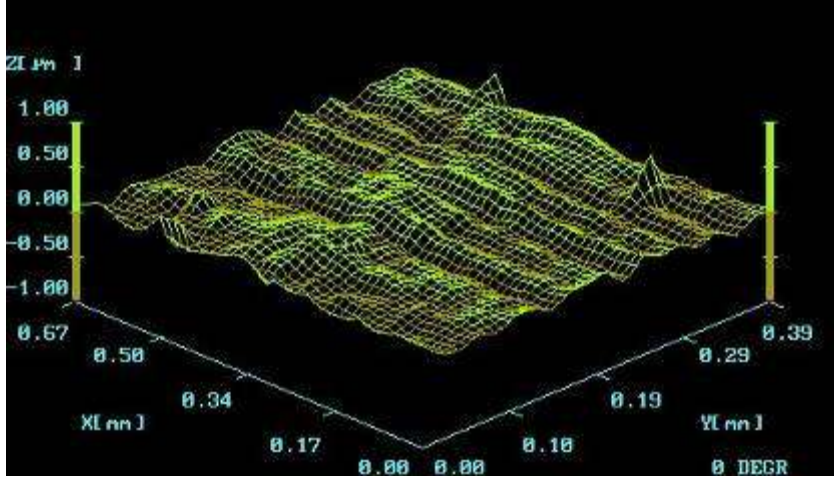
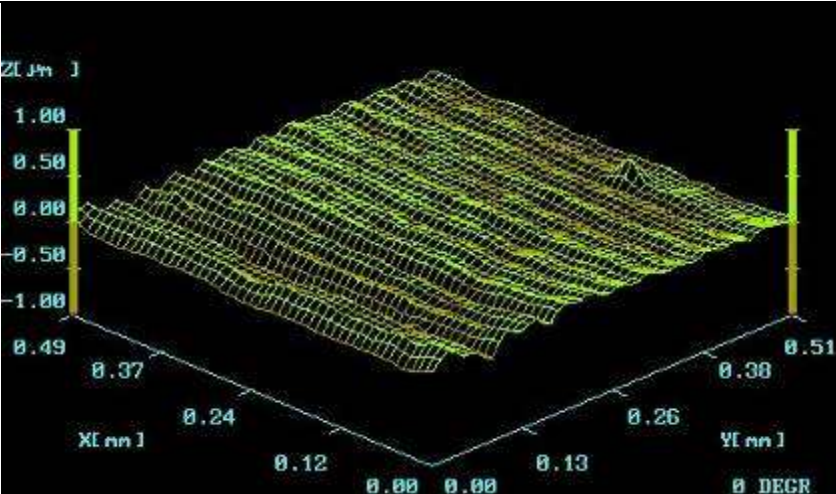
Nano-szemcsés réz mikro-forgácsolásakor a szemcse mérete lényegesen kisebb, mint a forgács tö mérete. A forgácsstőben egyszerre több szemcse található, azaz a szerszám éle egyszerre több szemcsét vág át. A szemcsemérettel azonos mértékben lecsökkennek a diszlokációs utak. Az alakítás következtében (nano-szemcsés szerkezet előállításakor) az anyag felkeményedik. Mivel az alakítás mértéke a nano-szemcsés szerkezet előállításakor lényegesen nagyobb, mint forgácsoláskor a szerszám éle alatt, feltételezhetjük, hogy a felület felkeményedésének mértéke lényegesen kisebb, mint kristályos szerkezet forgácsoláskor volt. Mindezekből arra a következtetésre jutottunk, hogy a nano-szemcsés anyag forgácsolt felületének topográfiai képe lényegesen eltér a kristályos szerkezetű anyagétól. A feltevésünket a forgácsleválasztás modellezése is alátámasztotta. A forgácsolási kísérleteket több lépésben végeztük, a kísérleteket többször megismételtük.

A különböző próbatestek jelölése a következő volt: ME1; ME2; ME3; ME4; ME5.

A megmunkálási paraméterek a táblázatban találhatóak a megfelelő betűjelzéshez hozzákapcsolva.

A felülettopográfiai felvételeket lézeres, érintésmentes vizsgáló berendezéssel végeztük.

