

## Erremintetarako zeramiko eta zernet direlako diseinu mikroegiturala

Miren Gotzone Barandika\*

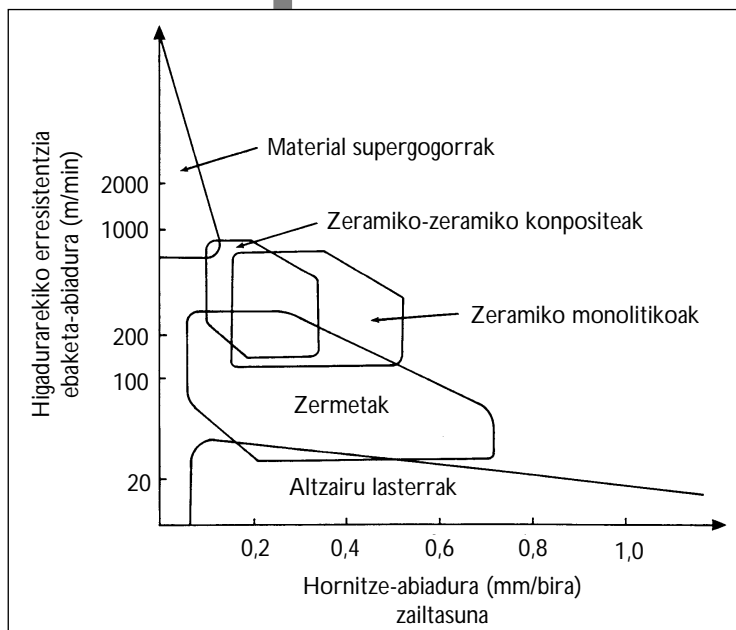
**E**uskal Herriko makina-erremintaren industri arloa tradizio handikoa dela eta, sektore honetan, I+G ikuspuntutik, gertatzen ari denari adi egotea komeni da. Erremintetarako materialen artean, lau talde nagusi bereiz daitezke: material supergogorak, material

zeramikoak (monolitikoak eta konpositeak), zernetak eta altzairu lasterrak. 1. irudian ikus daitekeenez, material hauen higadurarekiko erresistentzia eta zailtasuna, alderantziz proportzionalak dira; beraz, ebaketa-baldintzen arabera, material bat edo bestea aukeratu behar da.

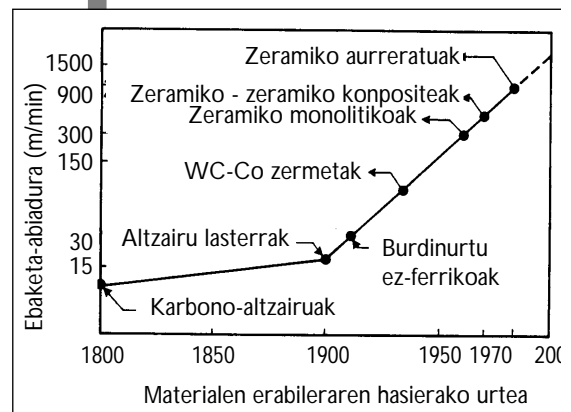
Gaur egungo teknologia, ebaketa-abiaduraren handiagotzeari jarraitzen zaio (2. irudia). Ebaketa-erreminten ikuspuntutik, abiaduraren handiagotze honek, ondoko bi

