

EBAKETA-ERREMINTARAKO MATERIALEN EBOLUZIOA

J. M. Rodríguez Ibabe
J. J. Urkola Galarza

RIEV. Revista Internacional de los Estudios Vascos.
Año 41. Tomo XXXVIII. N.º 2 (1993), p. 139-160
ISSN 0212-7016
Donostia: Eusko Ikaskuntza

Artikulu honetan zehar gaur egun arte ebaketa-erremintarako erabiltzen diren materialen eboluzioa aztertzen da. Altzairu lasterrei buruz analisi zabal bat egiten da, hasieratik azken teknologia berriak arte (birgaldaketa bidezko finketak, hauts-metalurgia eta berotako trinkotze isostatikoak kontutan hartuz) izan diren aldaketak eta hobekuntzak aipatuz. Bestalde, zernet-en (WC-z, TiB₂-z eta abarrez osatutako partikula zeramikak nahaste metaliko baten bidez sinterizaturik) eta estaldura zeramikoen (altzairuei eta zernet-ei aplikatutako estaldurak prozedura fisikoak ala kimikoak erabiliz) abantailak aipatzen dira. Bukatzeko, material zeramikoen eta supergogorren abantailak eta erabilpenak, ebaketa-eragiketetan aztertzen dira.

En este artículo se resumen los pasos que se han dado en la evolución de los materiales utilizados para herramientas de corte hasta nuestros días. Se hace un análisis exhaustivo de la evolución de los aceros rápidos, desde sus inicios hasta la llegada de las recientes técnicas avanzadas de afino (incluso por electrofusión en vacío) o de la utilización de la metalurgia de polvos, dentro de la que se incluyen las técnicas de compactación isostática en caliente. Se analizan las ventajas de los cermets (partículas cerámicas, WC, TiB₂, sintetizadas con un ligante metálico) y del uso de los recubrimientos cerámicos depositados física y químicamente tanto sobre aceros como cermets. Finalmente se estudia también con detalle el uso de los materiales cerámicos y los materiales superduros en las operaciones de corte.

This paper summarizes the steps in the evolution of different materials used for cutting tools. High speed steels are deeply analysed including the most modern refining techniques (eg. vacuum electro-melting) and the more advanced technologies of powder metallurgy including hot isostatic pressing (HIP). The advantages presented by the cermets (ceramic particles sintered using a metallic binder) are also analysed taking into account the improvement in tool life when a thin ceramic layer is coated using PVD and CVD both to cermets and high speed steels. Finally the use of ceramic and superhard materials as cutting tools is analysed.

1.- Sarrera

Euskal Herriko sare industrialaren tradizio handienetarikoko sektoreen artean makina erremintarena azpimarratu behar da. Ez da hemen aipatuko, baina guztiontzat ezaguna da 70.eko hamarkadan krisi ekonomikoak sektore horretan eduki zuen eragin negatiboa. Joera horri aurre egiteko eta bai barneko bai kanpoko merkatuetan konpetibitatea mantentzeko, azken hogeitau urte hauetan aldakuntza nabarmenak izan dira sektore honetan. Ezagunetarikoen artean zenbakizko kontrola izan da.

Europako Komunitatean sortzen ari diren merkatal aldaketek konpetibitate handiagoa eragin dutela kontutan hartuz, nahi ta ez gure industriak makina erreminten belaunaldi berri bati aurre egin behar dio. Aldakuntza desberdinen artean, gaur egungo makinaren mekanizazio-abiadura handiagotzea aukera bat da. Garapen honi esker, mekanizazio-denborak laburragoak izango dira, era honetaz bukaerako produktu edo piezaren prezioa jaitsiz.

Helburu hori lortzeko ondorengo esparru desberdinetan ikerkuntza garatu behar da:

- zenbakizko kontrolaren tresneri berrien diseinua, mekanizazio-eragiketan kontrola ahal den azkarrena eta zehatzena izateko
- abiadurak handiagoak erabiltzean, makinetan sortuko diren zurruntasunen eta bibrazioen arazoei irtenbidea aurkitzea
- ebaketa-erremintak egiteko lan-baldintza berri horietan erabili beharko diren materialen garapena. Ikusten denez, hau dena oso konplexua da eta sektore desberdinetako espezialisten elkarlana eskatzen du.

Makina erremintaren kontrola eta automatizazioa askotan aipatzen dira, eta behin baino gehiagotan badirudi sektore honen arazo bakarra hori dela. Zenbakizko kontrola erabiltzea urrats garrantzitsua izan zen. Dena den, nahiz eta makinaren eta prozesuaren automatizazioa puntaren puntako helburua izan, ez dugu ahaztu behar azken finean prozesu garrantzitsuena ebaketa dela, eta horretarako material egokiak erabili beharko dira. Material horien propietateak egokiak izan beharko dira ebaketa-abiadura handiko baldintzetan lana egiteko, eta horretarako gogortasuna eta erresistentzia goi-temperaturatan kontutan hartu beharko dira. Aldi berean, zenbat eta zenbat kasutan ebaketa-prozesua ez-jarraia izatean, materialak zailtasun handiko produktua izan beharko du. Hau dena lortzeko era ekonomiko baten bidez material berrien disenua eskatzen du, eta arlo honetan azken urtetan lan asko egiten ari da Euskal Herrian.

Idazlan honetan ebaketa-erremintarako erabil daitezkeen material desberdinak, beraien propietate eta ezaugarriak aurkeztuko ditugu. Nabarian geldituko denez, azpisektore honetan ere aspalditik aldaketak handiak izan dira. Gaur egun, bai materialen konposizio kimikoetan, baita ondorengo tratamenduetan ere aldakuntzak garrantzitsuak suertatzen ari dira.

2.- Ebaketa-erremintaren eboluzioa

Ebaketa-erremintaren eboluzioa ebaketa-abiadurarekin erlazionatuta dago. Material-talde honen barnean lehenbiziko aldaketa garrantzitsua duela mende bat izan zen. Ordurarte erabiltzen ziren materialak karbono-altzairuzko motakoak ziren. Erreminta horiekin kobrea eta antzeko materialak mekanizatzeke ebaketa-abiadura 100 m/min-raino irits zitekeen. Aldiz, metal gogorragoekin, burdinurtua adibidez, erabil zitekeen abiadura ez zen 10 m/min baliotik igotzen.

Abiadura-muga horiek ulertzeko, hausten edo baliorik gabe gelditzen deneko erreminta bat kontutan hartu behar da. Bai higaduraz, baita deformazioz ala hausturaz ere erreminta batek ertzaren geometria galtzen duenean bere funtzionamendu-bizitza amaitzen da. Ebaketa-prozesu batean, erremintan diharduten tentsio-balio handienak ertzean aurkitzen dira. Karbono-altzairu baten mekanizazioan adibidez, tentsio-balioak 1100-1500 MPa-eraino (1) irits daitezke.

Ebaketa-abiadura handitzen den heinean, ertzean diharduten tentsioak poliki-poliki handiagotuz doaz. Abiadurarekin batera, erreminta nabarmenki berotzen da (1. irudia). Beraz, erremintaren arazoa tentsio eta temperaturarekin batera erlazionatuta dago. Temperatura igotzean altzairuek erresistentzia galtzen dute. Ondorioz, temperatura altuta, hau da, ebaketa-abiadura handia den kasutan, lehen aipatutako tentsioak jasateko material egokienak lortzea helburu nagusia da.

Piezak gero eta gehiago metalikoak izatean, produkzio-mailan mekanizazio-prozesua garrantzi handia hartuz joan zen. Egoera horretan, karbono-altzairuarekin lor zitezkeen abiadurak apalegiak ziren eta arazo honi erantzuna emateko asmoz, altzairu lasterrak garatu ziren. 2. irudian gogortasunaren aldaketa temperaturaren funtzioan erakusten da. Karbono-altzairuaren kasuan, temperatura igotzen den heinean gogortasuna apalduz doa, eta ondorioz, baita ere bere higadurarekiko ahalmena. Aldiz, altzairu lasterraren kasuan, temperatura-tarte handi batean gogortasunak duen balioa oso ona da, eta gainera, arrazoi gero aipatuko da, temperatura-tarte baten barnean materiala berotzean gogortasuna handitu egiten da.

Altzairu lasterrak wolframio-edukin handiko (%18-tik %25-eraino) aleazioak dira, kromoa (%4) eta banadioa (%1-etik %5-eraino) ere konposizio kimikoan agertuz. Batzutan kobaltoa ere erabiltzen da. Lehenbiziko altzairu lasterra mende honen hasieran garatu zen (T1 izenekoa, bere konposizio kimikoa %18 W/%4 Cr/%1 V izanik) eta geroztik altzairu hauek mekanizazio-prozesuetan garrantzi handia eduki dute.

Altzairu lastarren artean mota-desberdinak daude eta kasu batzutan wolframioa osorik ala partzialki molibdenoz ordezkatzeko da. Bigarren Mundu-Gerran wolframioa lortzeko arazoak zituztelako, iparramerikarrak hasi ziren molibdenoa erabiltzen. Aldaketa hori egiteko, Mo eta W taula periodikoaren talde berberan aurkitzen direla kontutan hartu behar da, eta ondorioz, bere propietateak nahikoa antzekoak dira. Bestalde, molibdenoaren pisu atomikoa wolframioarenarekin konparatuz erdia denez, altzairuetan wolframioa osorik ala partzialki ordezkatzeko Mo-kopuru erdia bakarrik jartzen da.