<p><u>ME1:</u> Fogásmélység: 25 <math>\mu\text{m}</math> Előtolás: 10 <math>\mu\text{m}</math> Fordulatszám: 1500 1/min</p>	
<p><u>ME2:</u> Fogásmélység: 25 <math>\mu\text{m}</math> Előtolás: 10 <math>\mu\text{m}</math> Fordulatszám: 600 1/min</p>	
<p><u>ME3:</u> Fogásmélység: 30 <math>\mu\text{m}</math> Előtolás: 10 <math>\mu\text{m}</math> Fordulatszám: 600 1/min</p>	

<p><u>ME4:</u>  Fogásmélység:  25 <math>\mu\text{m}</math>  Előtolás:  20 <math>\mu\text{m}</math>  Fordulatszám:  600 1/min</p>	
<p><u>ME5:</u>  Fogásmélység:  25 <math>\mu\text{m}</math>  Előtolás:  10 <math>\mu\text{m}</math>  Fordulatszám:  1000 1/min</p>	

A felületek topográfiai képéből a nem tudunk egyértelmű következtetéseket levonni a kristályszerkezet hatására. A felület érdességét alapvetően a rendelkezésre álló szerszám élmínősége határozta meg. A forgácsolási kísérleteket megismételtük az időközben rendelkezésünkre álló Slantbed-Mikrotorn 50 CNC ultraprecíziós esztergán. A felületek kiértékelését fénymikroszkóppal végeztük.

A forgácsolási kísérleteket az alábbi paraméterekkel végeztük:

Fordulatszám: 900 1/min

Előtolás: 5  $\mu\text{m}$ /ford

Fogásmélység: 10  $\mu\text{m}$

A megmunkáló szerszám: egykristályos gyémánt

Csúcssugár: 10mm

Él-lekerekítési sugár: 50 nm

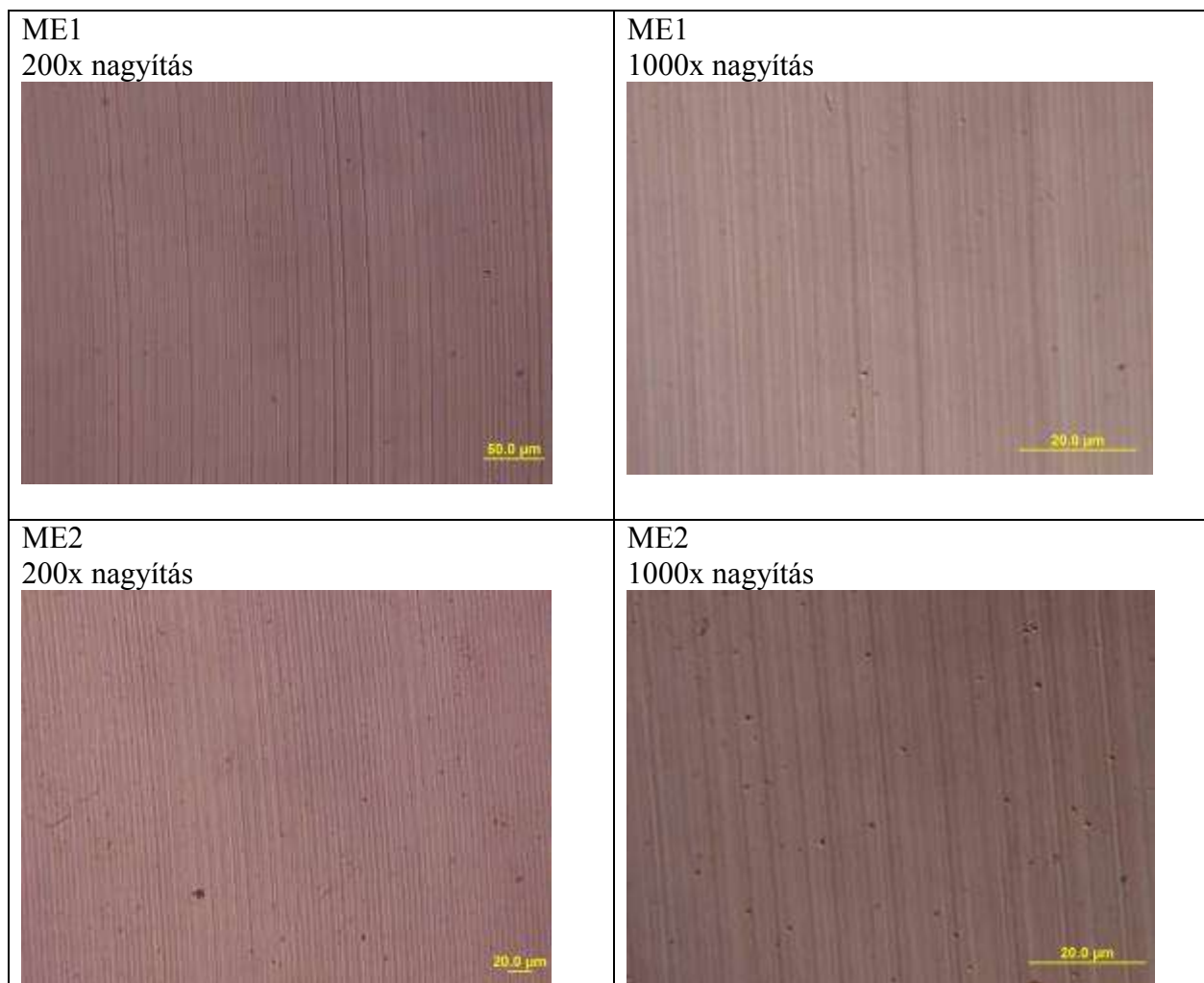
A felvételek értékeléséhez támpontul szolgáltak a kristályos szerkezetű anyagokról készített fénymikroszkópi felvételek. (lásd 4.2.4. ábra)