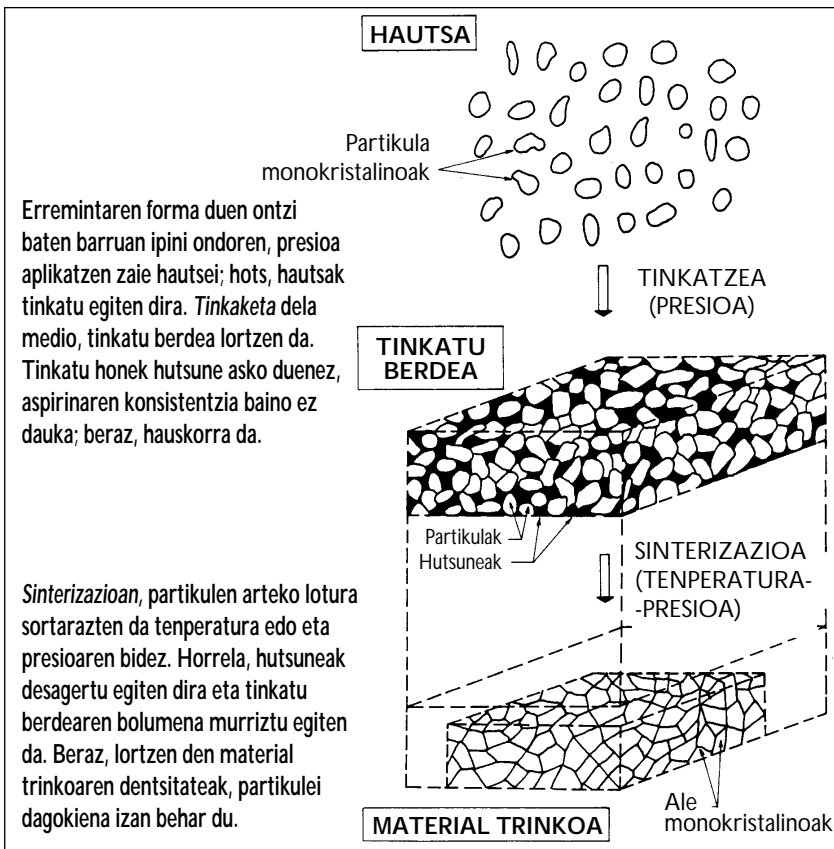
ondorio nagusiak sortarazten ditu: alde batetik, erremintek jasan behar dituzten tentsioak gero eta handiagoak dira, eta, bestetik, ebaketa zehar lortzen diren temperaturak, gero eta altuagoak. Baldintza latz hauetarako, material egokiak erabili behar dira; hots, goi-tenperaturetan gogorak eta erresistenteak diren materialak. Halaber, zailtasuna garrantzi handikoa da prozesu ez-jarraietan, materialek talka mekanikoak jasateko gai izan behar dutelako. Idazlan honetan, erremintetarako zeramiko eta zernet direlako diseinu mikroegiturala aztertuko da; material hauen propietateak aipatutako ebaketa-baldintza latzetarako aproposak baitira. Zeramikoen zailtasun eza dela kausa, material hauen ezaugarriak ez dira ondo ulertu eta ez ondo erabili. Hala ere, azken hamarkadan, aurreko 40 urteetan baino gehiago ikertu da material hauei buruz. Zerneten garapena, erabat ezberdina izan da, zementaturiko karburoak aspalditik erabili direlarik. Dena den, material hauen diseinuak zeramikoen problematikarekin zerikusi handia duela eta, elkarrekin aztertzea komeni da. Bestalde, idazlan honen zenbait alderdi argitzearren, material metalikoak hartu dira konparazio gisa, material hauen portaera gutzientzat ezagunagoa delako.

1. irudia. Ebaketa-baldintzen arabera erremintetarako materialen sailkapena.



2. irudia. Denboran zehar ebaketa-erremintetarako materialek izandako eboluzioa.





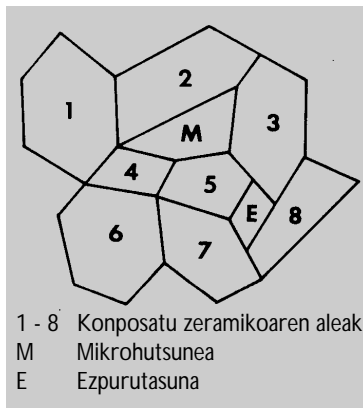
Erremintaren forma duen ontzi baten barruan ipini ondoren, presioa aplikatzen zaie hautsei; hots, hautsak tinkatu egiten dira. Tinkaketa dela medio, tinkatu berdea lortzen da. Tinkatu honek hutsune asko duenez, aspirinaren konsistentzia baino ez dauka; beraz, hauskorra da.

Sinterizazioan, partikulen arteko lotura sortarazten da tenperatura edo eta presioaren bidez. Horrela, hutsuneak desagertu egiten dira eta tinkatu berdearen bolumena murriztu egiten da. Beraz, lortzen den material trinkoaren dentsitateak, partikulei dagokiena izan behar du.

3. irudia. Hauts-teknologia.

**Konposatuetatik materialera: mikroegitura**

Zeramiko estrukturalak, ondoko konposatu kimikoetan oinarritzen dira: hots, hainbat nitruro ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ , TiN, ...), karburo (WC, SiC, ...), oxido ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , ...) eta boruro ( $\text{TlB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ , ...) dire-



1 - 8 Konposatu zeramikoaren aleak  
M Mikrohutsunea  
E Ezpurutasuna

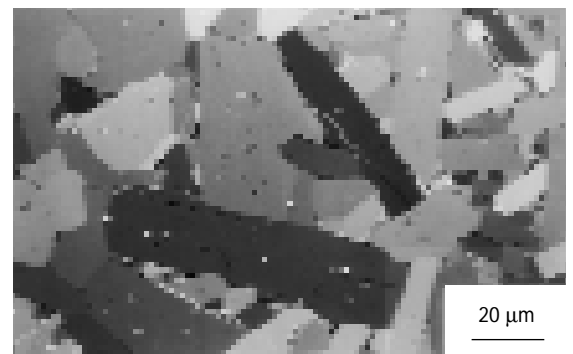
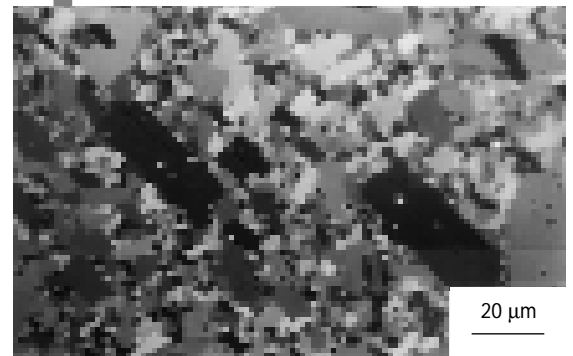
4. irudia. Mikroegituretan aurki daitezkeen mikrohutsune eta ezpurutasunen adibidea.

