

DEFINICIJA

➤ Mikro rezanje je metod obrade malih delova ili komponenti sa primitivima manjim od 1/10mm (okvirni opseg 999-1 μ m).

Mikrorezanje podrazumeva:

- ✓ Mehaničko delovanje alata na obradak izaziva odvajanje materijala u obliku strugotine
- ✓ Materijal alata je tvrdi od materijala obratka
- ✓ Radijus vrha alata je reda veličine dubine rezanja

MATERIJALI

➤ Procesi mikro rezanja idalje zauzimaju značajno mesto u oblasti mikroobrade upravo zbog mogućnosti obrade širokog spektra različitih materijala.

PREDNOST

➤ Najveća prednost mikro rezanja je u obradi 3D mikro struktura složene geometrije i velikih visinskih razlika.

NEDOSTACI

- ❖ Relativno velike sile koje se javljaju pri obradi rezanjem izazivaju savijanje i izvijanje alata i obratka, čime utiču na tačnost obrade, a samim tim i na obradljivost
 - Jedna od metoda kojom se smanjuje sila rezanja je uvođenje vibracije alata tokom rezanja
 - Materijal alata mora imati zavidnu čvrstoću i tvrdoću, te se zato koriste dijamanti i alatna keramika
- ❖ Radijus vrha alata utiče na silu rezanja
Uslovi za mikro rezanje:
 - ✓ Dimenzije primitiva su reda veličine $1/10\text{mm}$
 \Rightarrow potrebna debljina strugotine i radijus vrha alata moraju biti reda veličine $1/10\mu\text{m}$ (radijus kristala dijamanta je desetinu nm \Rightarrow submikronska dubina rezanja)
 - ✓ Rezultati MD simulacije (*molecular dynamics simulation*) predviđaju najmanju moguću dubinu rezanja za bakar i aluminijum manju od 1 nm pod uslovima da je alat sa dijamantskim vrhom čiji je radijus manji od 10 nm
 - ✓ Neophodan uslov za mikro rezanje je postojanje ultra precizne mašine alatke koja može da realizuje sub milimetarske tolerancije i debljinu strugotine
- ❖ Izrada mikro alata je veliki problem i utiče na primenu procesa mikro rezanja

OSNOVE MIKRO OBRADJE – MIKRO REZANJE - 3

PRIMENA

Mikro struganje: Primenjuje se za izradu mikropinova

Mikro glodanje:

Primenjuje se za izradu složenih kontura i mikro žljebova

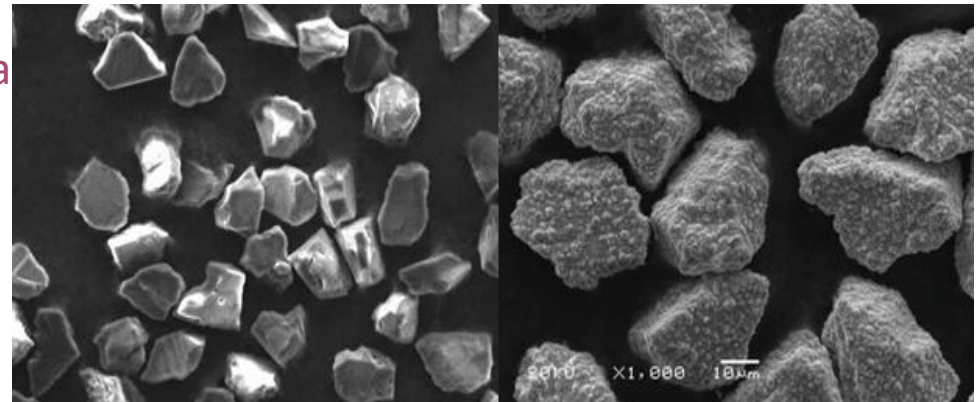
Mikro brušenje:

Primenjuje se za izradu mikropinova i mikro žljebova

Prečnik tocila je relativno veliki, jedino je debljina mala- reda veličine primitiva- $1/10\mu\text{m}$

Submikronske veličine abrazivnih zrna dijamantskih, CBN ili WC

Poliranje: Primenjuje se kao završna obrada



SPECIJALNA PRIMENA KOD KRTIH MATERIJALA

- Prilikom rezanja krutih materijala konvencionalnim metodama, velike dubine rezanja mogu da izazovu velike pukotine na površini i ispod nje. Da bi se to prevazišlo primenjuje se rezanje dovoljno malom dubinom, tzv. kritičnom dubinom. Tako se dobija dobar kvalitet obrađene površine bez jamica i naprslina.
- Stoga se mikro rezanje može primeniti na krute materijale kao novi metod obrade posebnih primitiva od krutih materijala, što se inače ne bi moglo postići poliranjem ili nekom drugom završnom obradom.

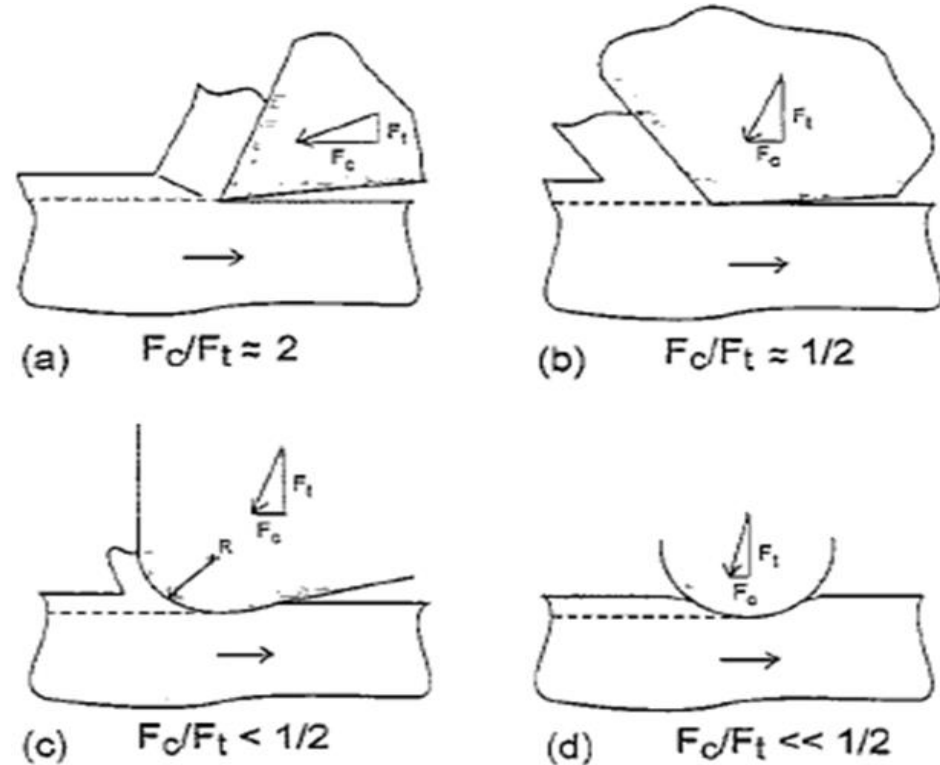


(Diamond tool in the machining and lapping process of brittle materials)