Ebaketarekiko portaera ahal den egokiena izateko, altzairu hauek termikoki tratatzen dira. Hasieran 1200.^oC-tik gora berotzean W, Mo eta V aleazio-elementuak eta karbonoa matrizean disolbatzen dira. Tenplaketa- eta iraketa-tratamendu egokiak aplikatu ondoren, (W₂Mo)₆C, W₂C, Mo₂C, V₄C₃ eta beste karburo bereziak sortzen dira. Prezipitatuaren artean bi familia desberdinak daude. Lehenbiziko taldekoei primario deritze eta berauen tamaina handia baldin bada (ikus 3. irudia) altzairua hauskorra izango da; aldiz, prezipitatuak txikiak baldin badira (4. irudia) zailtasunarekiko materialak edukiko duen portaera ona izango da. Bigarren familia oso prezipitatu xeheaz osatuta dago (partikula hauek analizatzeko transmisiozko mi-

kroskopia elektronikoa erabili behar da) eta altzairuari gogortasun handia ematen diote, erremintaren erabilpen-temperatura 600.°C-raino iritsi arte. Temperatura hori gainditzeko baldin bada, prezipitatuak elkartzen eta hazten dira, altzairua gogortasuna galduz eta ondorioz bere ezaugarriak. Hau dela eta, ebaketa-prozesuan zehar erremintak hartzen duen temperatura lehen aipatutako balioa baino txikiagoa denean, altzairu lasterren erabilpena egokia da. Baldintza hori betetzeko altzairu batekin erabil daitezkeen ebaketa-abiadurak ez du 40m/min baliotik pasa behar.

Lehen aipatutako abiaduren balioak gainditzeko, altzairu lasterren gainazala titanio nitruroak, titanio karburoak eta aluminak erabiliz estaltzen dira. Estaldura horren bitartez erremintaren higadurarekiko erresistentzia goi-temperaturatan igo egiten da, ebaketa-abiadura 50 m/min balioraino iristea posible izanik. Estaldura-prozedurari buruz 5. atalean adierazpen batzuk eman go dira.

Bukatzeo, ebaketa-abiadura handiagoak erabiltzeko, altzairuen orde best materialak kontutan hartu behar dira. Hauen artean zernet-ak eta material zeramikoak aurkitzen dira. 5. irudian ebaketa-erremintarako erabiltzen diren material desberdinen propietateak bildu dira. Irudi horretan materialaren gogortasuna versus zailtasuna adierazten da. Produktua gero eta gogorragoa izatean bere portaera higadurarekiko are eta hobeagoa da. Tamalez, gogortasuna igotzean zailtasuna gero eta apalagoa da. Bi aldagai hauek batera kontutan hartuz, material bakoitzak dituen aplikagarritasunak defini daitezke. Hurrengo ataletan ebaketa-erremintak garatzeko erabiltzen diren materialak aztertuko dira, altzairu lasterrak bereziki kontutan hartuz.

3.- Altzairu lasterrak

3.1.- Galdaketa

Gainontzeko altzairuekin gertatzen den bezala, altzairu lasterren lorpena ondorengo urrats desberdinez osatuta dago: galdaketa, isurketa, berotako konformaketa eta tratamendu termikoak. Atal honetan urrats hauen ezaugarriak laburki adieraziko dira.

Galdaketa arkuzko labe elektrikoaren ala indukzio-labearen bitartez egiten da normalean. Bi prozedura hauetan labea %65 ÷ 75eraino txatarraz betetzen da, gainontzeko guztia aleazio-elementuak izanik. Elementu hauek W, Cr, V eta Mo izaten dira batez ere eta ferroaleazio bezala aurkitzen dira. Urtze-temperatura ahal den altuena erabiltzen da (1625.°C). Dena den, isurketa-unean likidoaren temperatura baxuagoa izatea komenigarria da, era honetaz eutektikoaren sorrerako joera txikiagotzen bait da. Eutektikoak oso karbuero heterogenoz osatutako produktuak dira (ikus 3. irudia) eta altzairuentzat, propietate mekanikoen ikuspuntutik, kaltegarriak dira.

Konposizio kimikoa egokitu ondoren, altzairua lingotontzi batean isurtzen da. Solidotze-prozesuan sortzen diren egiturek garrantzi handia edukiko dute altzairuaren propietate mekanikoetan. Puntu honetan, segregazioak eta eutektikoaren bidez sortutako karbuero-taldeak kontutan hartu behar diren arazo handienak dira.

Lingotearen homogenotasun handiagoa eta mikroegitura xeheagoa lortzeko, ondorengo prozedurak erabiltzen dira: lingotontzietan dardarak aplikatzea, ontzien geometria kontrolatzea, inokulanteak erabiltzea eta abar. Industria-mailan prozedura ezagunena lingotontziaren geometria eta tamaina kontrolatzea da.

Nahiz eta lingotearen tamaina egokiena izan, altzairuaren karbuero-banaketan agertzen den heterogenotasuna zuzendu behar da. Heterogenotasun hau, lehen adierazi den bezala, lingo-

tearen tamaina handiagotzen eta solidotze-abiadura txikiagotzen den heinean handiagotuz doa. Heterogenotasun horiek txikiagotzeko altzairuari berotako konformaketa aplikatzea prozedura egokiena da. Berotako konformaketan altzairua % 97raino deforma daiteke. Normalean forjaketa erabiltzen da, berotako ijezketa sekzio urriko altzairuentzat utziz.

Nahiz eta berotako konformaketa aplikatu, galdaketa konbentzionaletan sortzen den mikroegiturazko heterogenotasuna nabarmena da. Altzairu lasterrak oso hauskorak direnez, heterogenotasun horretan sortu diren karburo handien bidez mikropitzadurak nuklea daitezke. Era berean, altzairuan dauden inklusioak, hau da ezpurutasunak, zailtasunaren ikuspuntutik ere oso kaltegarriak izaten dira. Mikroegiturazko bi arazo hauek gainditzeko prozedura desberdinak garatu dira, ezagunenak honako bi hauek izanik: birgaldaketa bidezko prozedurak eta bapateko hozte-prozedurak.

3.2.- Birgaldaketa bidezko prozedurak

Elektrodo kontsumigarridun birgaldaketen prozeduretan metal urtuaren finketa handiagoa lortu ondoren (gasak eta inklusio ez-metalikoak ezabatuz) solidotze-prozesuaren kontrol handiagoa izaten da eta ondorioz, totxoan eta piezen egiturak homogenoagoak eta akats metalurgikorik gabekoak dira.

Birgaldaketa bidezko prozeduren artean ezagunenak VAR ("Vacuum Arc Remelting") birgaldaketa huts-arkuaren bidez eta ESR ("ElectroSlag Refining") elektrozepa bidezko birgaldaketa dira (6. irudia).

Huts-arkuaren bidezko birgaldaketa lehen garatutako prozedura izan zen. Kasu honetan, labe elektrikoaren bidez lortutako totxoa geldiro urtzen da eta gero, berriz urez hotzetako kobrezko molde batean solidotzen da. Galdaketa, elektrodoaren (totxoa) eta metal likidoaren artean sortutako arku elektrikoaren bidez izaten da. Prozesua hutsean egiten da eta lortzen den temperatura 2000.°C-koa izaten da. Egoera horretan, gasezko ezpurutasunen kontzentrazioa txikiagotu egiten da.

ESR prozeduran elektrodoa (totxo bera) urtzen da Joule efektuaren bidez. Efektu hori korronte handi bat aplikatuz eta zepa eroale berezi bat erabiliz lortzen da. Zeparen urtze-temperatura metalarena baino baxuagoa izaten da eta bere konposizio kimikoa oxidoak eta sufrea zepa bertan geldiarazteko egokituta dago. Altzairu likidozko tantak elektrodetik erortzean zepan zehar pasatzen dira urez hoztutako moldera iritsiz. Zepa zeharkatzean, inklusioak eta beste ezpurutasunak dituzten tantak zepan bertan gelditzen dira, zepak iragazkiaren lana eginez. Horrela totxo berria garbiagoa da eta anisotropi maila askoz txikiagoa.

3.3.- Bapateko hozte-prozedurak

Altzairu lasterrek dituzten ezaugarriak lortzeko alezio-elementuen kopurua handia izaten da. Solidotze normal batean elementu horiek lingotean oso prezipitatu larriak sortzen dituzte. Mikroegiturazko heterogenotasun horiek gainditzeko asmoz, hozte-abiaduraren balioak galdaketa normal bati dagozkionak baino askoz handiagoak erabili behar dira. Hoztea oso azkarra edo bapatekoa baldin bada, mikroegitura berehalaxe "gelatuta" gelditzen da, partikula larrien prezipitazioa galeraziz. Abantaila hau kontutan hartuz, hozte azkarrean oinarritutako prozedura batzuk garatu dira. Hauen artean praktikara eramateko posibilitate gehiago dituztenak hauts-metalurgia eta sprayzko deposizioa dira. Ondoren, bi sistema hauen oinarriak adieraziko dira.