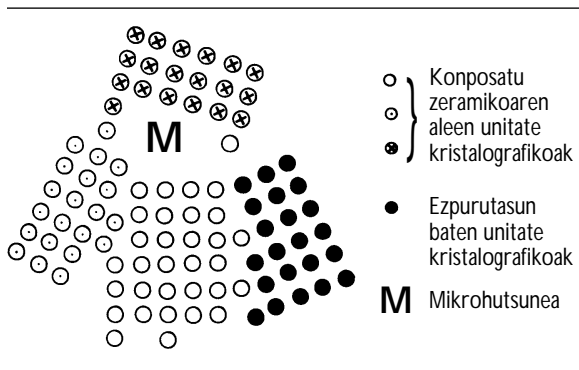
lakoetan batez ere. Erreminten fabrikazioaren ikuspuntutik, konposatu hauen egokitasuna, beren elementuen arteko lotura kimikoetan datza. Lotura hauek oso gogorak eta direkzionalak direnez, konposatu hauen egitura kristalografikoak, oso erresistenteak eta zurrunkak dira (ia deformaezinak), propietate hauek oso tenperatura altuetan mantendu egiten direlarik. Halaber, konposatu hauek kimikoki egonkorak direnez, ia edozein material mekanizatzeke gai dira. Dena den, zeramiko estrukturalen ezaugarriak, konposatuetan ezezik, mikroegituran ere badautza.

Oro har, zeramikoaren fabrikazioa, hauts-teknologiaren bidez burutzen da (3. irudia), prozesuaren hasieran, materialen osagaiak (konposatu kimikoak) hauts modura erabiltzen direlarik. Hauts hauen partikulak konposatuaren monokristalak direla eta, beren portaera konposatuaren portaera intrintsikoari dagokio. Hauts hauetatik zeramiko estrukturalak fabrikatzeko, partikulen arteko loturak sortaraztea besterik ez

da egin behar. Azken hau lortzeko, hautsak tinkatu eta sinterizatu egin behar dira. Bi prozesu hauetan, tenperatura edo eta presioaren bidez, material trinkoa lortzen da: ale monokristalinoz osatutakoa, hain zuzen ere. Prozesu idealean, materialaren bolumen osoan ez du partikulen arteko hutsunerik egon behar; beraz, materialaren dentsitateak, konposatu kimikoari dagokiona izan behar du. Zoritxarrez, materialaren bolumenean zehar, poroak aurki daitezke askotan. Halaber, fabrikazio-prozesutik datozen ezpurutasunak ere egon daitezke (4. irudia). Bestalde, aleen tamaina, morfologia eta banaketa direlakoek, aleen arteko loturak baldintzatzen dituzte. Beraz, aipatutako alderdi hauek, mikroegitura definitzen dute. Hau dela eta, konposatu berberaz egindako materialek, mikroegitura ezberdinak izan ditzakete (5. irudia). Bai mikroegituraren akatsetan (hutsuneetan zein ezpurutasune-

5. irudia. Bi  $\text{TiB}_2$ -zeramiko monolitikoaren mikroegiturak (José Manuel Sánchez, CEIT). Fabrikazioaren aldagaien bidez, mikroegitura kontrola daiteke. Irudiko adibidean, hasierako hautsen partikulek tamaina ezberdinak zituzten.





6. irudia. Mikroegituraren mugetako atomoen arteko loturen distortsioa. Alea-alea, alea-ezpurutasuna eta alea-mikrohutsunea motetako mugak aurki daitezke mikroegituretan.

tan) eta bai aleen arteko mugetan elementuen arteko banaketa espaziala distortsionatuta dagoenez, bertako loturak aleen barneko atomoen artekoak baino makalagoak dira (6. irudia). Beraz, mugak eta akatsak, mikroegituraren puntu ahulak dira. Hau dela kausa, materialen propietate mekanikoak, beren osagai monokristalinoenak (konposatu kimikoenak) baino txarragoak izaten dira.

## Zeramikoen problematika

Material estrukturalen arloan, portaera mekanikoa deskribatzeko ondoko propietateak erabiltzen dira: gogortasuna, zurruntasuna, hausturarekiko erresistentzia eta zailtasuna.

Zeramikoak oso gogorrak direnez, higadurarekiko erresistentzia altuko ebaketa-erremintak fabrikatzeko oso material aproposak dira. Bestalde, oso zurrunak direla eta, oso gutxi deformatzen dira tentsio-eremuaren menpe daudenean. Halaber, 7. irudian ikus daitezkeenez, material zeramikoak metalikoak baino tentsio altuagoak jasateko gai dira.