TEORIJA PROCESA OBRADE

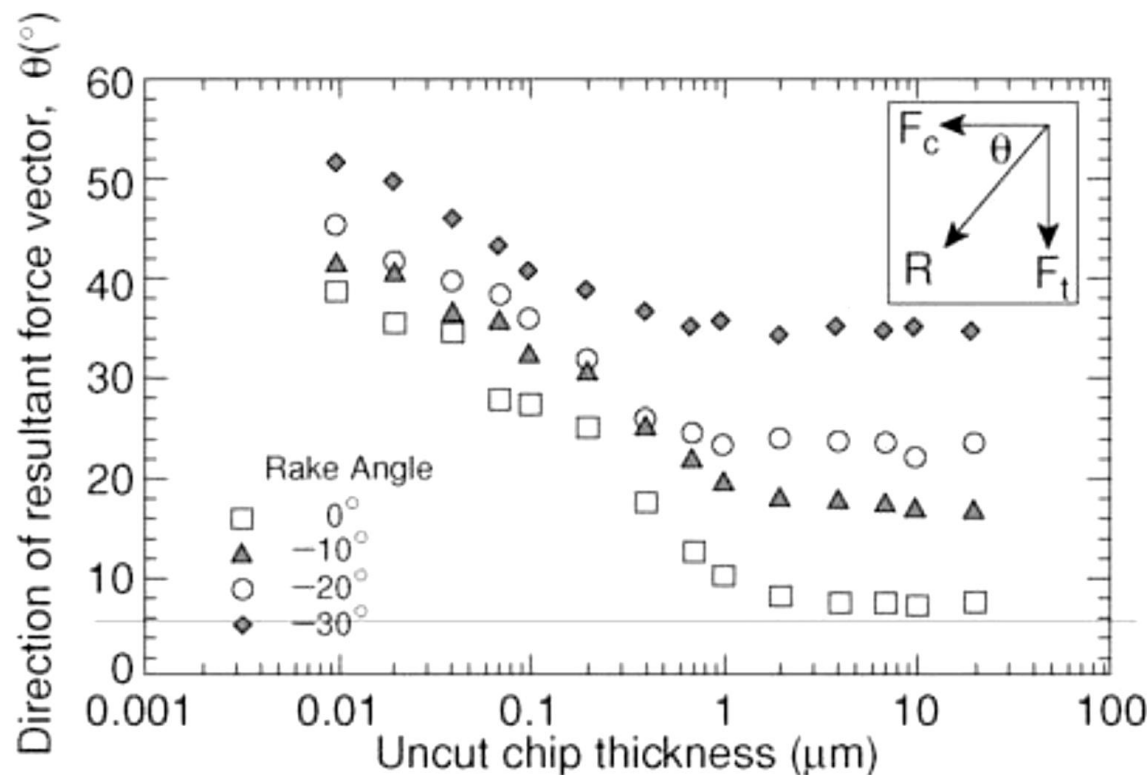
- Mikrostruktura materijala obratka, geometrija i materijal reznog alata i parametri obrade utiču na proces uklanjanja materijala.
- Uticaj postaje dominantan sa smanjenjem skale i to se zove efekat veličine (size effect) u mikro obradi
- Mehanizam uklanjanja materijala kod mikro rezanja može biti odvajanje, grebanje ili proklizavanje (cutting, plowing, or slipping) i zavisi od radijusa vrha alata spram debljine strugotine
- Efektivni grudni ugao raste sa smanjenjem dubine rezanja, usled čega se vektor glavne sile rezanja približava vektoru otpora prodiranja



(a) conventional cutting, (b) grinding, (c) ultraprecision machining, and
(d) indentation-sliding.

OSNOVE MIKRO OBRADJE – MIKRO REZANJE - 6

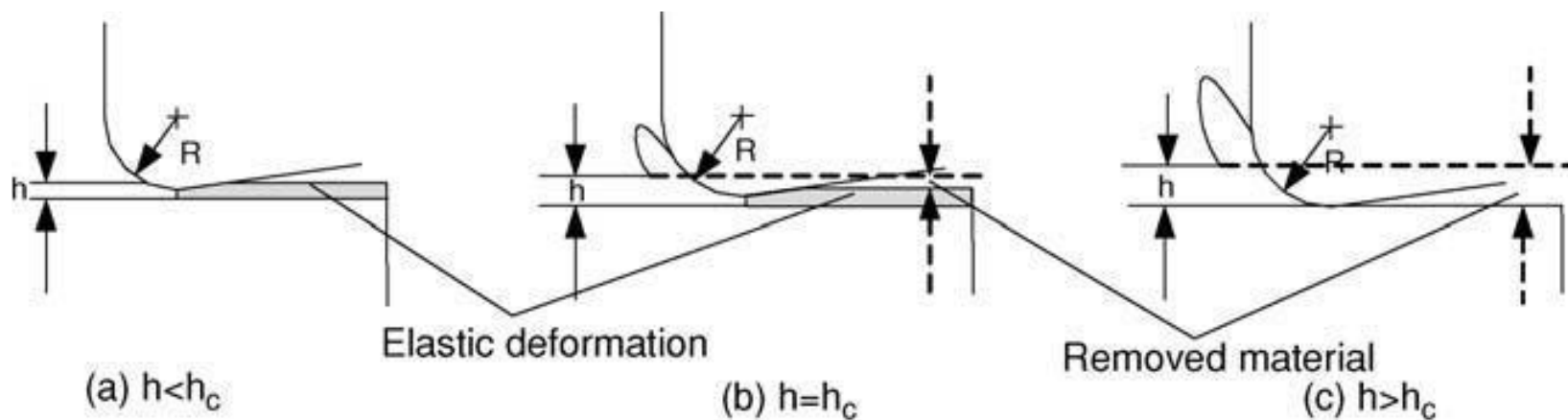
- Uticaj grebanja postaje dominantan usled velikog efektivnog negativnog grudnog ugla, koji potiče od radijusa vrha alata
- Glavna razlika između makro i mikro obrade je značajno uvećanje napona smicanja sa smanjenjem dubine rezanja



- Male promene u dubini rezanja značajno utiču na proces mikro rezanja, odnosno mehanizam uklanjanja materijala, a na taj način i na kvalitet obrađene površine
- Naslage na reznoj ivici alata koje se ne skidaju značajno povećavaju silu grebanja kada je korak manji od radijusa vrha alata

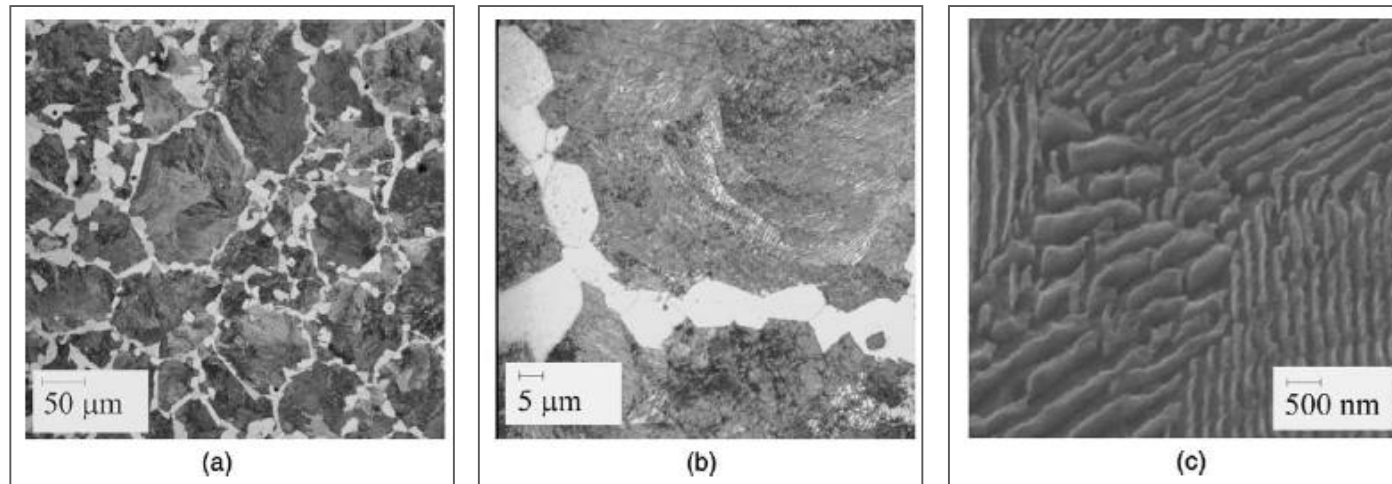
MINIMALNA DUBINA REZANJA

- Grebanje koje nastaje pri određenoj dubini ukazuje na minimalnu dubinu rezanja ispod koje ne dolazi do formiranja strugotine
- Promene u sili rezanja koje su vezane za minimalnu dubinu su pokazatelji promene mehanizma obrade
- Vrednost minimalne debljine strugotine varira od radijusa vrha alata, materijala obratka i procesa rezanja
- Prilikom grebanja se stvarna dubina rezanja razlikuje od zadate zbog elastičnih deformacija.



MIKROSTRUKTURA MATERIJALA

- Mikrostruktura materijala obratka je vrlo značajna u mikro rezanju. Kada je dimenzija primitiva koji se izrađuje istog reda veličine kao i veličina zrna, ili kada se materijal ne može smatrati homogenim ili izotropnim, mehanizam mikro rezanja je znatno drugačiji od makro rezanja.
- Da bi se izbegao efekat veličine, preporučuje se da dubina rezanja bude deset puta veća od veličine zrna.
- Nehomogenost kao što su granice zrna, defekti u kristalnoj rešetci i nečistoće izazivaju proklizavanje vrha reznog alata.



Tvrdoća je tri puta veća u slučaju perlita nego ferita.

Fig. 1. Optical images of the normalized AISI 1045 steel microstructure in (a) and (b) show larger pearlite grains (grey) and smaller ferrite grains (white). The SEM image in (c) shows the randomly oriented cementite plates in a single pearlite grain.

