

Ebaketa-erradioaren eragina Inconel®718 fresatzeko erreminten bizitza erabilgarrian

(Cutting edge radius influence on Inconel®718 milling operation)

Ander Del Olmo-Sanz^{*1}, Gaizka Gómez-Escudero¹, Pablo Fernández-Lucio¹,
Ainhoa Celaya¹, Luis Norberto López de Lacalle^{1,2}

¹ Ingeniaritza Mekanikako Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, Bilbo

² Fabrikazio Aeronautiko Aurreratuko Zentroa, UPV/EHU, Zamudio

LABURPENA Sektore aeronautikoan erabiltzen diren super-aleazio termorresistenteak lantzea erronka zaila da, ebaketa-erremintak azkar higatzen baititu. Horregatik, erreminta horien errendimendua hobetzeko, fabrikatzaileek, ebaketa geometriaren eragina ulertzea funtsezkoa dela uste dute. Hori dela eta, artikulua honetan erremintaren ebaketa sorbatzeko erradioak eta jaulkitze- zein azpian-angeluek daukaten eragina aztertzen da. Abiapuntu gisa, diseinu esperimental (DOE) bat burutu da, non aurrean aipatutako hiru parametroen eragina kuantifikatzen den, Elementu Finituen Metodoaren (EF) bitartez. Ondoren, proba esperimentalei ekin zaie, EF softwaretik lortutako emaitza teorikoak balioztatzeko. Emaitzek erakusten dute ebaketa sorbatzearen erradioak erremintaren higaduran eragin zuzena daukala eta balio egokia aukeratuz erremintaren bizitza erabilgarria areagotzeko gai dela.

HITZ GAKOAK: Ebaketa sorbatze erradioa, super-aleazio termorresistenteak, erreminta higadura.

ABSTRACT: *The thermoresistant super-alloys used in the aeronautical industry imply many problems to machine them such as the premature and excessive wear of the cutting tools. Therefore, to enhance their performance the tool manufacturers are focusing on the influence of the cutting-edge geometry. Hence, in this article a study of three different parameters of the tool, the cutting-edge radius, rake angle and clearance angle, has been carried out to analyse their influence on the tool life. First of all, a design of experiment (DOE) has been done using a program of Finite Elements Method (FEM), to discuss which of those parameters have more influence. Then, some experimental tests have been carried out to validate the conclusions obtained by the FEM simulations. The results show that the cutting-edge radius has the major influence in the wear of the tool and, with the appropriate value; the tool life can be increased.*

KEYWORDS: *Cutting-edge radius, thermoresistant super-alloys, tool wear.*

*** Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Ander del Olmo-Sanz. Ingeniaritza Mekanikako Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, 48013 Bilbao. – ander.delolmo@ehu.eus – <https://orcid.org/0000-0002-1360-6242>

Nola aipatu / How to cite: Del Olmo-Sanz, Ander; Gómez-Escudero, Gaizka; Fernández-Lucio, Pablo; Celaya, Ainhoa; López de Lacalle, Luis Norberto (2021). «Ebaketa erradioaren eragina Inconel®718 fresatzeko erreminten bizitza erabilgarrian». *Ekaia*, 40, 2021, 361-373. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.22061>).

Jasotze-data: 2020, irailak 24; Onartze-data: 2020, abenduak 15.

ISSN 0214-9753 - eISSN 2444-3581 / © 2021 UPV/EHU



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-LanEratorririkGabe 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

1. SARRERA

Super-aleazio termorresistenteak (HRSA – *Heat resistant superalloys*) aeronautika arloan erabiltzea gero eta hedatuago dagoen joera da. Material horiek tenperatura handietan dituzten ezaugarri mekaniko apartekoei esker, motor aeronautikoko elementu kritikoak fabrikatzeko erabiltzen dira. Talde horren barnean, nikel elementuan oinarritutakoak nagusitu dira, batez ere, Inconel®718. Berez, aleazio horrek ezaugarri bikainak dauzka tenperatura altuetan lan egiteko, hala nola, trakzio-erresistentzia, neke-erresistentzia, isurpenarekiko erresistentzia eta korrosioarekiko erresistentzia [1].

Haatik, ezaugarri horiek ere euren eragozpenak dauzkate, batez ere mekanizatzeko orduan. Horien artean, ebaketa-indar handien agerpena mekanizazio prozesuan zehar; horren ondorioz, materialaren kentze-tasa murriztu egiten da. Gainera, ebaketa-erremintetan mota askoko higadurak agertzen dira, hala nola, atxikimendua, difusio kimikoa eta abar [2, 3, 4, 5]. Hori dela eta, aleazio termorresistenteen mekanizazioa hobetzean dago erronka, prozesu horietan erabiltzen diren erreminten optimizazioan hain zuzen ere.