Dena den, material zeramikoaren aplikagarritasunaren problematika, hausturarekiko portaeran datza. 7. irudian adierazi denez,

zeramikoek jasan dezaketen tentsio maximoa gaindituz gero, materialak berehala hausten dira. Deformagarritasun eza dela kausa, material hauek ezin dute egokiarazi 'soberako' tentsioa. Beraz, zeramikoaren haustura, katastrofikoa da (plater bat lurrera erortzen denean bezalako). Material metalikoak, berriz, beraien dagokien tentsio maximoa gainditi ondoren, plastikoki deformatzen dira hausti baino lehen. Hain zuzen, material hauek, deformazioaren bidez egokiarazten dituzte tentsioak; mikroegituraren aleak harikorrak baitira. Adibide modura, kolpea hartuz gero; automobiletan suertatzen diren mailatuak aipa daitezke.

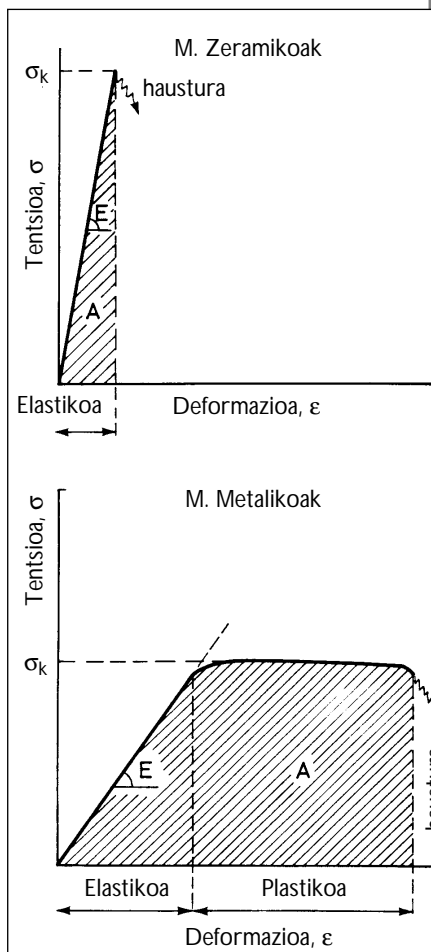
Prozesuen etekina oso garrantzizkoa da edozein industri ekinztatan. Beraz, ikuspuntu honetatik, katastrofikoki hausten diren erremintek ez dirudite oso apro-

posak. Hala ere, material zeramikoaren gainerako propietateak oso egokiak direla kontutan harturik, ahalegin zientifiko nabarmena egin da zeramikoaren hausturarekiko portaera hobetzearren.

Haustura definitzen duten parametroak ondokoak dira: hausturarekiko erresistentzia (materialak jasan dezaketen tentsio maximoa adierazten duena) eta zailtasuna (materialak hausti orduko xurgatzen duten energiarekiko proportzionala dena). Zer esanik ez, material zeramikoaren zailtasun eskasa, arazorik handiena da ebaketa-operazioetan.

Lehen esan denez, materialen portaera ondoko bi mailetan de-

## 7. irudia. Material (a) zeramiko eta (b) metaliko direlakoaren tentsio/deformazio-kurba tipikoak.



Tentsio kritikoa, ( $\sigma_k$ ), baino txikiagoaren menpe, materialak elastikoki deformatzen dira. Hots, margokiari gertatzen zaion bezala, tentsioaren eraginetik kanpo, materialak beren hasierako egoerara itzultzen dira. Materialek jasaten duten tentsio eta deformazio elastiko direlakoak erlazionatzen dituen parametroa, Young-en modulu da ( $E$ ).

Hots,  $\sigma = E \epsilon_{elas}$ . Modulu hau, materialen zurruntasunarekiko proportzionala da. Beraz, argi ikus daiteke material zeramikoak metalikoak baino zurrunagoak direla; hau da,  $E_{zer} > E_{met}$ .

Tentsio kritikoa gaindituz gero, material metalikoak plastikoki deformatzen dira: hau da, betirako. Tentsio kritikoa gainditzean sortutako pitzadurak hazteko, oso energia altua inbertitu behar da. Horrela, materialek deformazioaren bidez barreiatzen dituzte tentsioak. Hala ere, tentsioaren eraginak segitu egiten baldin badu, azkenean materialak hausti egingo dira.

Material zeramikoek, aldiz, deformatzeko ahalmena murriztua dute. Hau dela eta, elastikoki baino ez daitezke deforma. Beraz, tentsio kritikoa gainditi ondoren, materialak katastrofikoki hausten dira. Hots, pitzadurak sortzea eta haztea berehalako prozesuak dira.