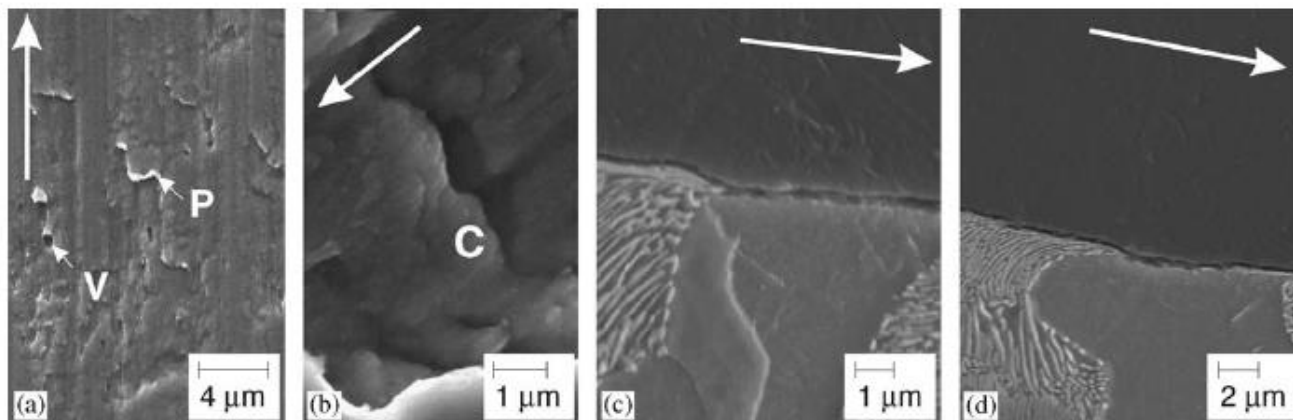


Fig. 3. SEM images of the resulting machined surface. The dimpled surface in (a) shows examples of prows (P) and microvoids (V), while a microcrack (C) is shown in (b). Cross-sectional SEM images in (c) and (d) of a dimple on the machined surface. Cutting direction is indicated by the large arrows.

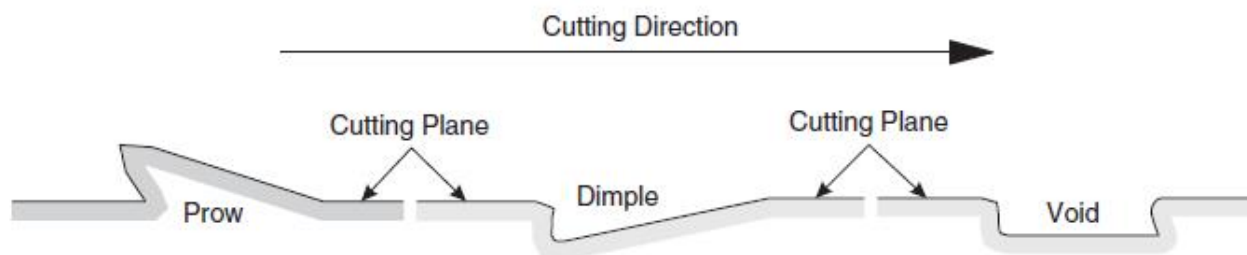


Fig. 4. Schematic of different surface features observed on a machined steel surface.

➤ Većina polikristalnih materijala se tretira kao mnoštvo zrna slučajne orijentacije i anizotropnih svojstava na mikro nivou. Varijacija tvrdoće izaziva vibraciju reznog alata, što je posebno izraženo pri malim koracima i niskim brzinama rezanja. Sve to dovodi do hrapavosti obrađene površine. Tipovi površinskih defekata su naprsline (crack=pukotine), šiljaste izbočine (prow= pramac), jamice, (dimple=ulegnuće) i rupe (void=praznina).

FORMIRANJE STRUGOTINE

- Mehanizmi formiranja strugotine zavise od radijusa vrha alata
- Povezano je sa kvalitetom obrađene površine
- Plastično deformisanje koje se javlja pri formiraju strugotine se menja kod mikro rezanja, tj. kada se veličina mikrostrukture materijala i dubina rezanja (*uncut chip thickness*) približavaju.

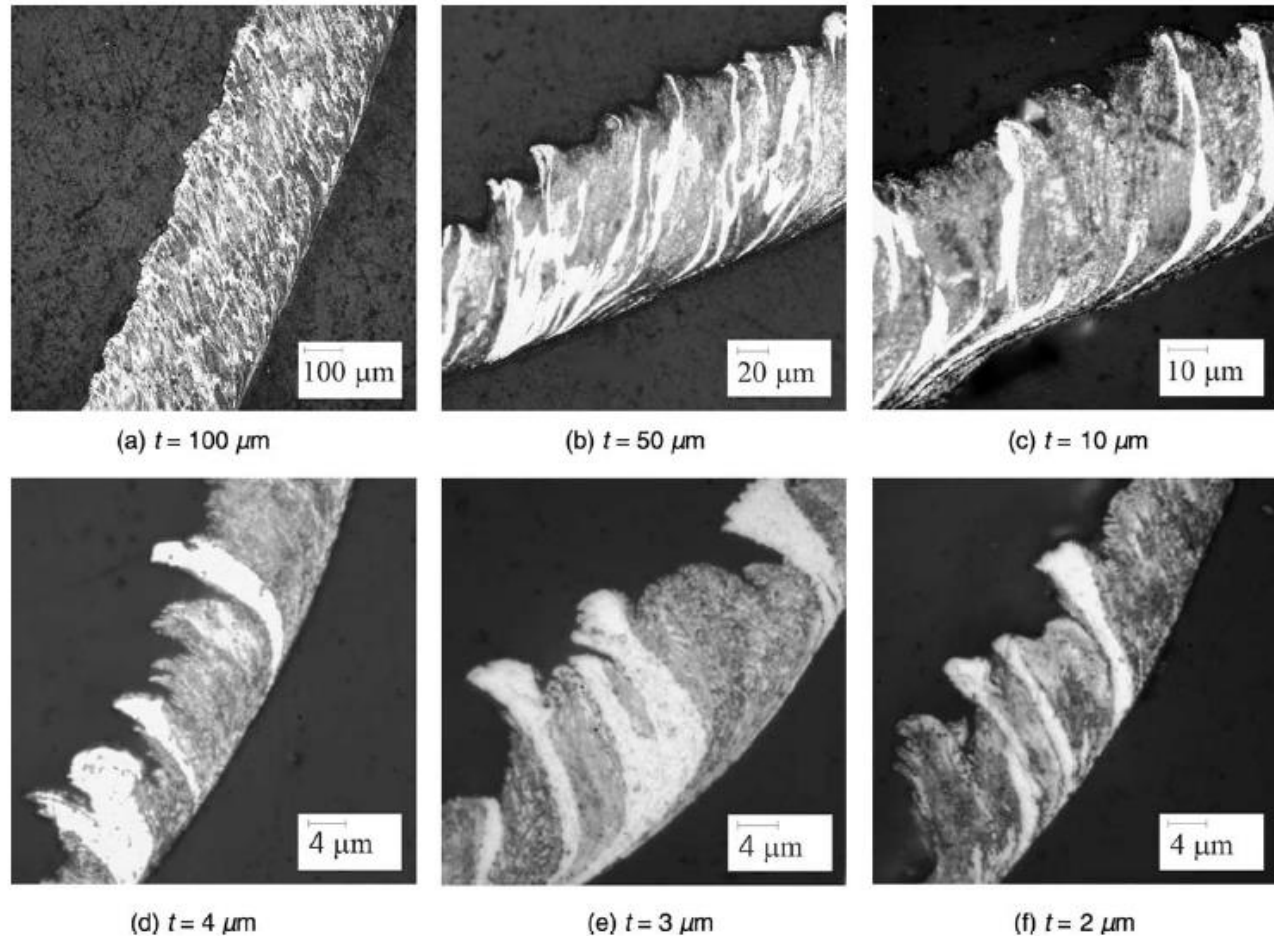


Fig. 3. Optical images of etched chip cross sections for different uncut chip thicknesses, t . Continuous chips are shown in (a)–(c) while a quasi-shear-extrusion chip is formed as shown in figures (d)–(f) as the uncut chip thickness decreases. The uncut chip thickness is indicated under each image.