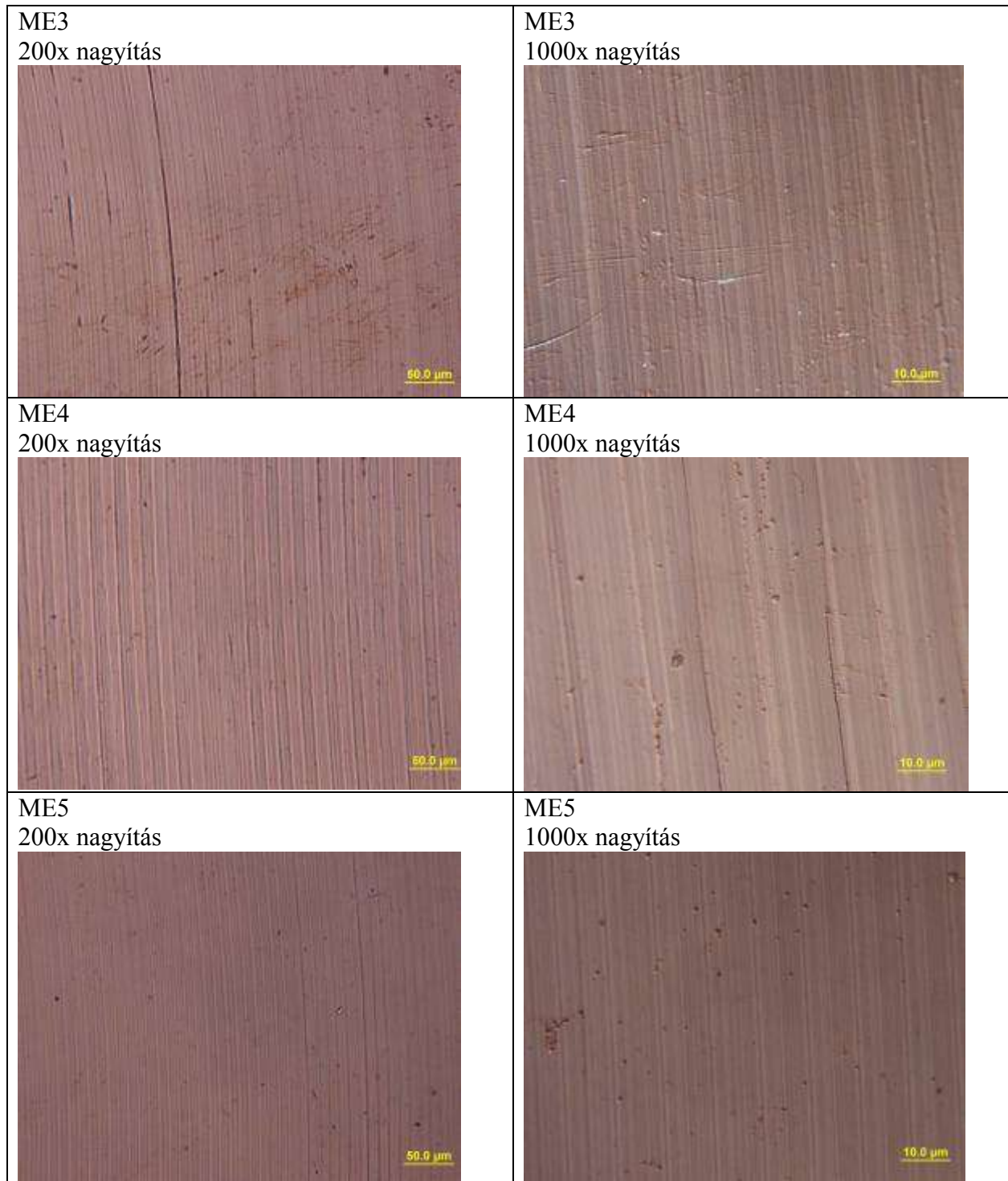


4.2.4. ábra. Kristályos szerkezetű réz tükörfelület mikroszkópi képe

A fenti képen jól kirajzolódnak a kristályhatárok. A kristályok kiemelkedései a szerszám pálya nyomaival azonos nagyságrendbe esnek. A felvétel 200 szoros nagyítással készült.