3.3.1.- Hauts-metalurgia

Hauts-metalurgian, hauts metalikoak prentsatzuz eta sinterizatuz pieza trinkoak egiten dira. Hautsak nahastu ondoren prentsa hidrauliko edo mekanikoaren bidez trinkotu egiten dira, pieza lortu arte. Pieza hauen dentsitatea 6 eta 7 g/cm³ bitartekoa izaten da. Dentsitate hori oraindik teorikoa baino txikiagoa denez, piezaren prozesua osatu gabe dago. Fase honetako produktuari “berde” deritzen.

Dentsitate hobea lortzeko produktu “berdea” sinterizatu egin behar da. Horretarako pieza labera sartzen da eta tenperatura altuak erabiliz, hautsak elkartu egiten dira hutsune-kopurua murriztuz, eta beraz, dentsitatea handiagotuz. Lortutako produktuaren propietateak dentsitatearen balioarekin erlazionaturik daude. Piezak zenbat eta hutsune gutxiago eduki, ezaugarri mekanikoak hainbat eta hobekak izango dira (7. irudia).

Prozedura honetan hautsen garrantzia handia da eta lortutako piezen propietateak neurri handian hautsen kalitatearekin erlazionaturik daude. Hautsak lortzeko prozedura desberdinak garatu dira eta berauen artean hemen garrantzitsuenak kontutan hartuko dira, hau da, urezko hausketeta eta gasezko hausketeta.

Urezko hausketan prozedura konbentzional baten bitartez lortutako altzairu lasterrezko lingotea urtu egiten da. Aleazioa zaliaren hondotik isurtzen denean, berehalaxe presio handiko ur-zorrotadak erabiliz likidoa tantatan deskonposatu egiten da. Hauts bakoitza mikrolingote bat bezala kontsidera daiteke, bere mikroegiturazko homogenotasuna oso handia izanik (8. irudia). Ondoren hautsak jasotzen dira, lehorketa-prozesu bat jasaten dute eta tratamendu termiko bat (suberaketa bat hutsean ala atmosfera erreduzitzailera erabiliz) aplikatu ondoren, prest daude erabiltzeko. Hautsen geometria oso irregularra izaten da (ikus 9. irudia) eta berauen gainazala oxidoz osatuta dago. Azken ezaugarri honek urezko hausketaren prozedura noiz aplika daitekeen definitzen du, oxido horiek gero trinkotze-prozesuan hautsen artean burutu behar duten elkartzeko-prozesuak galarazten bait dituzte.

Gasezko hausketan, uraren ordez gasa erabiltzen da likidoa hauts bihurtzen. Horrela sortutako hautsak esferikoak dira eta gainazalaren itxura oso leuna izaten da (10. irudia). Gasa normalean geldoa denez, argona edo nitrogenoa adibidez, oxidazio-prozesurik ez da azaltzen eta kalitate handiko hautsak lor daitezke.

Lortutako produktuaren propietateak egokienak izateko bere dentsitateak ia % 100ekoa izan behar du eta helburu hori lortzeko prozedura industrial berriak garatu dira. Prozedura normal batean, difusioaren bidez materialean dauden hutsuneak kanporatzen dira eta horretarako oso denbora luzea beharrezkoa da. Denbora murrizteko posibilitate desberdinak erabili daitezke. Sinterizazio-prozesua guztiz solidoa izan ordez, materialean fase likido bat baldin bada, difusioaren eragina askoz handiagoa da. Fenomeno honetan oinarrituta sinterizazio likidoa garatu da. Bestalde, materialean dauden hutsuneak askoz azkarrago ezabatzen dira tenperaturarekin batera presioa ere erabiltzen baldin bada. Hori kontutan hartuz, hautsen berotako forjaketa, estrusioa eta berotako trinkotze isostatikoa (HIP, Hot Isostatic Pressing) praktikara eraman dira. Ondorengo lerroetan sinterizazio likidoa, berotako forjaketa eta berotako trinkotze isostatikoa aztertuko ditugu.

Sinterizazio likidoan, “berdea” berotu egiten da metalean fase likido bat lortu arte. Fase likidoaren kantitateak nahikoa izan behar du materialaren jariakortasun minimo bat lortzeko. Era horretaz, alde batetik materiala egokierazten da, eta bestetik difusioa likidoaren bitartez askoz azkarragoa da. Dena den, fase likidoa iragankorra izatea komenigarria da; hau da, dentsitatea hobekotuz doan heinean gero eta likido gutxiago izan behar du materialean. Hau horrela ez baldin bada betetzen, solidotzean oso heterogenoak diren fase eutektikoak sor daitezke.

Orain arte esan duguna tenperatura altuez baliatuz lortu da beti. Erraz uler daiteke tenperatura altuetan dagoen produktuari presio handia aplikatzen baldin bazaio lortutako emaitzak hobeak izango direla. Presioa erabiltzean altzairuaren dentsifikazio osoa lor daiteke hain tenperatura altuetaraino iritsi gabe, eta horren ondorioz, materialean sortzen den mikroegitura xeheagoa da. Abantaila hauen aldamenear, presioa eta tenperatura batera erabiltzean zuzenezuzenean piezak bukaturik lortzea zailagoa dela kontsideratu behar da.

Hautsen forjaketaren eta trinkotze isostatikoaren prozedurak teknologia horretan oinarritzen dira. Lehenbiziko kasuan, hautsak trinkotu eta sinterizatu egiten dira. Ondoren, oraindik hutsune-kopurua handia denez (% 10-% 30), produktuari berotako forjaketa aplikatzen zaio, horrela hutsuneak itxiz eta dentsitatearen balio teorikora hurbilduz. Berotako trinkotze isostatikoan, pieza berotu egiten da eta aldi berean gas baten bidez presio handia aplikatzen zaio. Tenperaturaren eta presioaren konbinazioaz, hutsuneak ixtea lortzen da.

3.3.2.- Sprayzko deposizioa (Osprey)

Metal likidoaren hausketa egin ondoren, sortutako tantak guztiz solidotu baino lehen, sustrato batean biltzen baldin badira, oso mikroegitura xeheak dituzten produktu desberdinak lor daitezke. 11. irudian Osprey izeneko sprayzko deposizioaren prozedura erakusten da. Metalzko tantak lortzeko gazezko hausketa erabiltzen da eta ondoren, mandril baten kontra jotzean solidotzen dira. Era honetaz oso dentsitate handia (% 97 baino handiagoa) dituzten totxoak (150 Kg-ko totxoak prestatzen dira halako prozedura erabiliz) lor daitezke. Sustratoaren abiadura eta tenperatura kontrolatuz altzairuaren egitura alda daiteke, prozedura konbentzionalan agertzen diren heterogenotasunen arazoak gaituz.

3.4.- Prozedura desberdinen arteko konparaketa

Ohizko galdaketan azaltzen diren arazoak gaitzeko asmoz, bereziki materialen heterogenotasuna, garatu dira lehen aipatutako prozedurak. Hauts-metalurgiari esker, adibidez, altzairu lasterrak aurkezten duen mikroegitura askoz xeheagoa da. Horren ondorioz, puntan zehar erremintaren higadura berdintsuagoa izaten da eta zailtasunarekiko duen portaera ere askoz hobeagoa da. Ohizko galdaketarekin konparatuz, bukaerako berotako konformaketak aplikatzea ez da beharrezkoa. Bestalde, hauts-metalurgiari esker, zuzen-zuzenean piezak ia bere bukaerako geometria edukitzen du, ondorengo mekanizazio edo konformaketaren beharrrak txikiagotuz.

Altzairu lasterrekin hutsezko sinterizazioa izan da prozedurarik erabiliena. Sistema honekin ez da produktibitate handirik lortzen, eta gainera, labe garestien erabilpena beharrezkoa da. Euskal Herrian duela urte gutxi beste sistema berri bat garatu zen (9, 10). Sinterizazio-prozesuan nitrogenoz, hidrogenoz eta metanoz osatutako atmosfera bat erabiltzean tenperaturen hain balio handiak ez dira beharrezkoak izaten, eta ondorioz, lantegietan dauden labe konbentzionalak erabil daitezke. Gainera, sistema honen bitartez altzairuaren mikroegitura xehea denez, oso propietate mekaniko onak dituzten materialak lortzen dira. Ikerkuntz proiektu hau Gipuzkoako Foru Aldundiak emandako diru laguntzari esker CEIT-en garatu da.

Sprayzko deposizioa erabiltzen denean, lortutako mikroegitura oso xehea denez, mikroegitura egokitzeko prozedura normalean aplikatzen diren konformaketak ez dira beharrezkoak izaten.