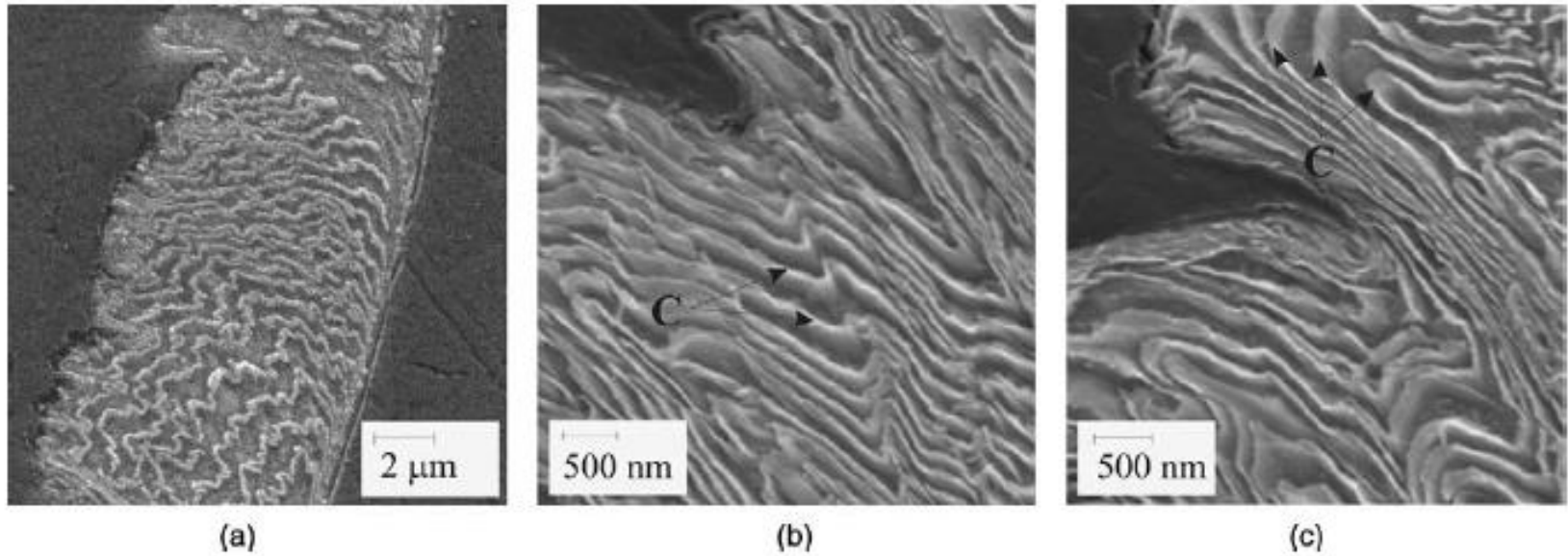


Fig. 5. SEM images of chip cross-sections showing deformed pearlite grains with extensive buckling of normally brittle cementite (C)

Formiranje strugotine od perlitnih zrna izaziva intenzivno uvijanje ugljenika (bele izuvijane linije)

Slobodna spoljašnja površina strugotine pokazuje lamelarnu strukturu usled dejstva smicanja pri odvajanju strugotine od ostatka materijala

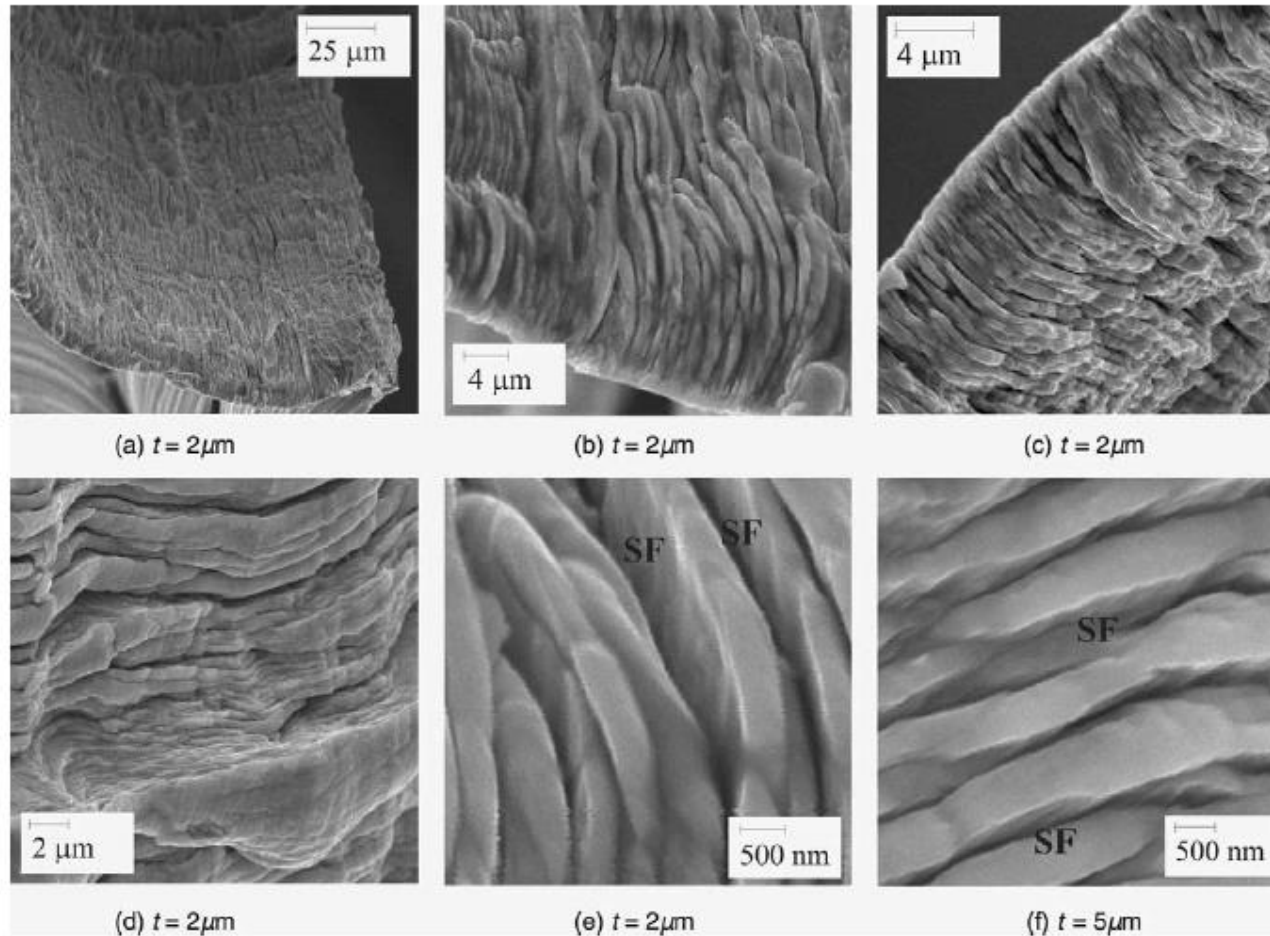


Fig. 6. Lamellar structure of the chip as seen from the free surface of the chip. With the uncut chip thickness indicated under each image, each lamellae is separated by a Shear Front (SF), highlighted in (e) and (f)

Unutrašnja površina strugotine pokazuje izbrazdanu površinu usled plastičnog deformisanja