A nano-kristályos réz próbatesteken végzett forgácsolási kísérletekkel tükörfelületeket állítottunk elő. A próbatestekről készített mikroszkópi felvételek:





A tükörfelületekről 200 szoros nagyítással készült felvételeken a kristályhatárok nem láthatók, ezért 1000 szoros nagyítást is készítettünk. Az 1000 szoros nagyítással készült felvételeken anyaghibák már jól kirajzolódnak, de a szemcsehatárok továbbra sem. Nagyobb nagyítást a kutatási program keretében nem tudtunk készíteni. A kristályos anyagról és a nano-kristályos anyagról készült felvételek összehasonlítása alapján azonban biztosan állíthatjuk, hogy a felület „egyenletességét”, a kiemelkedések és a gödrök mélységét, nano-kristályos anyag esetén, az anyag anizotrópiája elhanyagolható mértékű, az egyéb technológiai okokból keletkező felületi hibákhoz viszonyítva.



## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Kristályos szerkezetű anyagok mikro-forgácsolásakor, ha az átlagos szemcseméret nagyobb, mint a forgácstő mérete, a forgácsolt anyag anizotrópiai tulajdonsága, a diszlokációk vándorlása és az éppen átvágott szemcsével határos szemcsék orientációja a forgácsolt felület egyenetlenségét okozzák. A felület topográfiáját a forgácsoló él minősége, a forgácsolási adatok nagysága, a szerszám gép mozgásegyenletessége és a forgácsolás egyéb körülményei is befolyásolják. A szemcseméret csökkentésével az anizotrópia hatása mérsékelhető, a diszlokációs utak csökkennek. A szemcse méret csökkentése a felületi egyenetlenség csökkenése irányába hat. Ha az átlagos szemcseméret olyan nagyságúra csökken, hogy a szerszám éle előtti alakváltozási zónában több szemcse helyezkedik el, az anizotrópia hatása elhanyagolható lesz, a felület egyenetlenségét alapvetően a forgácsolás már említett egyéb körülményei határozzák meg. Kutató munkánk során 99% tisztaságú, kristályos szerkezetű OFHC-réz próbatestből ultrafinom, „nano-szemcsés” szerkezetű próbatesteket állítottunk elő. A próbatesteken gyémánt egykristály éllel ultraprecíziós esztergán tükörfelületeket készítettünk. A tükörfelületeket lézeres letapogatással és fénymikroszkóppal analizáltuk. A vizsgálat eredménye visszaigazolta a feltevésünket. A készített tükörfelületek egyenetlenségét kizárólag az fent felsorolt egyéb tényezők határozták meg. Az anizotrópia hatása teljes egészében kizárható. A projekt keretében született tudományos eredményt többek között lézer tükrök készítésekor használhatjuk fel. A kutatási munkát kiterjesztettük acél anyagok vizsgálatára is. A megfigyelésünk szerint edzett acélok nagy pontosságú finomesztergálásakor a finomabb szemcsés anyagokon jobb felületi érdességet tudunk elérni, mint durvaszemcsésen. A szemcseméret csökkenésével az anyag szilárdsága, szakadási nyúlása is megnövekedik. A szemcseméret csökkenésével várhattuk, a gyémánt egykristály éllel történő mikro-forgácsoláshoz hasonlóan, a forgácsolt felület érdességének a javulását. Próbatesteket készítettünk 0.1% C-Mn-acélból, majd a próbatestek szövetszerkezetét hengerléssel és hőkezeléssel, ultrafinom szemcséssé tettük. A próbatesteken, jól élezett CBN és keményfém éllel, ultraprecíziós esztergán, különböző forgácsolási paraméterekkel síkfelületeket készítettünk. Annak ellenére, hogy a próbatesteken  $Ra=0.04$  mikrométeres átlagos érdességet is sikerült elérnünk, mégsem vonhattuk le azt a következtetést, hogy a szemcseméret csökkenése a forgácsolt felület érdességének javulásához vezet. Részletes vizsgálattal kimutattuk, hogy polikristályos éllel történő forgácsolásakor, a forgácsolt felület érdességét a szerszám él mikro- és makro-geometriai kialakítása, valamint a szerszám és a munkadarab relatív mozgása, azaz az él érdessége, a kontaktvonal nagysága és az előtolás nagysága határozza meg.

A kristályos szerkezetű anyagok mikro-forgácsolására kidolgozott modellt átalakítottuk a szemcseméret csökkenésének megfelelően. A modell segítségével képet kaphatunk a forgácstőben uralkodó feszültségi állapotról, a feszültség hatására fellépő deformációról, a deformáció irányáról és sebességéről, valamint a szerszám és a munkadarab között fellépő erők nagyságáról és irányáról.