4.- Zernetak

Material hauen mikroegitura kobalto-geruzaz inguraturiko oso xeheak diren karbuero metalikoz (W, Ti eta Ta metalak normalean) osatuta dago. Karbuero edo material zeramiko hauen

atomoen arteko lotura indartsua denez, oso produktu gogorak eta higadurerekiko erresistentzia handikoak dira. Aldiz, ia zeramika guztiekin gertatzen den bezala, berauen zailtasun-maila apala da. Arazo hau gainditzeko ale-txikiko karburoak metal batekin konbinatu egiten dira. Kasu gehienetan gehitzen den metala kobaltoa da eta bere kopurua % 10 ÷ 15en artean aurkitzen da. Era honetaz karburo-aleak harikorra den metal batez inguraturik izatean, materialen zailtasuna handitu egiten da. Sistema honen bidez lortzen den produktua material zeramikoz (karburoak) eta metalikoz (kobaltoa) osatuta dago etazemet deritzo. Laburbilduz, zemet-en matrizea harikorra izatean, materialean sortzen diren pitzaduren hazkundea matrize horrek oztopatuta izaten da. 12. irudian mekanismo horren eskema bat adierazten da

Ebaketa-erremintaren arloan lehen erabilitako zemet-a wolframio-karburo (produktu gogorra eta hauskorra) eta kobaltoz (matrize harikorra) osatutako aleazioa izan zen. Material honen urte-temperatura oso altua denez, hauts-metalurgiaren bidez lortu behar da. WC-zko ale txikiak erabiliz (0,4 eta 7 μ m-ren inguru) eta kobaltoa gehituz, produktua trinkotu ondoren 1500.^oC-tan sinterizatzen da. Sinterizazio-prozesuan likido-fase bat sortzen da (Co-a urtu egiten da) eta honi esker bukaerako materialaren dentsitatea oso ona izaten da (hutsune-kopurua ez da % 0,01-era iristen). Horrela garatutako materialekin altzairu lasterrekin baino ebaketa-abiadurak handiagoak erabil daitezke. Pieza sinterizatu hauek plakaxo-forma daukate eta eraikuntza-altzairuzko girtenetan lotura mekaniko baten bidez ipintzen dira. Plakaxoak hiru ala lau ertz edukitzen ditu eta bat baliorik gabe gelditzen denean, plakaxoa askatzen da eta, giratu ondoren, beste ertz lanean jartzen da.

Kobaltoa material estrategiko bezala kontsideratuta dago eta une honetan bere produkzioa estatu gutxien eskutan dago. Horrez gain, badirudi kobalto-hautsak minbizia sortzen duela. Bi ikuspuntu hauek kontutan hartuz, zenbait laborategitan Co-zko matrizea ordezkatzeko beste produktuak ikertzen ari dira. Hauen artean, gaur egun burdinan eta nikellean oinarritutako aleazioak alternatiba egokienetarikoa bezala kontsideratzen ari dira. Gainera, kasu honetan Fe/Ni aleazioak zemet-ari zailtasunarekiko oso portaera ona ematen dio.

Dena den, abiaduraren balioa handia denean, 130 m/min inguru, erremintan sortzen den temperatura oso handia izan daiteke, 1100.^oC-koa alegia, eta orduan W karburoak disolbatzen dira burdinarekin ukipenean aurkitzen direnean.

Arazo hau zuzentzeko, W karburoekin batera, beste karburo-motak erabiltzen dira, egokienak titanio eta tantalo karburoak izanik. Goi-temperaturatan karburo hauek ez dira hain erraz disolbatzen. Sistema honen bitartez erremintaren temperatura 1100-1200.^oC-raino irits daiteke eta maila honi dagokion abiadura 250 mlmin-koa izaten da. Dena den, nahiz eta karburo-mota desberdinak erabili, erremintaren bizitza mugatzen duen aldagaia produktu hauen disoluzioa da.

Bestalde, zemet-ari gogortasun handiagoa emateko eta modu horretaz ebaketa-abiaduraren muga igotzeko, materialean dagoen Co-a murriztu egiten da. Kasu batzutan, kobaltoaren kopurua ez da % 5era ere iristen. Konposizio kimikoaren aldaketa honek sinterizazio-prozesua zailarazten du eta dentsifikazio osoa lortzea ez da posible izaten. Dentsitatearen balio egoki batera iristeko, berotako trinkotze isostatikora jo behar da.

Higadura-prozesuan sortzen den karburoen disoluzioa zemet-mota hauen arazo handiena da eta horregatik beste bi prozedura garatu dira. Lehenbizikoan, W karburoen ordeztu, Ti karburoak eta nitruroak erabiltzen dira, metala nikellean eta kobaltoan oinarritutako aleazio bat izanik. Material hauek altzairuen bukaerako-eragiketak egiteko egokiak dira, baina edozein mekanikazio-motatarako ez dute balio zailtasun eskasa dutelako. Une honetan beste osagai berriak ikertzen ari dira. Hauen artean TiB₂ produktuan oinarritutakoak aipatu behar dira. Material berri hauek Euskal Herrian ere ikertzen ari dira Europako Elkarteak babesturiko Brite proiektuaren barnean (11)

Bigarren prozeduran, W karburoan oinarritutako erreminta bat higadurarekiko erresistentzia handiko produktu baten bidez estaltzen da. Sistema honen garrantzia ikusita, estaldura-prozedurak ondorengo atalean kontsideratuko dira.

5.- Estaldura zeramikoak

Materialaren ebaketa parte hartzen duen zatia erremintaren gainazala dela kontutan hartu behar da. Hori horrela denez, gainazalaren gogortasuna handia baldin bada eta kimikoki material egonkorra baldin bada, erremintaren ebakidurarekiko portaera askoz hobeagoa izango da. Abantail hauek ikusita, bai zernet-ei bai altzairu lasterrei estaldura zeramikoak aplikatzen zaizkie. Material zeramikoan artean, Ti karburoak (TiC), Ti nitruoak (TiN), alumina (Al₂O₃) eta silizio nitruoak (Si₃N₄) estaldura lortzeko produktu komertzialenetarikoak dira.

Altzairuzko ala zernet-eko erreminta bati zeramikazko estaldura bat aplikatzeko prozedura industrial desberdinak daude. Bai material batekin baita bestearekin ere, erreminta txar bat hobeagotzea estaldura baten bidez pentsaezina da; hau da, estaldura-teknologiak oinarritzko materiala kalitatezkoa izatea eskatzen du.

Une honetan, industri mailan sistema desberdinen artean erabilienak CVD eta PVD dira. CVD (Chemical Vapor Deposition) prozeduran oso xehea, mikra gutxiko lodierakoa, Ti karburoz, Ti nitruoz ala alumina osatutako geruza bat lortzen da lurrin baten deposizio kimikoaren bitartez (13. irudia). Pieza 800.°C-tik gora berotu ondoren, prozesuan sortutako gasek materialaren gainazalarekin erreakzionatzen dute estaldura bat osatuz. PVD (Physical Vapor Deposition) prozeduran lurrinaren kondentsaziozko estaldura lortzen da sistema fisiko baten bidez. Kasu honetan erreminta ez da 500.°C-tik gora berotzen.

Estaldurari esker ebaketa-erremintaren abiadura handiagoa izan daiteke. Zernet-en kasuan, estaldura erabiliz gero, ebaketa-abiadura 400 m/min-raino igotzea posible da. Dena den, estalitako zernet-ekin ere muga bat badago. Abiadura igotzean erremintaren temperatura ere igo egiten da eta balio batera iritsi ondoren, materialean dagoen Co-a biguntzen hasten da, erremintaren deformazio plastikoa gertatuz, eta ondorioz, bere lan-bizitza amaituz.

6.- Zeramikak

Zeramiken propietate batzuk oso interesgarriak dira material hauek ebaketa-erremintaren arloan kontutan harturik izateko. Zeramikek goi-tenperaturatan gogortasuna mantendu egiten dute eta oso kasu gutxitan altzairuekin erreakzio kimikoak sortzen dira. Beraz, ebaketa-abiadura oso altua denean (hau da, erremintaren temperatura altuegia denean beste material-motentzako) ala higadurak sorturiko partikulen disoluzioa gertatzen denean, zeramikak produktu egokienak bezala agertzen zaizkigu. Dena den, zeramikek ere ondoko bi muga nagusi daukate: zailtasun-eza eta talka termikoarekiko erresistentzia txikia. Bi faktore hauek kontutan hartu behar dira zeramikak ebaketa-erremintak izateko, eta horren ondorioz, produktu hauen erabilpena ebaketa-abiadura handiko kasuetarako mugatuta dago. Bestalde, zailtasuna apala denez, mekanizazio-prozesuan agertzen diren bibrazioak txikiagotu egin behar dira eta horretarako zurruntasun handiko makinak beharrezkoak dira. Beraz, erreminta hauek egokiak dira ebaketa-jarraiaren kasuetarako.

Erremintaren arloan erabilitako lehenbiziko zeramika alumina izan da. Hauts txikiak hotzetako trinkotzea jasan ondoren sinterizatzen dira. Horrela garatutako erremintak talka termikoarekiko duen portaera oso apala da. Titanio karburoak aluminari gehituz produktuaren portaera hobeagotzen da, baina zorritzarrez konposizio kimiko berri hau goi-tenperaturatan presioaren bidez trinkotu behar da, eta ondorioz, erremintaren prezioa igo egiten da.