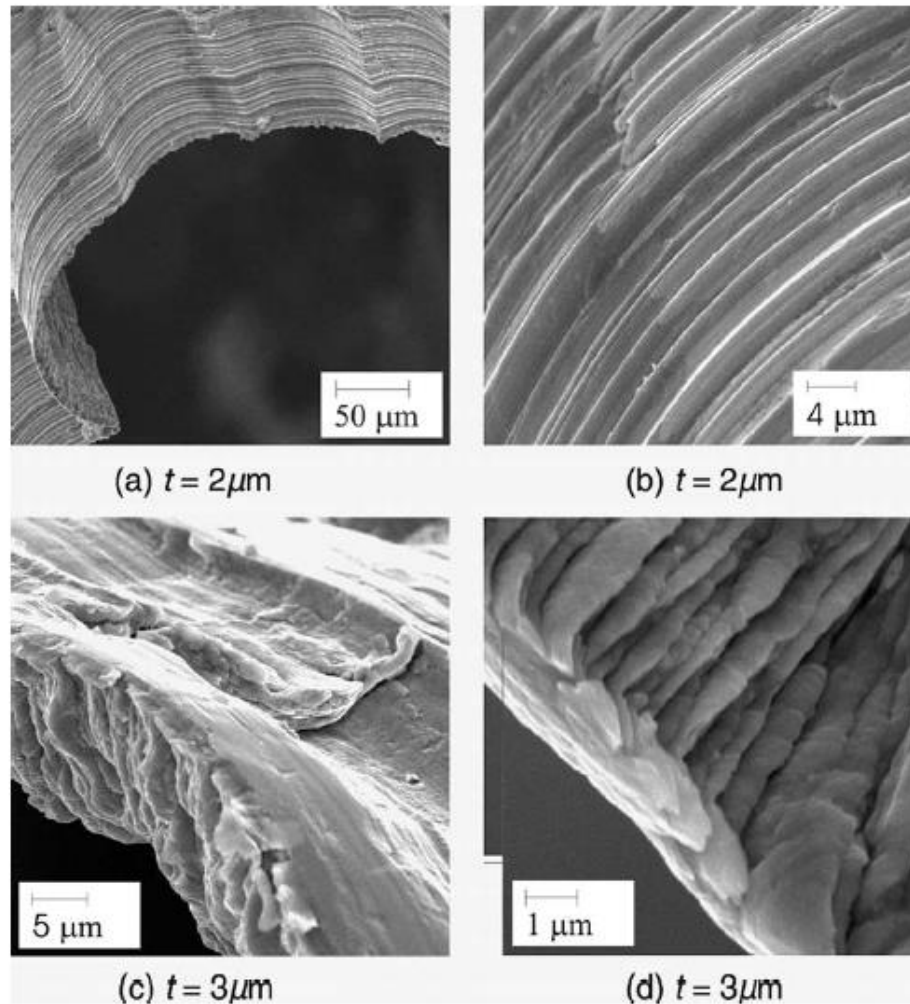
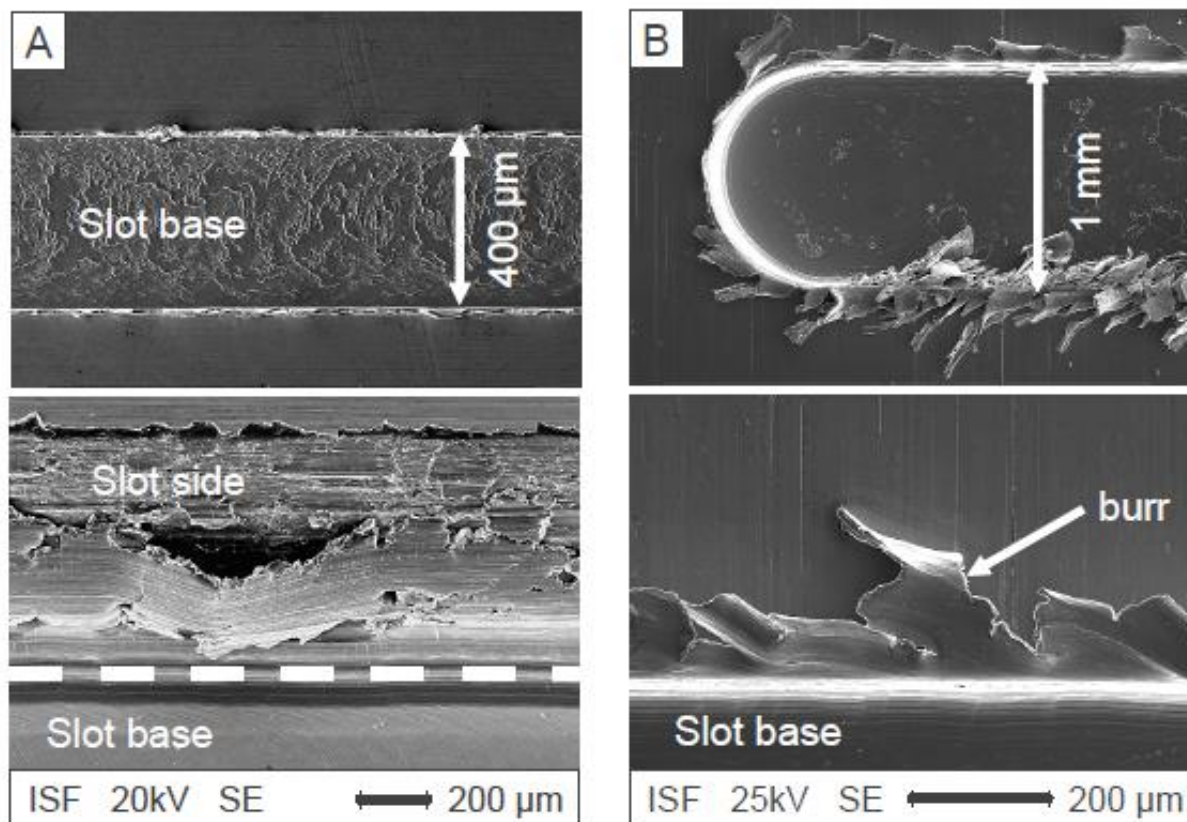


Fig. 7. SEM images of the chip underside for specified uncut chip thicknesses. Heavy gouging can be seen in (a)–(c), while (d) illustrates the extensive plastic deformation of the lamellae at the edge of a chip.

Posebni defekti se javljaju u vidu oštih neravnomernih ivica i lamelnog odvajanja materijala na bočnim stranama kod mikro glodanja



(a) Adhesion

(b) Burr formation

Figure 9: Typical surface defects in micromilling (work material: NiTi shape memory alloy) [47].

MODELIRANJE MIKRO REZANJA

Pošto analitički modeli podrazumevaju veliki broj pretpostavki, numerički modeli su bolje sredstvo za razumevanje i opisivanje mikro rezanja.

FE *finite element* modeliranje

- bazira se na principu kontinualne mehanike gde se materijal definiše kao kontinualna struktura, koja se modelira elementima sa čvornim tačkama za koje su poznata pomeranja na osnovu Lagranž Ojlerovih formulacija
- nedostak je zanemarivanje kristalne strukture i granica zrna

MD *molecular dynamic* modeliranje

- bazira se na principu modeliranja molekula na mikroskopskoj skali prema atomskoj strukturi
- nedostak je dimenziono ograničenje i prikaz strukture bez grešaka (dislokacije i praznine)

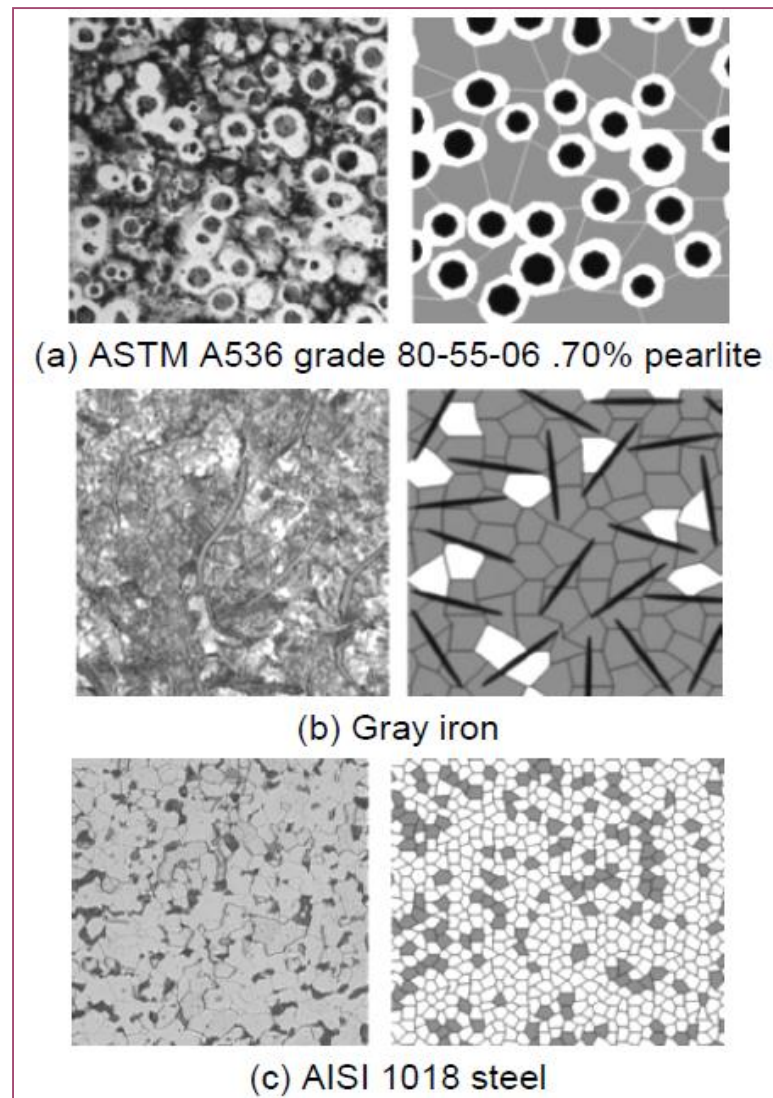
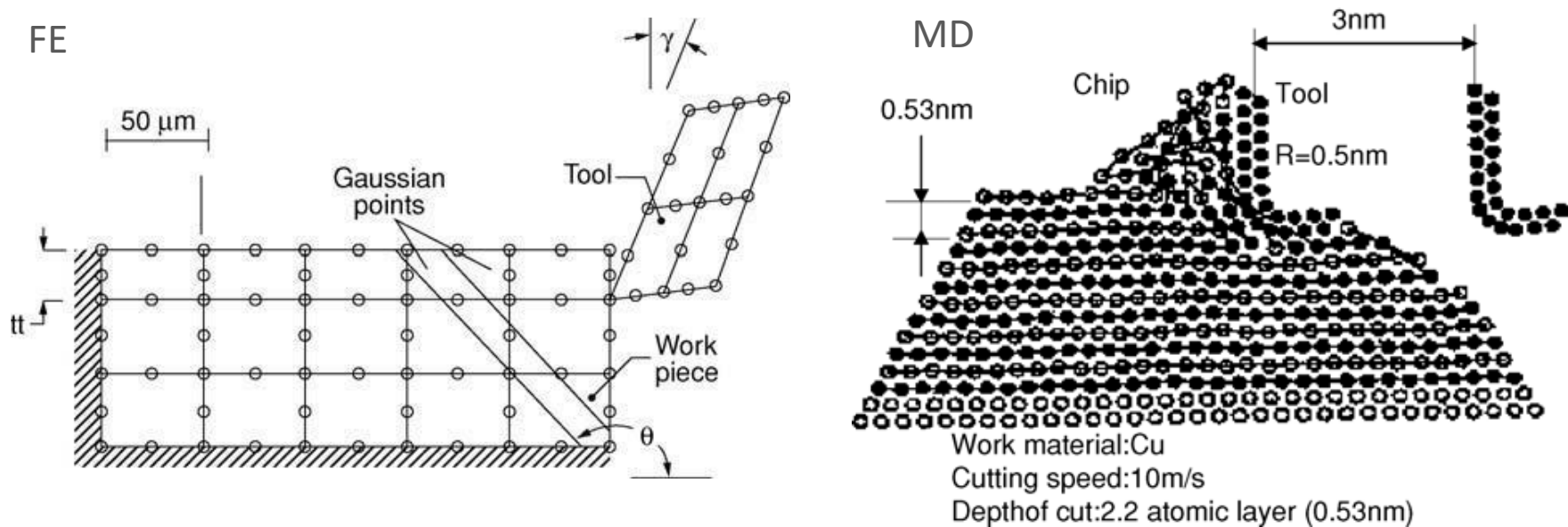
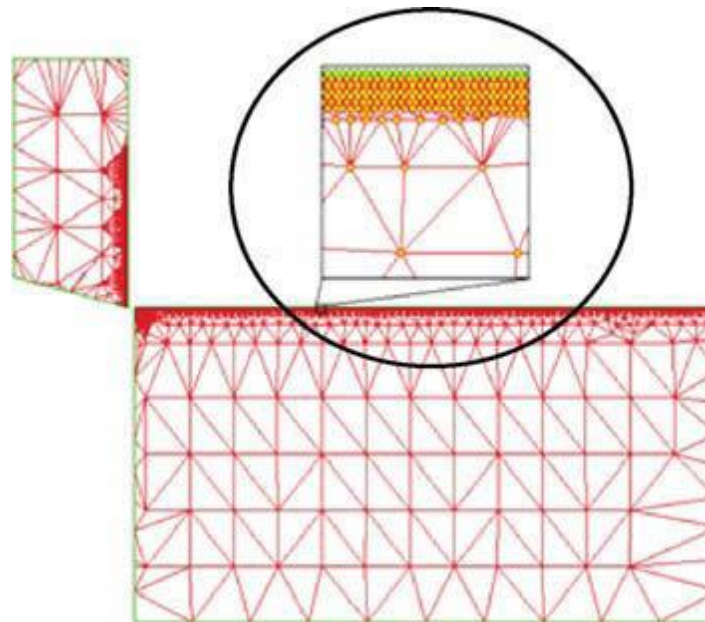