Azken urteotan, fresaketa-erreminten ebaketa sorbatzaren kontrol zehatza izatea funtsezko bilakatu da, erremintaren errendimendu optimoa erauzi nahi baldin bada [6], [7]. Hainbat ikertzailek frogatua dute ebaketa sorbatzaren kontrol on bat izateak eragin onuragarriak dakartzkiola erreminten errendimenduari, batez ere estaldura dutenei [8, 9]. Izan ere, eragin handia dauka ebaketa erradioaren efektuak txirbil-eraketaren, ebaketa-indarren eta tentsio-banaketaren alderdietan, eskala mikroskopiko batetik ikusita [10].

Lan honetan, erremintaren geometriak bere higaduran duen eragina aztertuta. Horretarako, fresaketaren Elementu Finituen eredu bat garatu eta diseinu esperimental (DOE) bat gauzatu da, jaulkitze-angeluaren, azpijan-angeluaren eta sorbatz-erradioaren eragina higaduran zein den aztertzeko. Analisi honetan, eragin handiena duen parametroa sorbatz erradioa dela egiaztatu da. Lortutako emaitzak entsegu esperimentalen bidez balioztatu dira, non berretsia izan den sorbatz-erradio egokia aukeratuz erremintaren biziraupena luzatzea posible dela.

2. EBAKETA-SORBATZAREN GEOMETRIAREN ERAGINA

Ebaketa sorbatzaren geometria eta haren egoera erabakigarriak dira mekanizazio-prozesu arrakastatsua lortzeko. Izan ere, faktore horien bitartez kontrolatzen ditugu txirbil-ebaketa prozesuaren egonkortasuna. Halaber, erremintaren geometriak piezaren gainazal integritatean ere eragin zuzena dauka. Hori dela eta, sorbatzaren kontrol zorrotzago bat izateak txirbil-harroketako prozesuaren hobekuntza dakar.

Ebaketa-sorbatzen prestakuntzak erreminten fabrikazio-prozesuan ager daitezkeen akats mikroskopikoak ezabaten ditu, hala nola mikro-hausturak, material-bizarrak, erreduarak, zimurdurak eta gainazaleko irregulartasunak. Izan ere, faktore horiek dira mekanizazio prozesua zailtzen dutenak, eta ondorioz erremintaren higadura azkartzen dutenak. Beraz, erremintaren funtzionamendu optimoa lortu nahi baldin bada, funtsezkoa da akats horiek guztiak ebaketa-sorbatzetik ezabatzea, eta horretarako, ezinbestekoa da parametro egokiak izatea [11].

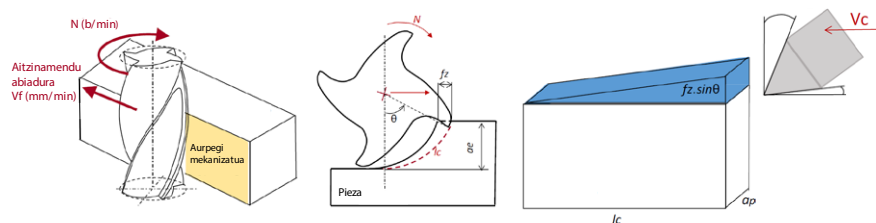
Ebaketa-sorbatzaren geometriak eragin zuzena dauka erremintak jasan ditzakeen esfortzu termo-mekanikoetan. Hori dela eta, ebaketa-sorbatzaren prestakuntzak daukan eragina ulertzeak interes handia sortu du azken urteetan. Izan ere, mikrogeometrian egindako aldaketa txiki batekin hobekuntza nabarmenak lor daitezke erremintaren bizitza erabilgarrian. Beraz, ebaketa-sorbatzen prestakuntza-prozesua oso garrantzitsua bilakatu da fabrikazio prozesuetarako. Sorbatz-prestakuntza prozesu honen bitartez hainbat helburu bete nahi dira [12]:

- Ebaketa-sorbatzen erresistentzia handitzea.
- Chipping izeneko higadura mota gutxitzea.
- Ebaketa-sorbatzen akatsak desagertzea.
- Erremintaren bizitza erabilgarria luzatzea.
- Erremintaren gainazala estaldura prozesurako prestatzea.
- Piezen kalitatea hobetzea (doitasuna, gainazalaren akabera).