Tentsio indarra dela eta deformazioa distantzia dela kontutan harturik, margotutako A azalera materialak hausti arte xurgatzen duen energia da. Energia hau zailtasunaren neurria dela eta, oso erraz uler daiteke zeramikoek zailtasun eskasa zergatik duten. Zeramikoek ordea, material metalikoek baino tentsio handiagoa jasan dezakete. Tentsio kritikoa zeramikoaren hausturarekiko erresistentzia definitzen du.

finitu behar da: konposatu kimiko eta mikroegitura direlakoe-tan. Konposatu kimikoen portaera intrintsekoa aldaezina denez, portaera mekanikoa hobetzeko bide bakarra mikroegitura aldatzea da. Horretarako, haustura-prozedura ezagutzea komeni da. Materialen hausturan, ondoko bi prozesuek parte hartzen dute:

- pitzadurak sortzea (tentsio kritikoa gainditzen denean)
- pitzadurak haztea (tentsio-eremuak hornitzen duen energiaz baliatuz)

**Zeramikoaren diseinurako oinarriak**

Hausturan parte hartzen duten prozesuak kontutan harturik, ondokoa ondoriozta daiteke:

- pitzadurak sortzea zenbat eta zailagoa izan, hausturarekiko erresistentzia, hainbat eta handiagoa da
- pitzadurak hazten xurgatzen den energia zenbat eta handiagoa izan, zailtasuna hainbat eta handiagoa da

Zeramiko monolitikoei dagokionez, ondokoan ihardun da. Alde batetik, mikroegiturak gero eta garbiagoak lortzen ari dira, hau da, akats gutxi dauzkaten mikroegiturak. Horrela, pitzadurak sortzeko probabilitatea jaitsi egiten da eta mikroegituraren hausturarekiko erresistentzia, ale monokristalinoari dagokion baliara hurbiltzen da. Halaber, baldin eta akatsak elkarrekiko urrunago badaude (gutxi daudelako), pitzadurak haz daitezkeen energia gehiago xurgatu behar du materialak; pitzadurak haztea akats-tan sortutako mikropitzadurak elkarri konektatzean baitatza. Beraz, zailtasuna ere hobe daiteke. Bestetik, gero eta mikroegitura finagoak lortzen ari dira, zeren eta, aleak zenbat eta txikia-

goak izan, hausturarekiko erresistentzia hainbat eta handiagoa baita.

Adierazitako bi helburuak lortze-arren, erabiltzen diren hautsak purutasun handiko eta partikula txikikoak dira. Halaber, dentsifikazioa erabatekoa izan dadin eta tinkatuak kutsa ez daitezkeen, fabrikazio-teknika sofistikuatuak erabiltzen ari dira.

Horrela lortutako zeramiko monolitikoen portaera mekanikoa nabarmenki hobea izan arren, esandakoa ez da diseinubide bakarra. Hain zuzen ere zeramiko monolitikoetatik, zeramiko-zeramiko eta zeramiko-metal konpositeak garatu dira.

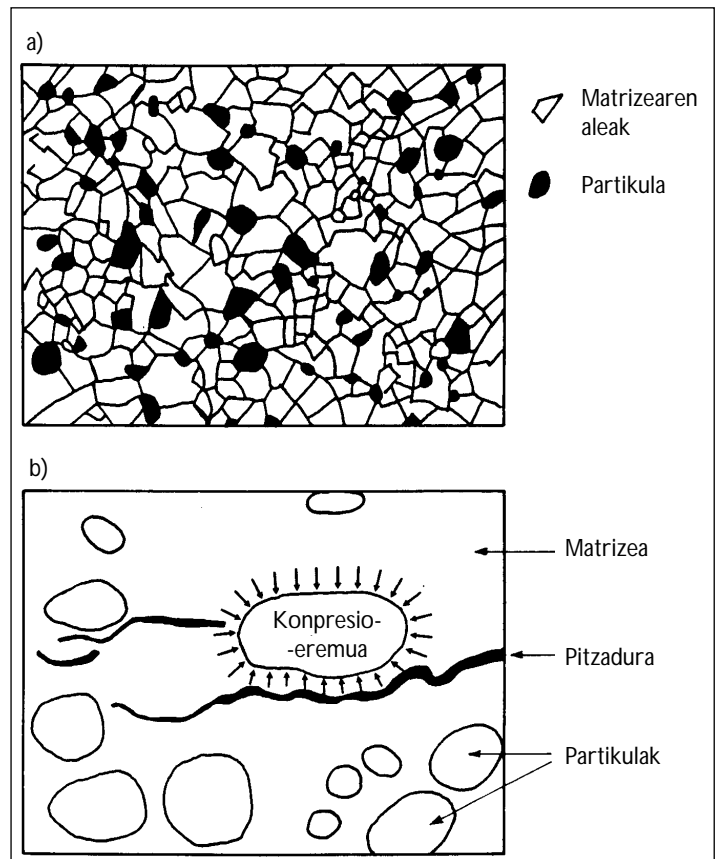
**Zeramiko-zeramiko konpositeak**

Konposite hauek, bi konposatu "zeramiko" dituzte osagai modura. Konposatu ugarienez osatutako ale-egiturari, matrizea deritzo. Beste konposatuaren aleak, homogenoki banatuta daude matrizean zehar. Bigarren fase honen funtzioaren arabera, ebaketarako ondoko bi zeramiko-zeramiko materialak bereiz daitezke nagusiki:

- Partikulen bidez sendotutakoak
- Fase transformakor baten bidez sendotutakoak

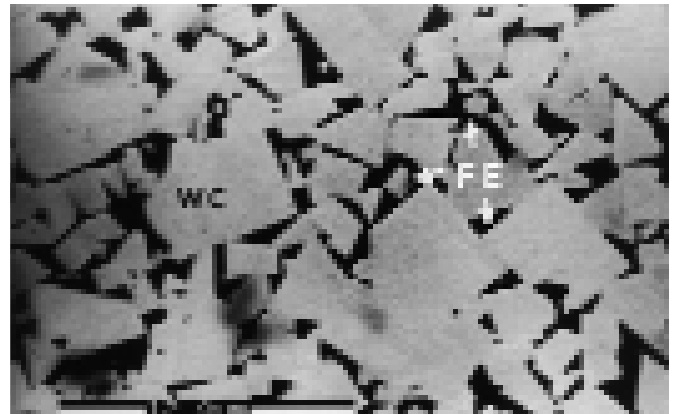
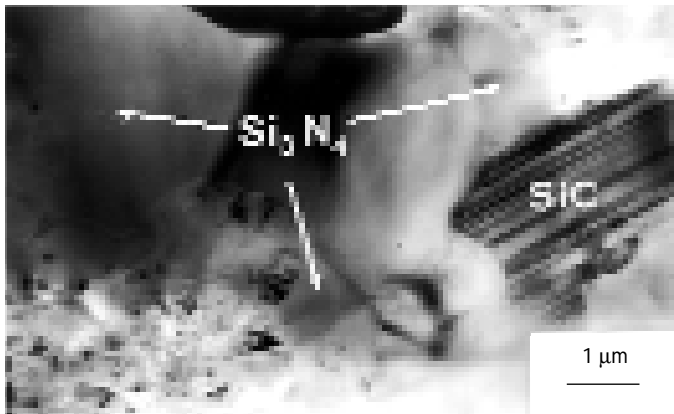
Partikulen bidez sendotutako konpositeen bigarren konposatuaren aleei, elkarrekin loturik ez daudenez, partikula deritze (8. irudia). Matrizeak kanpo-tentsio-

ak barreiatzearen partikulen kontrako indarra eragiten dutela eta, partikula hauek, tentsio-eremu konpresibo baten menpe daude. Beraz, tentsio-eremua jasateko, partikulek matrizeak baino zurrunagoak izan behar dute. Tentsio-eremu honek bai pitzadurak sortzea eta bai pitzadurak haztea eragozten du. Pitzadurak sortzeari dagokionez,

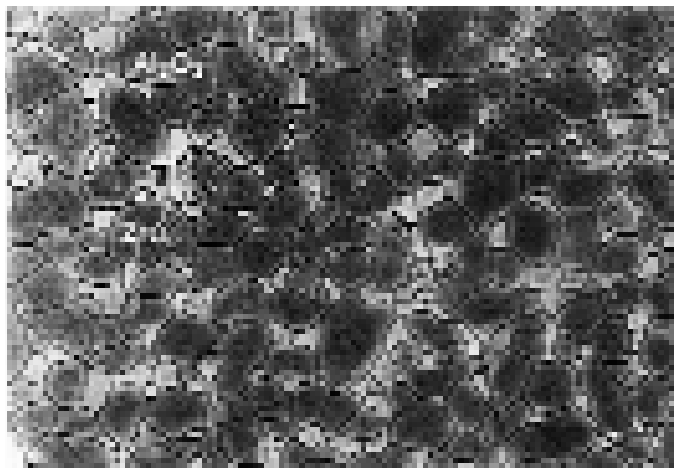


8. irudia. (a) Zeramiko-zeramiko konpositearen mikroegitura tipikoa. (b) Konposite hauetan, partikulek jasaten duten konpresio-eremua, pitzadurak desbideratzen ditu. Halaber, pitzadurak adarka daitezke aurkitzen duten eragozpena dela kausa.

partikulak tentsioen metatze-kokagune bihurtzen direla eta, materialak tentsio handiagoa jasan dezake. Bestalde, pitzadurak sortuz gero, partikulek, pitzadurak haztea oztopatu egiten dute, pitzadurek partikulen inguruko tentsio-eremua zeharkatu ezin dutelako. Beraz, partikula batera hurbiltzen ari dela, pitzadurak norabidea aldatu egiten du (8.

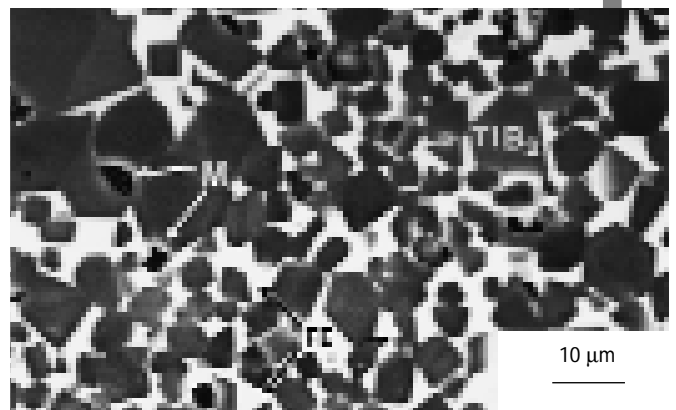


10. irudia. WC-(Co, Fe, Ni) zernet baten mikroegitura tipikoa (Roberto González, CEIT). Zuriz, WC aleak eta beltzez, Co, Fe eta Ni direlakoez osatutako fase estekatzaile (FE) harikorra ikus daitezke.