Zailtasunaren ikuspuntutik, aluminazko zeramikari zirkonia (zirkonio oxidoa) gehitzen baldin bazaio materialaren portaera askoz hobea da. Tentsiopean aurkitzen direnean zirkonia-partikulek transformazio bat jasaten dute, eta horren ondorioz, berauen bolumena handiagotzen da. Bolumen-aldaketa honek materialean aurkitzen ziren mikropitzadurak itxi egiten ditu. Mekanisko hau ez dago aluminazko zeramikentzat mugatuta; beste konposizio kimikoekin ere erabiltzen da.

Badago beste zeramikazko erreminta-familia silizio nitruoan (Si_3N_4) oinarriturik dagoena. Material honen espantsio-koefiziente termikoa oso baxua denez, talka termikoa oso ondo jasaten du. Aldiz, silizio nitruoaren sinterizazioa zaila da. Material hau lortzeko, gainontzeko zeramikekin gertatzen den bezala, hautsetik hasten da eta sinterizazio-prozesu baten bidez ia dentsitate teorikoa duen pieza lortu behar da. Sinterizazio-prozesua errazteko, silizio- eta nitrogeno-atomoak aluminioz eta oxigenoz ordezkatzeko baldin badira, zeramika berri batzuk sortzen dira, sialon-ak deitutakoak, berauen sinterizatzeko ahalmena handiagoa izanik. Beste hauts zeramikoak gehitu ondoren, itria adibidez, sinterizazio-prozesuan fase likido bat agertzen da, eta modu honetaz, pieza trinko bat lortzea errazagoa izaten da. 14. eta 15. irudietan transmisiozko mikroskopio elektronikoan lortutako bi zeramiken argazkiak erakusten dira.

Hainbeste elementu sartu gabe, dentsitate teorikoa lortzeko zeramikei berotako trinkotze isostatikoa (HIP) aplikatu behar zaie. HIP prozedura erabiltzen denean, materiala lata edo ontzi batean sartu behar da. Metalen kasuan, lata metalikoa da, baina zeramikekin metalikozko ontziak ezin dira erabili eta hain tenperatura handiak jasateko beirazko ontzietara jo behar da. CEIT-en gai hau ikertu da (Gipuzkoako Foru Aldundiak eta Eusko Jaurlaritzak emandako dirulaguntzari esker) eta beirazko ontziak lortzeko prozedura berri bat patentatu da (15).

Hau dena kontutan hartuz, silizio nitruoan oinarritutako zeramikak egokiak dira burdinruak mekanizatzeko ebaketa-abiadura handia denean.

7.- Material supergogorrak

Ebaketa-erremintarako gaur egun erabiltzen diren material-mota desberdinen artean, gogorrenak atal honetan kontutan hartuko dira.

Idazlan honetan zehar ikusi denez, higadurarekiko portaera ahal den hoberena izateko, materialak oso gogorra izan behar du. Ildo honetatik jarraituz, material gogorrena diamantea da, eta beraz, baita ere egokiena higadura-arazoak gainditzeko. Praktikan ez da diamante naturala erabiltzen, baizik eta diamante polikristalino edo sintetiko bat, bere zailtasuna naturalarena baino handiagoa izanik. Dena den, material hau oso garestia da eta goi-tenperaturatan burdin eta nikel aleazioak mekanizatzeko ezin da erabili, bi produktu-mota hauekin bere egitura (materiala bisolbatzen da) aldatzen duelako. Une honetan diamantearen aplikazio handiena aluminio eta silizioan oinarritutako aleazioen mekanizazioa da.

Nahiz eta diamantea bezain gogorra ez izan, boro nitruo kubikoa ere beste material supergogorra da. Sinterizazio-prozesua diamantearenaren antzekoa da eta berez, oso produktu garestia. Diamantearekin konparatuz, ez du hain erraz erreakzionatzen burdin aleazioekin, baina $1000\text{ }^\circ\text{C}$ -tik gora lana egitean, oxidatu eta bigundu egiten da. Beraz, ez da material egokia ebaketa-abiadura handikorako, baina zenbait mekanizazio-prozesu zailetarako produktu egokia da.

8.- Ondorioak

Artikulu honetan zehar erakutsi denez, gaur egun mekanizazio-erremintarako erabiltzen diren materialen artean aukera handia dago. Aukera hauen barnean, material batzuen lorpena

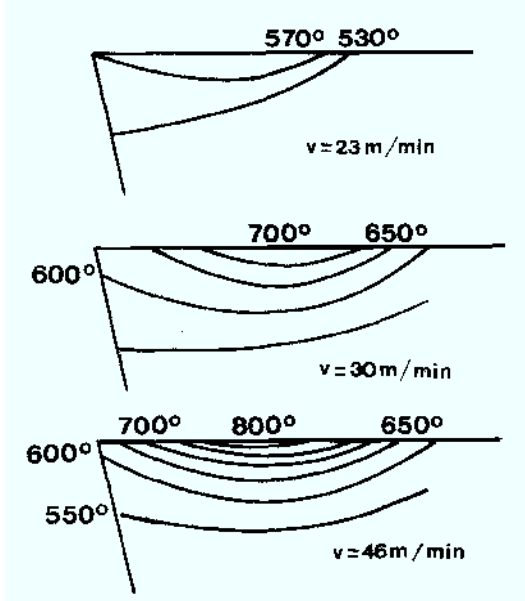
konbentzionala da, baina beste kasutan oso produktu konplexuak lantzen ari dira, berauen lorpena puntako teknologiaren bitartez izanik. Bai kasu batean, baita bestean ere gogortasunaren eta zailtasunaren balio egokiak aukeratu behar dira aplikazio zehatz bakoitzerako, konbentzionala hartuz propietate bat hobea izateko besteak beste apaltzen dela.

Azken urteotan erreminta zeramikak eta batez ere estaldura zeramikoak garrantzi handia hartzen ari dira. Honi buruz, Euskal Herriko zenbat zentrotan material eta teknologia berri hauek ikertzen eta garatzen ari dira.

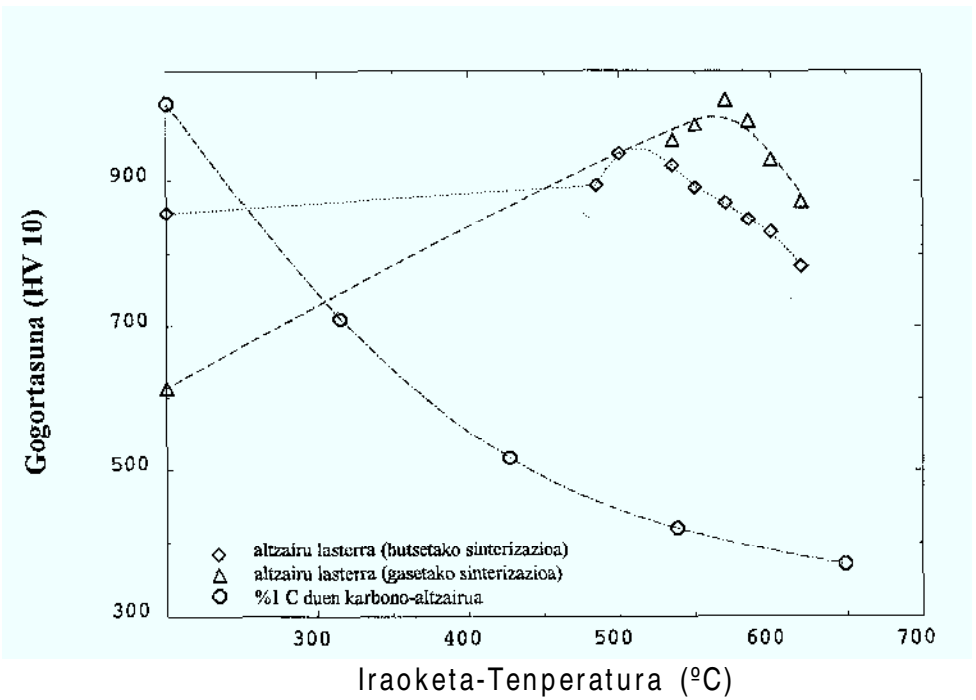
9.- Bibliografia

1. Trent, E.M., Proc. of the Centenary Conference, University of Sheffield, U.K., 1984.
2. Urrutibeaskoa, I., Doktorego-tesia, Donostiako Goi-Mailako Injineru-Eskola, 1992
3. Urrutibeaskoa, I., Palma, R., Martinez, V. eta Urkola, J.J., Powder Metallurgy, 33, 1990, 305-312.
4. Aronsson, B., Specialty Steels and Hard Metals, Pergamon Press, 1983, 163-171.
5. Rodriguez Ibabe, J.M., Hausturaren Mekanika, Elhuyar-Elkar, 1990, 188.
6. Martinez, V., Doktorego-tesia, Donostiako Goi-Mailako Injineru-Eskola, 1990.
7. Palma, R., Doktorego-Tesia, Donostiako Goi-Mailako Injineru-Eskola, 1990.
8. Hoyle, G., High Speed Steels, Butterworths, 1988, 41.
9. Martinez, V., Palma, R. eta Urkola, J.J., Journal of Materials Science, 25, 1990, 3359-3367.
10. Palma, R., Martinez, V. eta Urkola, J.J., Powder Metallurgy, 32, 1989, 291-299.
11. CEIT, "Novel beta silicon carbide powders and derived performance ceramics" izendutako Brite proiektua
12. Smith, A.S., Loughborough University of Technology.
13. Opsommer, A., Doktorego-Tesia, Donostiako Goi-Mailako Injineru-Eskola, 1992.
14. Iturriza, I., Etxebarria, J., Gutierrez, I., eta Castro, F., Journal of Materials Science, 25, 1990, 2539-2548.
15. Castro, F. eta Iturriza, I., Journal of Materials Science Letters, 9, 1990, 600-602.