Aurreko guztia kontuan hartuta, argi dago fresatzeko erreminten ebaketa-sorbatzen prestakuntza prozesuak oso garrantzitsuak direla, erremintaren puntaren geometriaren kontrol hobea izatea ahalbidetzen dutelako.

3. ERREMINTA-GEOMETRIAREN ERAGINAREN ANALISIA

Inconel®718 fresaketa periferikoan erremintaren geometriak duen eragina aztertzeko, elementu finituen bidezko simulazioak burutu dira. Horretarako, lehen pausoa fresaketa periferikoa moldatzea izan da DEFORM3D softwarearen bitartez simulatzeko prozesua.

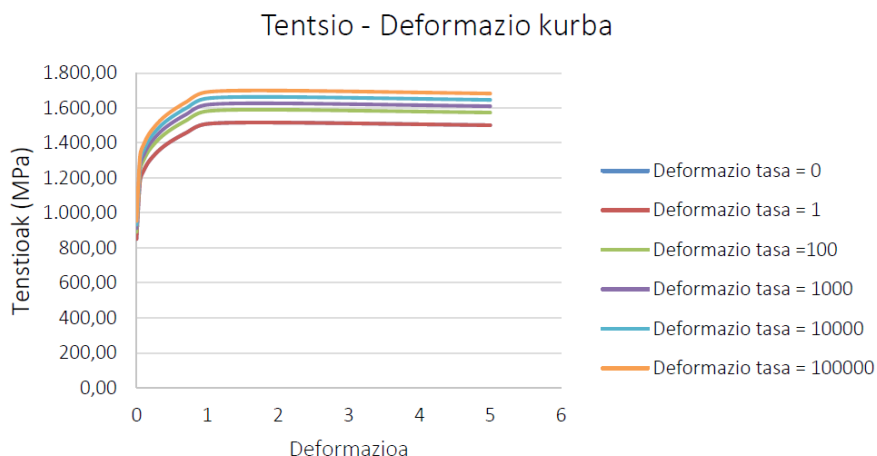


1. irudia. Fresaketa periferikoaren moldaketa 3D-tako fresaketa ortogonalera.

Lehenengo irudian ikus daiteke jarraitutako sinplifikazioa, prozesuaren kostu konputazionala murrizteko, 3D ebaketa ortogonalaren ebaketan oinarrituz.

Pieza objektu plastiko gisa definitu da, eta haren portaera errealitatera hurbiltzeko, Inconel®718 materialaren ekuazio konstitutiboa erabili da, DEFORM kodearen barruan eskuragarri dagoena. Eredu termo-bisko-plastiko horrek, piezak jasaten dituen tentsioak, deformazioak, deformazio horien abiadurak eta tenperaturak erlazionatzen ditu 1 ekuazioko adierazpen orokorra erabiliz eta 2. irudian adierazitako kurbei jarraituz.

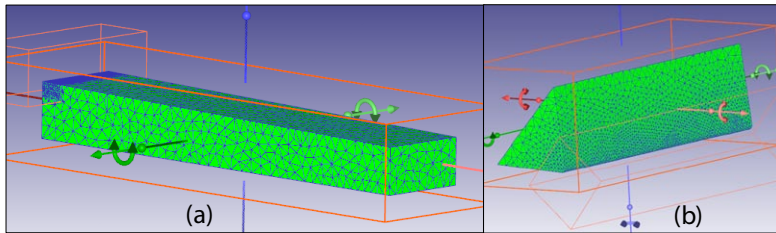
$$\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) \quad (1)$$



2. irudia. Tentsioen balioak, deformazio eta deformazio tasen arabera (100°C-tarako).

Piezaren mailatua osatzeko elementu tetraedrikoak erabili dira. 3. irudian ikusten den bezala, ebaketa-sorbatzaren luzetara dauden elementuak txikiagoak dira, zonalde horretan dagoen interesa dela eta, elementuen batez besteko tamaina 0,005 mm izanik. Ostera, piezaren gainerako mailatuko elementuak 0,04 mm batez besteko tamaina egokitu zaie. Baldin eta piezaren zonalderen batean kontuan hartu beharreko gradiente termiko, deformazio tasa edo deformazio-balio handiak baditu, saretzeko estrategia honek zonalde horien birsaretzea ahalbidetzen du. Horrek saretze txiki hau erremintaren eta piezaren kontaktuan ematea ahalbidetzen du, hau da, ebaketa gunean.