9. irudia. (goikoa) SiC partikulez sendotutako  $\text{Si}_3\text{N}_4$  konposite baten mikroegituraren xehetasuna (Enkarni Gomez, CEIT) eta (behekoa)  $\text{ZrO}_2$  partikulez sendotutako  $\text{Al}_2\text{O}_3$  konposite bat (Frank Riley, University of Leeds).

11. irudia.  $\text{TiB}_2$ -Fe, Ni motako zernet baten mikroegitura. FE: Fe eta Ni direlakoez osatutako fase estekatzaile harikorra; M: mikrohutsunea



irudia). Horrela, pitzadurek egin behar duten bidea askoz luzeagoa dela eta, materialek energia gehiago xurgatu behar dute; hots, zailtasuna, handiagoa da. Arlo honetan, SiC partikulez sendotutako  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (9. irudia) eta  $\text{TiB}_2$  partikulez sendotutako SiC konpositeak, aipa daitezke.

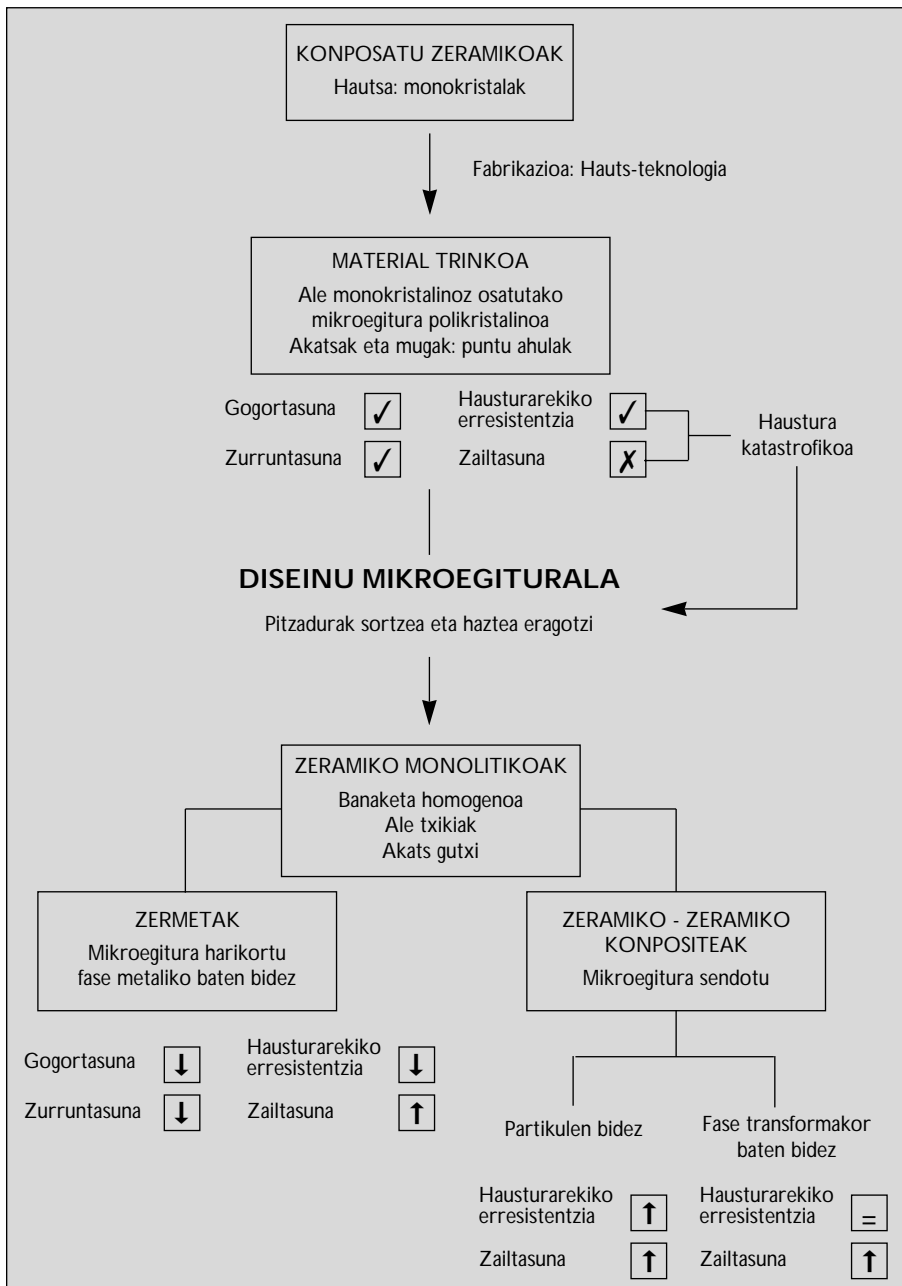
Fase transformakor baten bidez sendotutako konpositeetan, bigarren fase zeramikoak matrizearen aleak inguratzen ditu. Bigarren fase hau, egoera metaegonkorrean dago. Horrela, tentsio kritikoaren menpe dagoenean, fase hau bere egoera egonkorrean transformatzen da. Transformazio honetan energia xurgatu behar dela eta, konpositarean