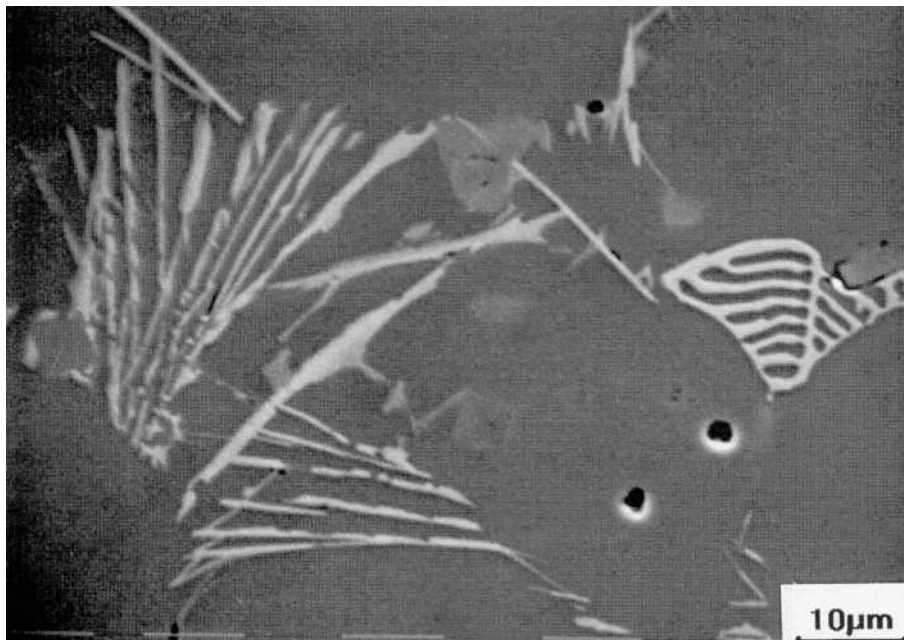
10.- Irudien zerrenda



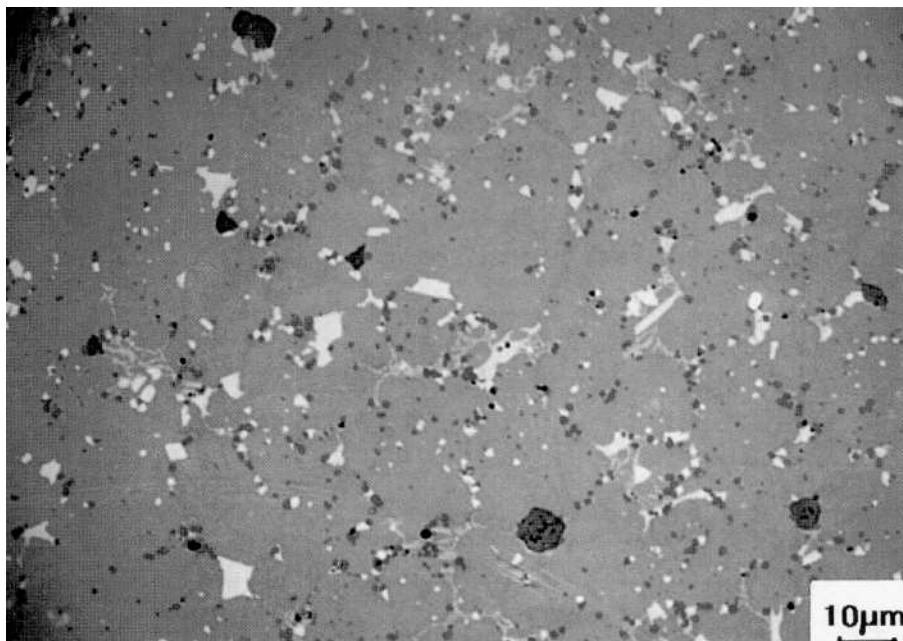
1. Irud. Tenperatura-banaketa erremintan zehar ebaketa-abiaduraren funtzioz (1).



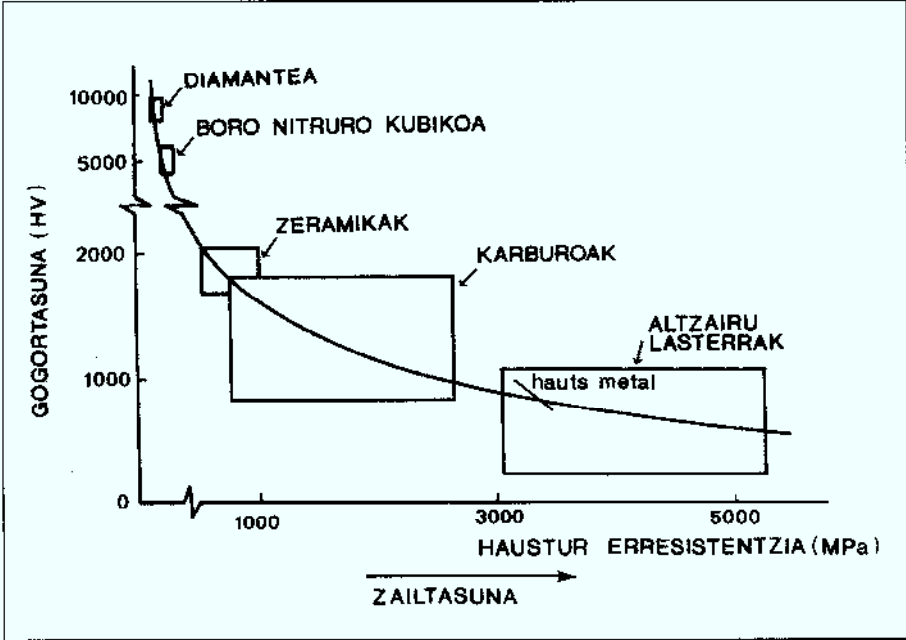
2. Irud. Karbono-altzairuen eta altzairu lasterren gogortasunaren menpekotasuna temperaturarekiko (2).



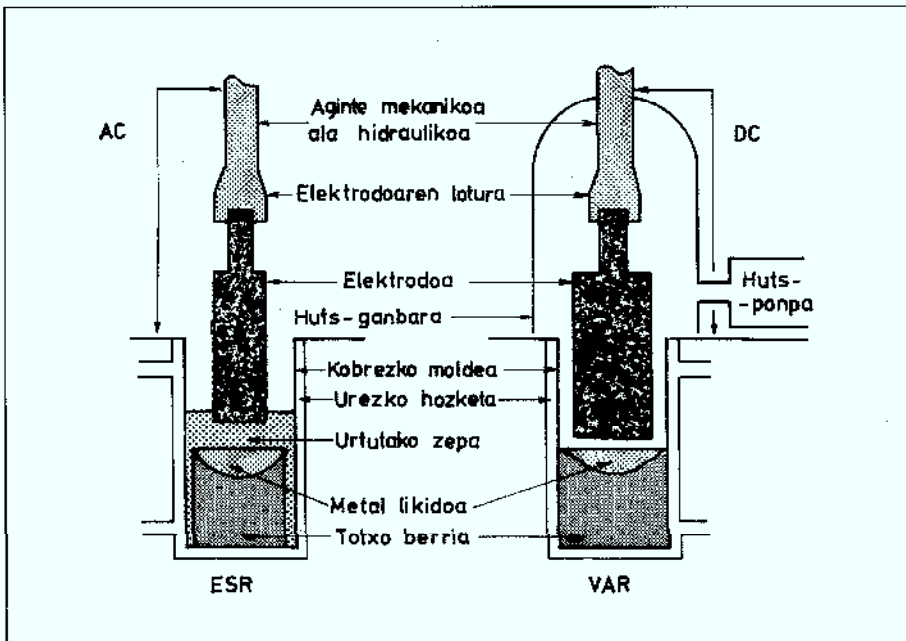
3. Irud. Oso karburo larriak altzairu laster batean. Kasu honetan altzairuaren zailtasuna apala izango da (mikroskopia optikoan egindako argazkia) (3)