Figure 12: Actual (left column) and simulated (right column) microstructures of different ferrous materials [65].



HIBRIDNO modeliranje

- obezbeđuje atomski opis u kritičnoj oblasti i konačne elemente za ostatak modela
- brzina procesiranja i tačnost su zadovoljavajuće





Primena CAD/CAM neophodna za izradu kompleksnih delova
Pločica za lumbalni implant koja se izrađuje na 5-osnoj mašini.

MIKRO BUŠENJE

Obrada otvora prečnika od nekoliko desetina μm

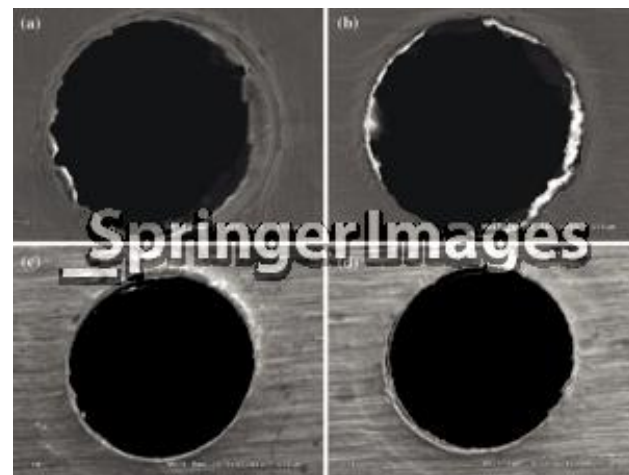
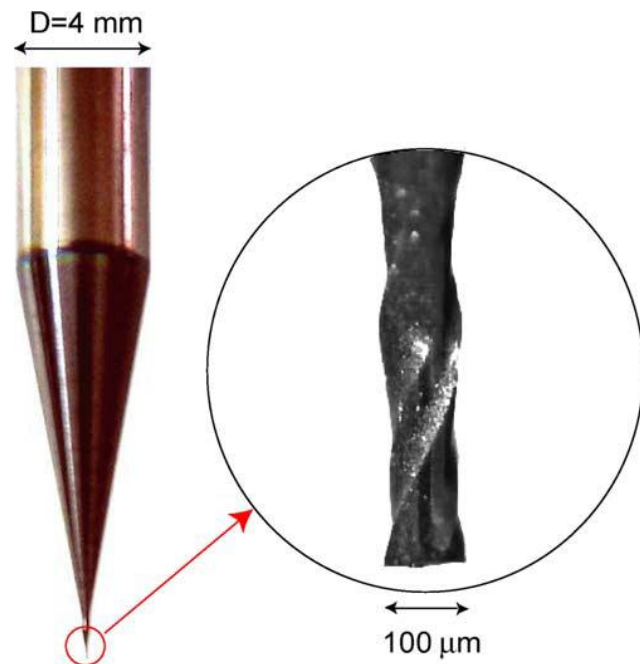
Koriste se za različite namene

PREDNOSTI

- Lako se obrađuje većina metala, plastičnih masa i kompozita
- Vremenom obrade se lako može upravljati preko koraka po obrtu

MANE

- Teško ostvariva pravost – otvori su zakošeni
- Teško se obrađuju tvrdi ili kruti materijali – upotrebljavaju se dijamantske burgije i mala dubina rezanja i korak



ALATI

- Izrada mikro alata je veliki izazov u mikro rezanju
- Nedovoljno precizna geometrija alata često negira prednosti ultra preciznog procesa
- Umanjenje makro alata menja i fizikalnost procesa i mehanizam uklanjanja materijala

PRIMERI

- Elektro erozivnom obradom (EDM) su izrađeni loptasto glodalo i vretenasto glodalo poluprečnika $10\ \mu\text{m}$.
- Elektro erozivnim brušenjem (EDG) je izrađena mikro burgija poprečnog preseka u obliku slova D, radijusa zaobljenja od $0.5\ \mu\text{m}$
- Obradom jonskim zracima je izrađeno glodalo od brzoreznog čelika prečnika $25\ \mu\text{m}$ i alat od brzoreznog čelika i volfram-karbida za izradu žljebova i zavojnica, dužine rezne ivice od $13\ \mu\text{m}$
- Rezanjem je izrađen alat koji izgleda kao tanka žica prečnika $25\ \mu\text{m}$



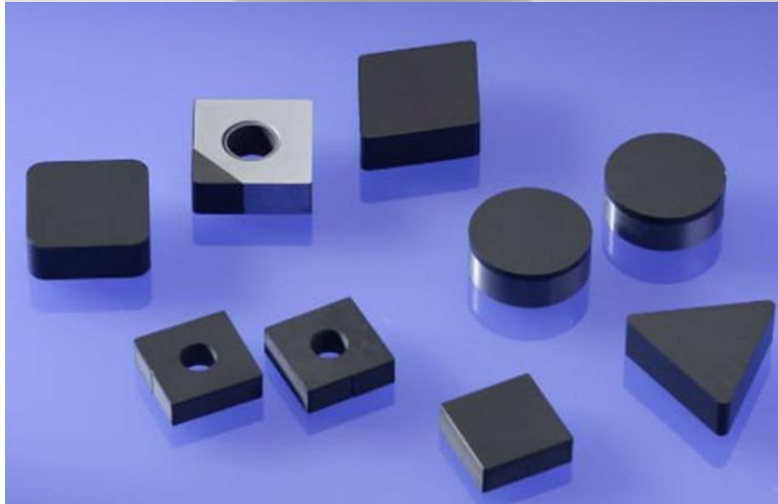
DIJAMANTSKI ALATI

- Zbog svoje čvrstoće dijamant je poželjan materijal alata za mikro rezanje.
- Nedostatak je veliki afinitet ka gvožđu, zbog čega se obrađuju neferitni materijali kao što su mesing, aluminijum, bakar i niki. Hemijska sklonost ka čeliku se ogleda u difuziji i neprihvatljivom habanju.