zailtasuna handiagotu egiten da. Bestalde, zenbait kasutan, transformazioarekin batera, bigarren fasearen bolumena ere handiagotu egiten da. Orduan, fase honek konpresio-indarrak eragiten ditu fase nagusiaren gainean. Beraz, partikulez sendotutako konpositetekin konparatuz, kontrako eragina suertatzen den arren, efektu berbera lortzen da. Horrela, pitzadurek tentsio-eremu hauek zeharkatzeko energia gehiago xurgatu behar dute. Beraz, hau da zailtasuna hobetzeko beste bide bat. Zeramiko-zeramiko konposite hauetan, erresistentzia ez da handiagotzen; pitzadurak matrizeak jasan dezakeen tentsio maximoaren menpe sortzen

baitira. Zeramiko-zeramiko konposite hauetan,  $\text{ZrO}_2$  fase transformakorren bidez sendotutako  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aipa daiteke (9. irudia).

### Zeramiko-metal konpositeak: zernetak

Material hauen diseinuaren oinarria, oso sinplea da, hots, zeramiko-ale deformaezinei tentsioak barreiatzeko ahalmena ematean datza. Horretarako, zernetek, ale gogorren inguruan, fase harikor bat dute, mikroegituraren fase berri horrek tentsioak moldarazi egiten dituelarik. Zer esanik ez, fase harikor hau metalikoa da eta, zernetak, zeramiko-



12. Irudia.  
Laburpen grafikoa.

en eta metalen arteko hibridoak dira. Hau dela eta, zermeten hausturarekiko erresistentzia, gogortasuna eta zurruntasuna zeramikoek baino txikiagoak dira; zailtasuna, ordea, askoz handiagoa (7. irudia).

“Konposatu zeramiko fase hari-korra” bikotea egokia izan dadin, zenbait baldintza bete behar dira. Hots, fase gogorak eta fase

metalikoak, kimikoki bateragarri izan behar dute. Bestalde, materiala trinkotzearen bi faseek bata bestearekiko itsatsi egin behar dute. Baldintza hauek betetzen dituzten bikoteak, trantsiziozko zenbait metalen karburo (WC, TiC, TaC, ...) eta boruro (TiB<sub>2</sub>, ZrB<sub>2</sub>, ...) direlako eta trantsiziozko metalen lehenengo periodoko VIII taldearen Fe, Co eta Ni direlako osatuta daude. Material hibrido hauetan, WC-Co zementaturiko karburoak prezeski aipatu behar dira; lehenengo zermetak izan baitziren

(1929. urtean asmatu ziren). Material hauen sinterizazioan fase metalikoa, likidoa da. Horrela, hozketan ale zeramiko solidoak finkatuta geratzen dira mikroegituran. Fase likidoak zementuak bezala eragiten duela, zernet hauei zementaturikoak deritze. WC-Co bikotean oinarrituta, (WC, TiC, TaC)-(Co, Fe, Ni) familiaren erremintak altzairuaren ebaketa-prozesuetan dira erabilienak, aipatutako WC eta Co osagai nagusiak direlarik (10. irudia).

### Aurrera begira

Zeramikoen arloan emandako bultzaldiaren ondorioz, egungo merkatuan dauden erreminta zeramiko asko, zenbait ebaketa-aplikaziotarako bereziki diseinatzen dira. Zeramiko monolitikoak ia atzean utzita, zeramiko-zeramiko konpositeen diseinu sofisticatuak ikertzen ari dira. Hots, partikulen morfologia, tamaina, orientazioa, banaketa eta bestelako aldagaiak kontrolatuz, bakoitzaren ‘gustuko’ mikroegiturak lor daitezke. Beraz, egungo joera, industri premiek eskatzen dituzten propietate mekanikoen arabeko material zeramikoak diseinatzeari jarraitzea da.

Zermetei dagokionez, TiB<sub>2</sub>-(Fe, Ni) familia berria ikertzen ari da (11. irudia). Zernet hauekin, bai kobaltoa eta bai wolframio karburoa ordezkatu nahi dira. Kobaltoaren produkzioa, oso estatu gutxiren esku dago, elementu estrategikoa delako. Halaber, kobalto-hautsak, minbizia sortarazten duela eta, erabiltzea oso arriskutsua da. Beste aldetik, TiB<sub>2</sub> konposatua WC delakoa baino gogorragoa denez, dagoneko saiaturaren TiB<sub>2</sub>-(Fe, Ni) erremintek, zernet “klasikoek” baino portaera hobea adierazi dute abiadura handiko ebaketa-prozesuetan.



\* CEITeko doktoregaia.