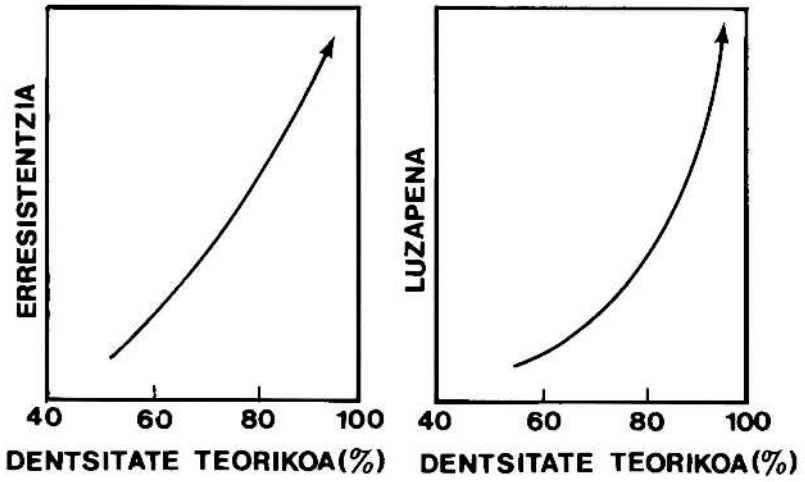
4. Irud. Karburo eutectoide txikiak altzairu laster baten matrizean (mikroskopia optikoan egindako argazkia) (3)



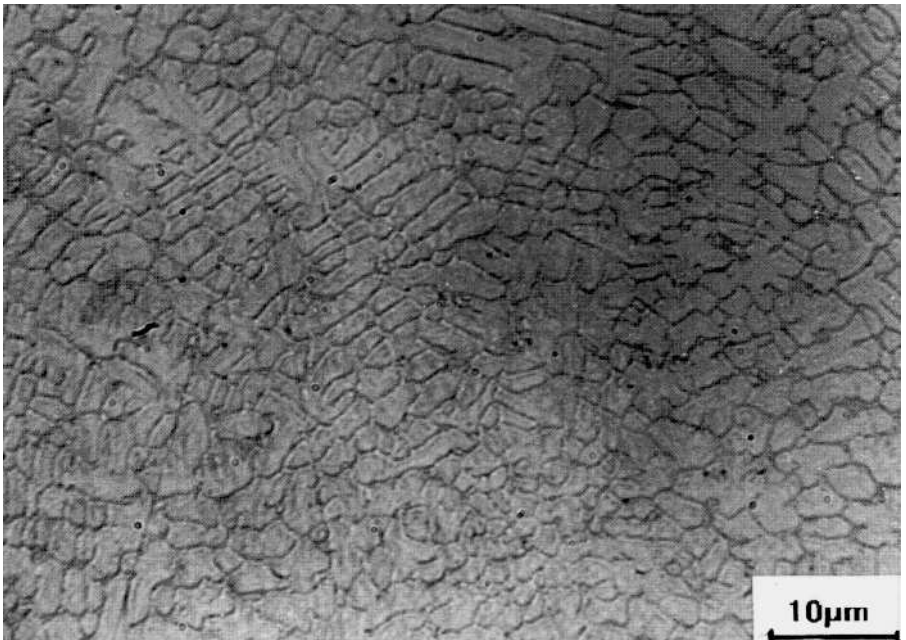
5. Irud. Gogortasuna versus erresistentzia material-mota desberdinentzako. Gogortasuna igotzerakoan higadurarekiko portaera hobea da baina materialak zailtasuna galdu egiten du (4).



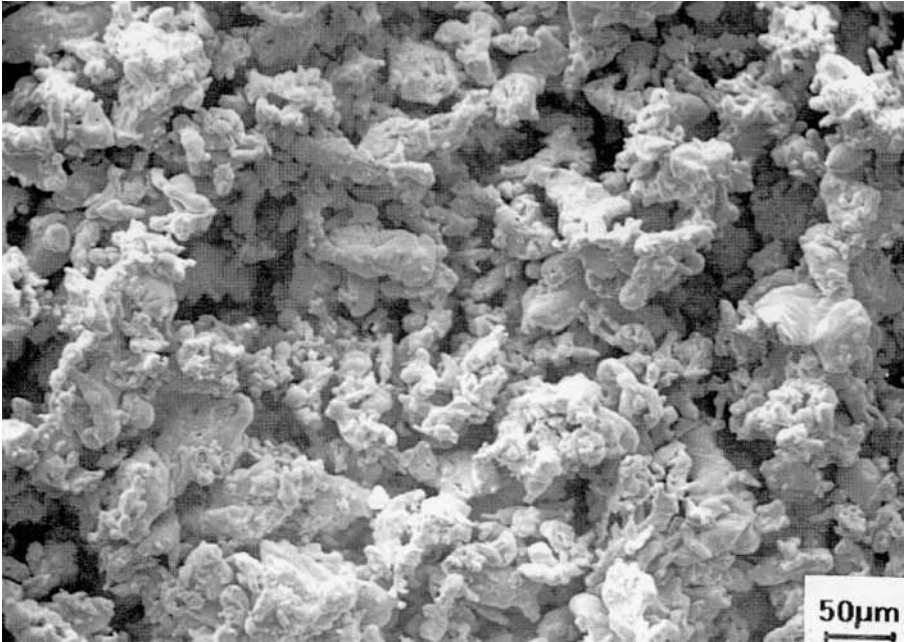
6. Irud. ESR elektrozeza bidezko birgaldaketaren eta VAR huts-arkuaren bidezko birgaldaketaren eskemak (5)



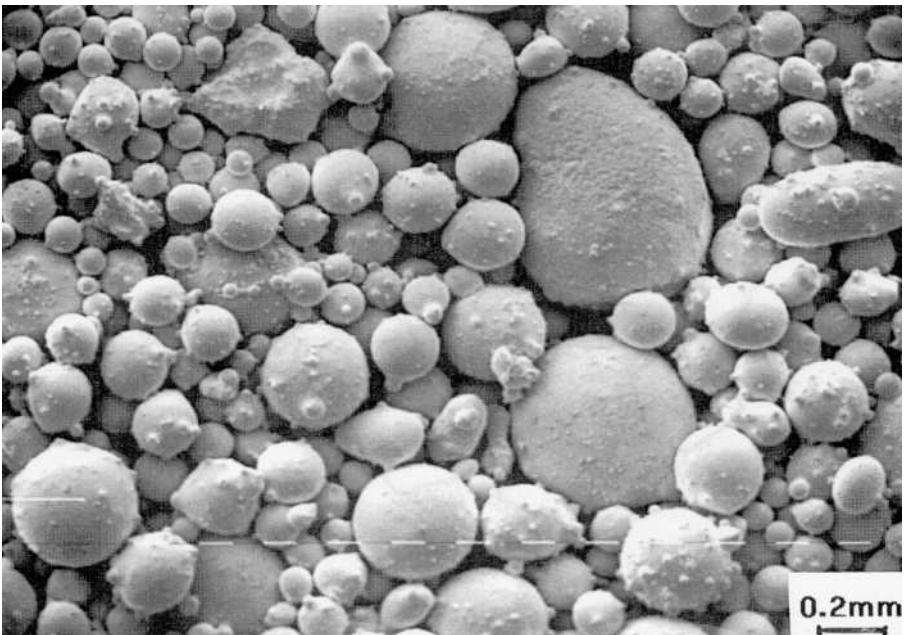
7. Irud. Erresistentzia eta harikotasunaren aldaketa dentsitatearen funtzioz. Ikusten denez, propietate onak edukitzeko, hautsen oinarritutako materialaren dentsitateak balio teorikoari hurbilena izan behar du.



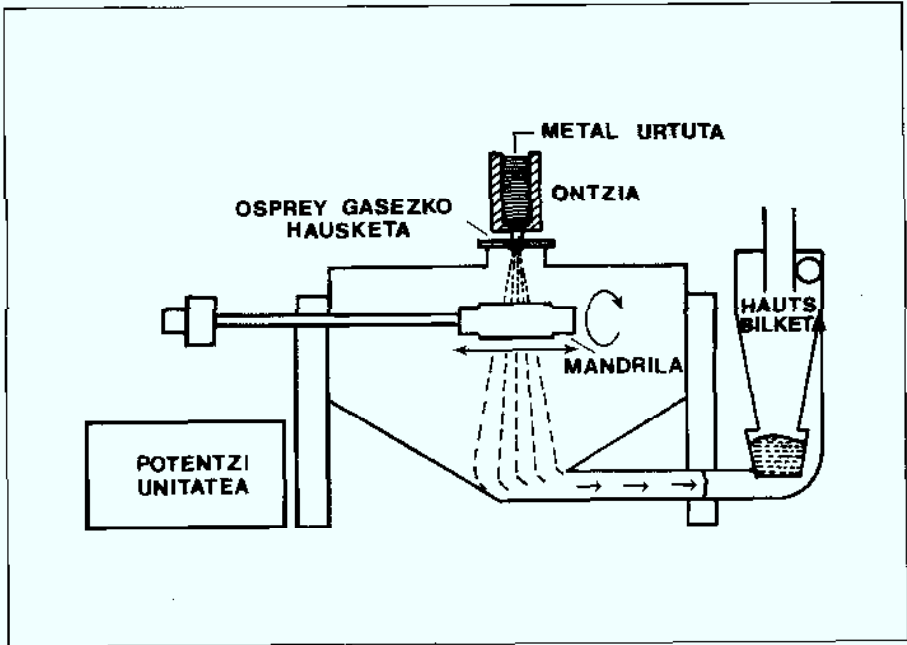
8. Irud. Hauts bakoitzean dagoen mikroegitura oso xehea eta homogenoa izaten da (6).