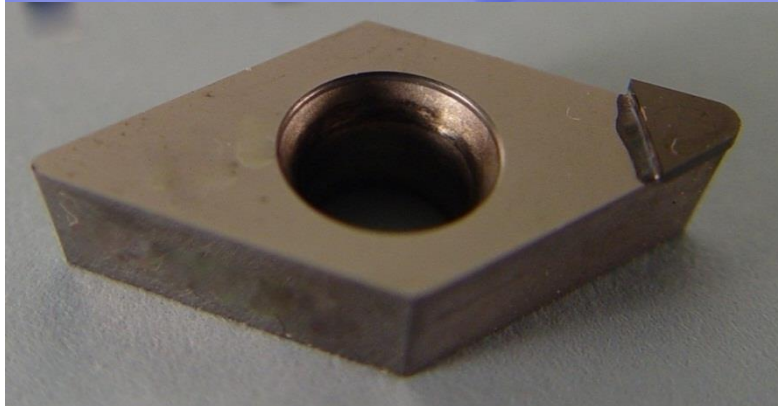




Monokristalni dijamantski alat SCD (single-crystal diamond) ima oštru reznu ivicu, koja se lako dobija brušenjem, usled čega je to bio najraniji izbor za alat.



Polikristalni dijamantski alati PCD (poly-crystal diamond) se dobijaju sinterovanjem dijamantskog praha u rezne pločice.



Tanki filmovi dobijeni naporavanjem CVD (chemical vapor deposition) kao dijamantske prevlake se takodje koriste za alate.

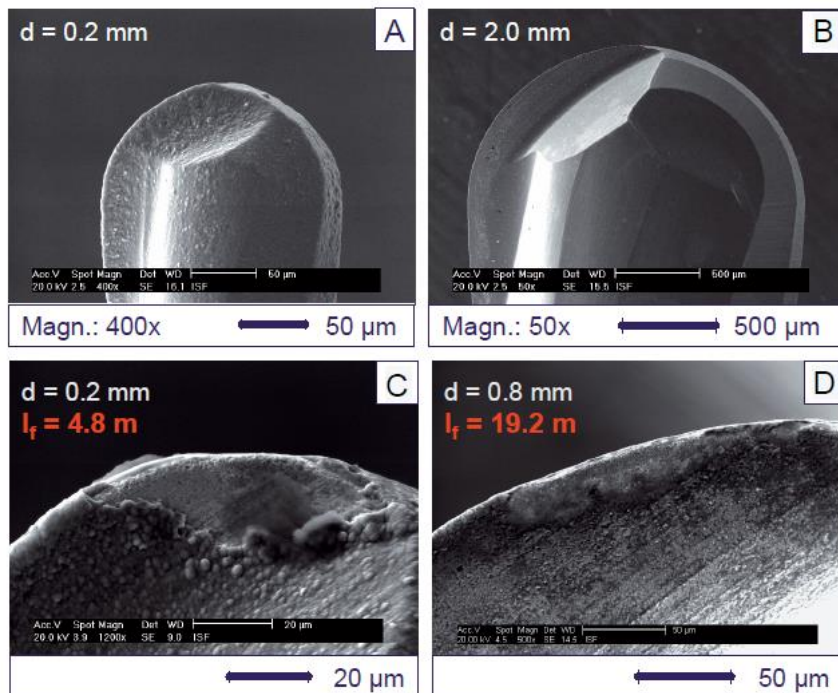


Figure 29: Scaling effect on tool geometry and wear (work material: 40CrMnMo7, 50 HRC, cutting speed: $V_c = 200/100$ m/min, depth / width of cut: $a_p = a_e = 0.04 \times d$, feed: $f_z = 0.01 \times d$, number of teeth: 2, down milling, tool material: cemented carbide with TiAlN coating) [47].

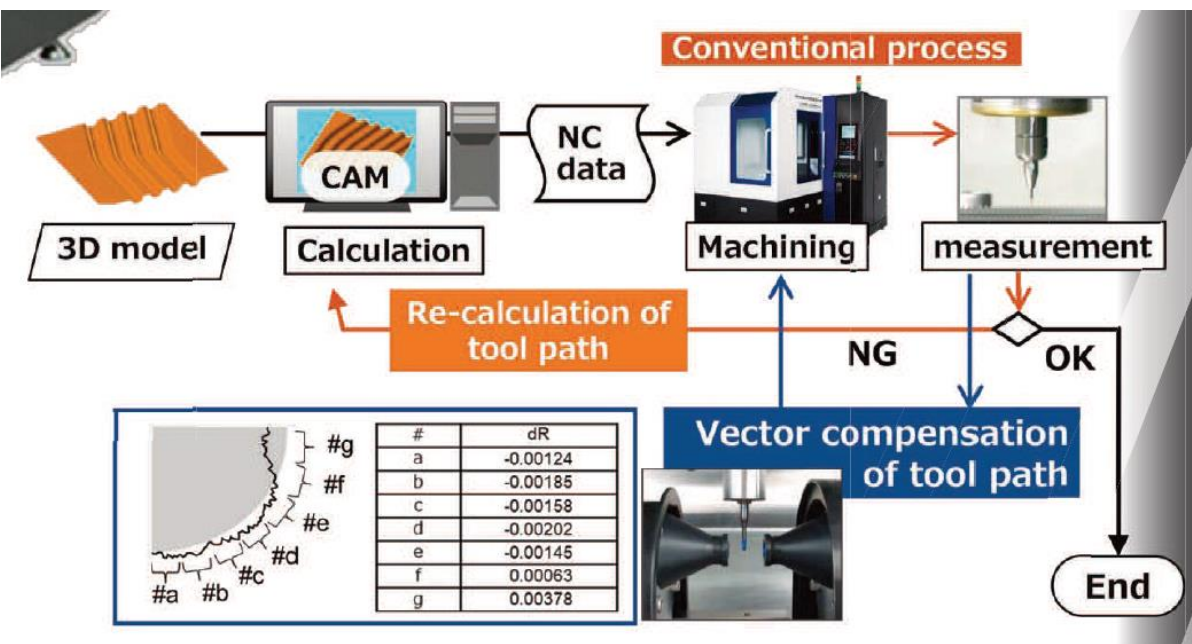
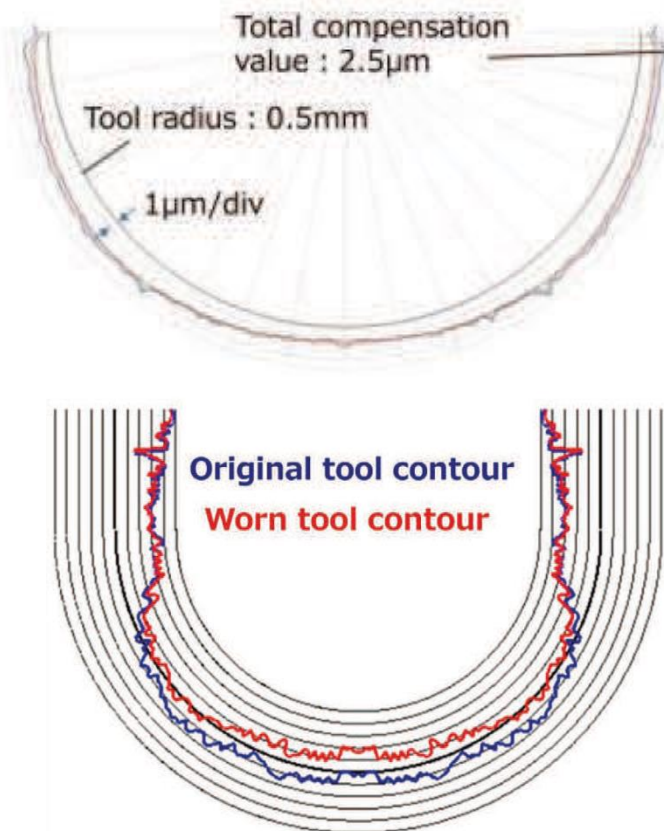
LOM GLODALA

je čest i nepredvidiv

1. Jedan od mehanizama loma reznog alata polazi od zaglavljivanja strugotine, usled čega se sila rezanja brzo uvećava. Nakon samo nekoliko obrta dolazi do loma alata.
2. Sledeći mehanizam loma alata opisuje neočekivan i vrlo redak slučaj. Nakon što se alat počne habati, uvećanje sile rezanja izaziva zamor vratila, koje se na kraju lomi.
3. Poslednji mehanizam se odnosi na lom usled intenzivnog napona, koji se javlja kada pohabani alat postane tup. Tup alat ne može da ukloni dovoljno materijala i oslobodi prostor za središnji deo alata. Usled toga se vratilo savija. Ovo savijanje uz konstantni korak izaziva intenzivan napon koji dovodi do loma.

OSNOVE MIKRO OBRADE – MIKRO REZANJE - 23

- Merni uređaji za kontrolu pozicije i prečnika kod obrtnih alata su česti u konvencionalnoj obradi. Greška konture alata se direktno prenosi na obradak.
- Za rešenje takvog problema Shibaura je razvio VectriComp softver za kompenzaciju greške. Softver na osnovu CAD modela i putanje alata generisane u CAM poredi zadato sa stvarnim rezultatom obrade i analizira.
- Proces poznat kao vektorska kompenzacija automatski kontroliše koordinate koje treba ostvariti na mašini. Na taj način se lakše ostvaruje dobar kvalitet po pitanju oblika uz znatno smanjenje gubitka u ukupnom vremenu izrade.



MAŠINE ALATKE

- Većina eksperimentalnih istraživanja su rađena ili na konvencionalnim ultrapreciznim mašinama alatkama ili na specijalnim mašinama napravljenim od strane istraživača
- Vremenom su tačnost kretanja, krutost i sposobnost mašina unapređivani

KONSTRUKCIJA MAŠINE ALATKE

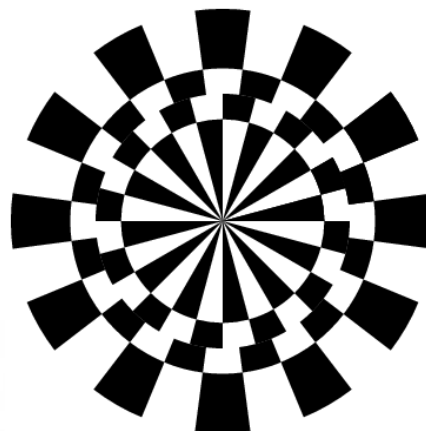
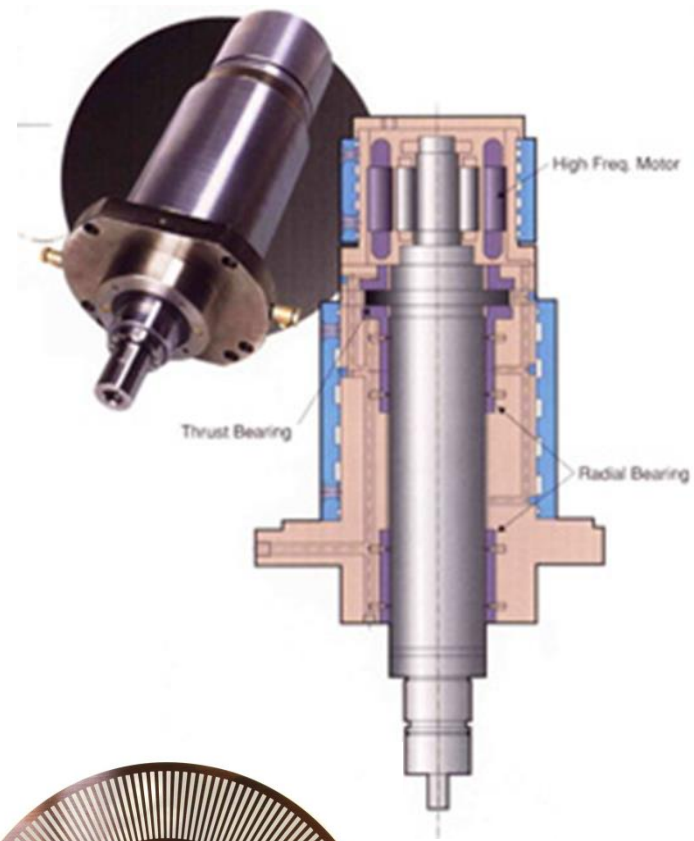
✓ Temperaturska stabilnost (kompaktna, zatvorena konstrukcija)

Noseća struktura od ZERODURA (aluminijum silaktno keramičko staklo sa veoma malim koeficijentom toplotnog širenja), polimernog betona (polimer je vezivni materijal, velika čvrstoća), sintetičkog granita (epoksi je vezivni materijal, velika čvrstoća i mali koef. topl. širenja)...



OSNOVE MIKRO OBRADE – MIKRO REZANJE - 25

- ✓ Precizno nošenje vretena primenom vazdušnih ležajeva, kao i hidrostatičke linearne vođice
- ✓ Pozicioniranje se ostvaruje kliznim vođicama ili aero-hidrostatičkim klizačima
- ✓ Velika rezolucija linearnih i obrtnih motora
- ✓ Optički i laserski enkoderi kao merni sistemi
- ✓ Upravljačka jedinica je PC





Commercial 5-axis control ultraprecision machining center [132].

Komercijalni 5-osni ultraprecizni OC sa aerostatičkim vođicama i linearnim motorom bez jezgra ima tačnost kretanja od 1nm, a termičku stabilnost obezbeđuju komponente noseće strukture od alumine

KERN Micro za obradu makro delova i primitiva na nanoskali

- 5-osni vertikalni obradni centar
- Radni prostor od 350mm u prečniku i 220mm visine
- Rezolucija od $\pm 0.5\mu\text{m}$ i tačnost od $\pm 2\mu\text{m}$
- Izmenjivač sa više od 200 alata
- Automatski izmenjivač paleta
- Laserski merni sistem





(a)



(b)



(c)



(d)

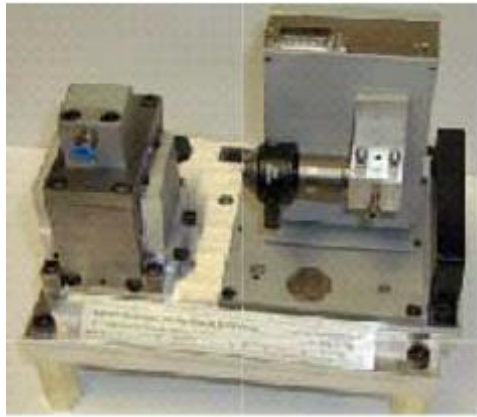


(e)

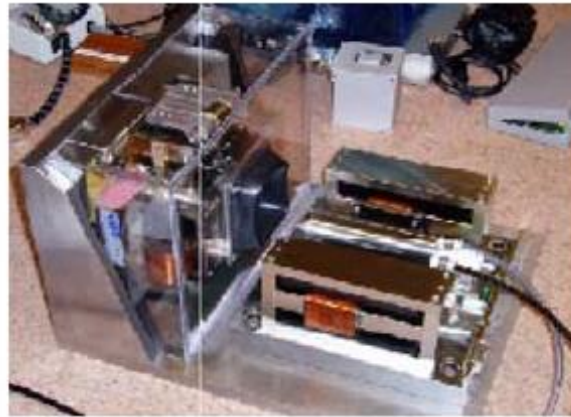


(f)

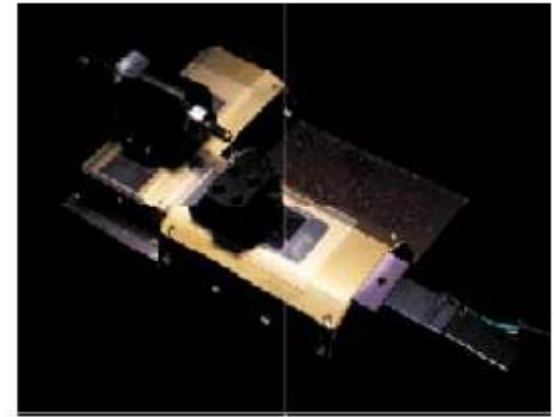
Fig. 5. Commercial ultra precision machine tools: (a) DT-110 [122]; (b) W-408MT [123]; (c) Hyper2j [124]; (d) Kugler [35]; (e) Kern [33]; (f) Mori Seiki [125].



(a)



(b)



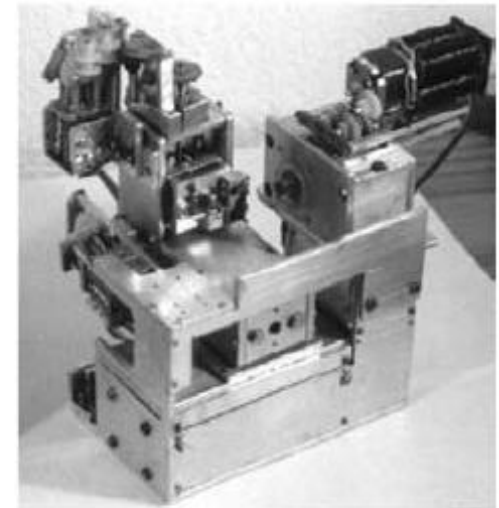
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 6. Micro-machines (a) micro-factory [36]; (b) 2nd generation miniature machine [36]; (c) commercial miniature machine [126]; (d) miniature machine [21]; (e) micro-factory [22]; (f) micro-machine tool [24].

Literatura

Annals of the CIRP Vol.49/2/2000

Annals of the CIRP Vol.52/2/2003

Annals of the CIRP Vol.55/1/2006

Annals of the CIRP Vol.55/2/2006

Annals of the CIRP Vol.57/2/2008

Annals of the CIRP Vol.58/1/2009

International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006)

International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007)

<http://www.dieterle-tools.de/>

<http://www.emuge.com/>

<http://www.hellotrade.com/technodiamant/product.html>

http://www.urgelesdiamant.com/en/materiales_superduros.html

<http://www.precitech.com>