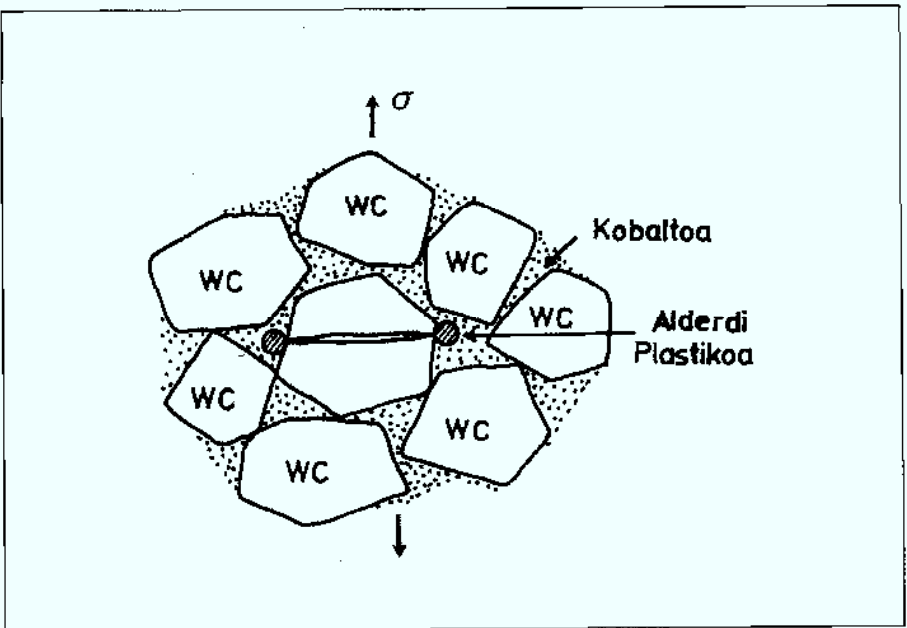
9. Irud. Urezko hausketaren bidez lotutako hauts metalikoak (arakatzeko mikroskopia elektronikoan egindako argazkia) (7).



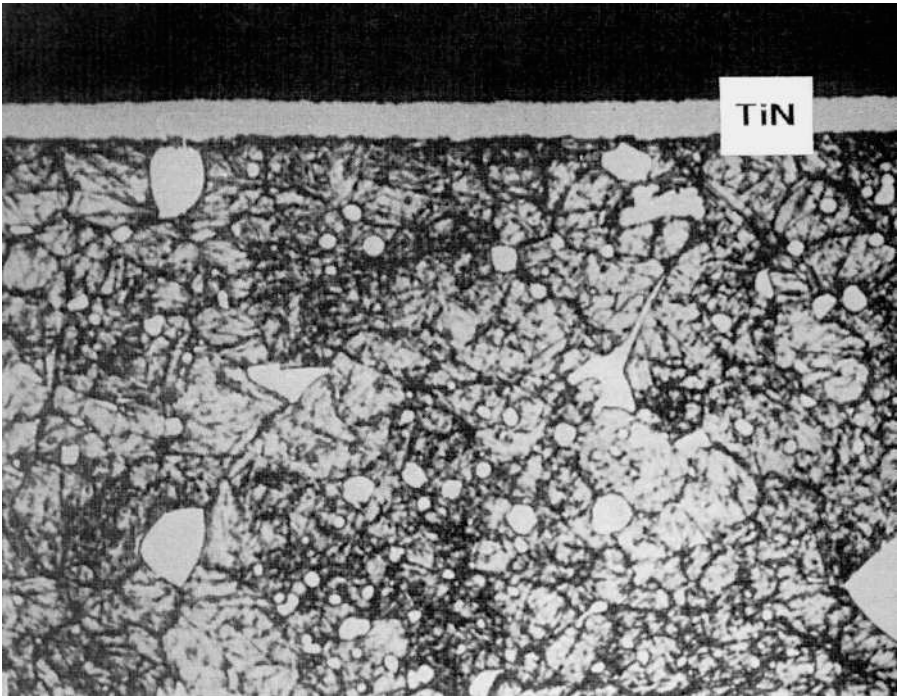
10. Irud. Gasezko hausketaren bidez lortutako hauts metalikoak (arakatzeko mikroskopia elektronikoan egindako argazkia) (2)



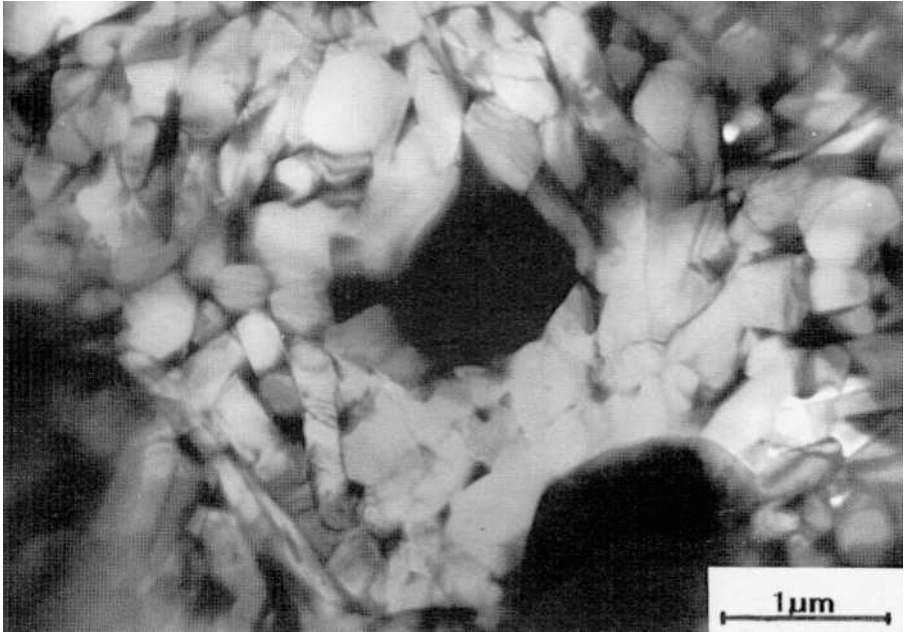
11. Irud. Osprey izeneko sprayzko deposizioaren eskema (8)



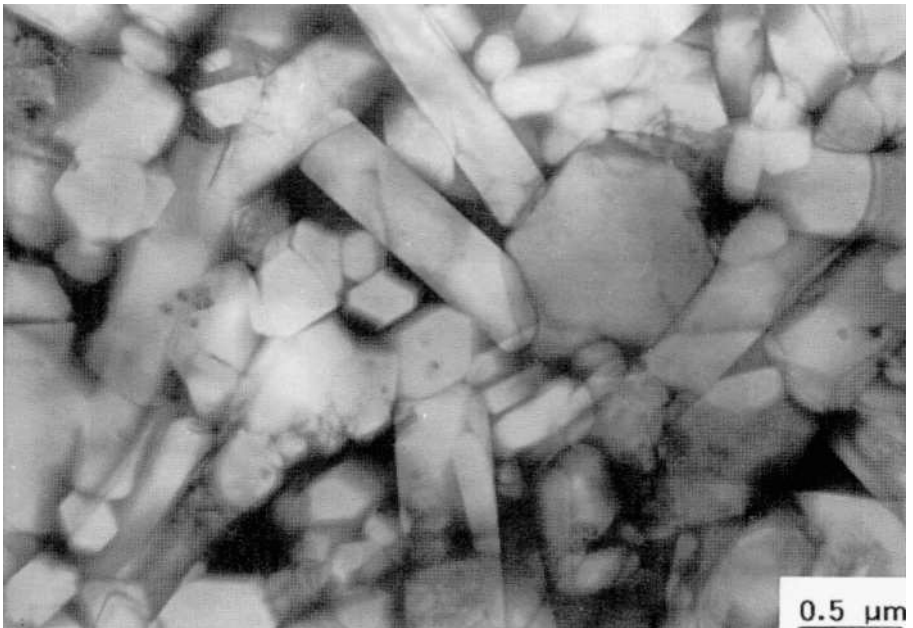
12. Irud. Material zeramikoz (WC) eta metalez (Co) osatutako zernetan matrice metalikoak pitzaduraren hazkundera galerazten du.



13. Irud. Altzairu laster bat CVD prozeduraren bidez TiN zeramikaz estalita (12).



14. Irud. Silizio nitruoan, itrian (bolumenaren %6), aluminan (bolumenaren %1,5) eta titanio karburoan (bolumenaren %10) oinarritutako zeramika baten mikroegitura (transmisiozko mikroskopia elektronikoan egindako argazkia) (13).



15. Irud. Silizio nitruoan, itrian (bolumenaren %6) eta aluminan (bolumenaren %6) oinarritutako erreminta zeramika baten mikroegitura (transmisiozko mikroskopia elektronikoan egindako argazkia) (14)