Ebaketa-erreminta gorputz zurruntzat definitu da, eta tungsteno karbu-roaren propietateak egokitu zaizkio. Informazio hori ere DEFORM liburutegitik aterata dago. Mailatuaren aldetik, 3.b irudian ikus daitekeen bezala, erremintaren puntan batez besteko 0,005 mm-ko elementuak erabili dira sare fin bat osatzeko; aldiz, gainerakoan batez besteko 0,1 mm tamainako elementuetan oinarritu da. Guztira 25.000 elementu tetraedriko erabili dira; balio horrekin emaitzen zehaztasuna eta kalkulu konputazionalaren kostua oreka batera heltzen dira.



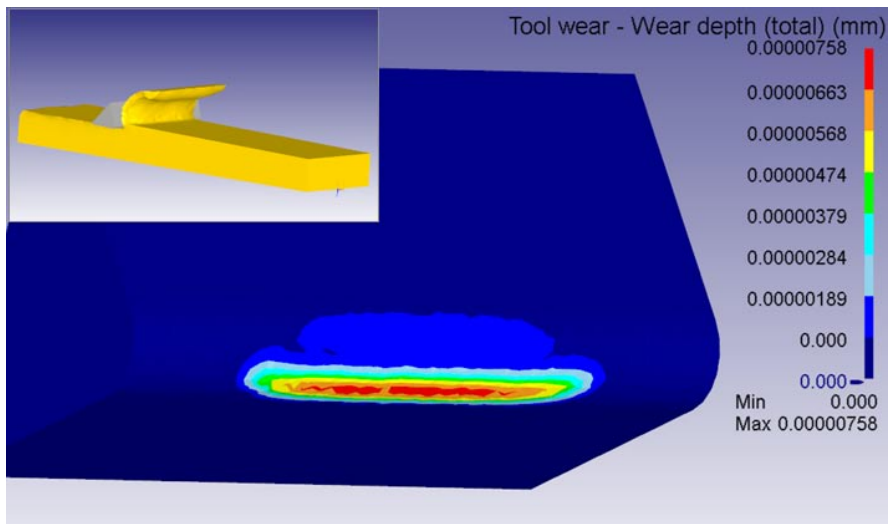
3. irudia. (a) piezaren mailatua eta (b) erremintaren mailatua.

Mekanizazio zentroaren barnean tenperatura 20°C-an ezarri denez, bero-transferentzia koefizientea balio orokor bat erabiltzearekin nahiko izan da, 45 N/mm s °C-koa adibidez [13]. Prozesua etengabeko zizailaduran oinarritzen denez, beharrezkoa da erreminta-piezaren kontaktuaren marruskadura modelatzeko 0,75 zizailadura marruskadura-koefizientea erabiltzea [14]. Lan honetan, Usui-ren higadura-eredua erabili da sorbatzeko urradura zehazteko, 2. ekuazioan adierazten den bezala, non α_n tentsio normala, v_s abiadura labainkaria, T tenperatura eta A eta B balio konstanteak diren, hurrenez hurren, $2,514 \times 10^{-8}$ eta 964,5 balioak Inconel®718 materialarentzako [14].

$$\frac{dw}{dt} = A\alpha_n v_s e^{\left(\frac{-B}{T}\right)} \quad (2)$$

Bigarren pausoa diseinu esperimental (DOE) gauzatzea izan da; horretarako, ebaketa-geometriaren parametroen eragina aztertu da. Zehatz-mehatz, 3 balio independente aztertu dira: ebaketa-sorbatzaren erradioa, jaulkitze-angelua eta azpijan-angelua. Simulazio horiek L_9 array ortogonalaren bitartez osatu dira bloke latindarren distribuzioan oinarrituz, non hautatutako faktoreak elkarrekin nahasten diren. Distribuzio estatistiko hau erabiltzea aukeratu da, non eta aldagai-kopuru zehatz batentzat ahalik eta entsegu gutxien egitea ahalbidetzen duen, baita zeinek duen eragin handiena aztertutako parame-

troan jakiteko ere, lan honetan, erremintaren higaduran hain zuzen. Distribuzio mota hau kostu konputazional txikiena duena da; izan ere, aldagai bakoitzeko balio bakarra entseatzen da beste aldagaien balioekin. Hori dela eta, 3 aldagaietako esperimientua egin nahi izatekotan, aldagai bakoitzak 3 balio posible izanda, bakarrik egin beharko lirateke 9 esperimentu, 27 konbinazio posibletatik.



4. irudia. Simulazioaren bidez lortutako erreminta-higadura.

1. taula. Entseguen diseinua eta erreminta-higaduraren emaitzak.

Erreminta geometria				Simulazioak
Entsegua	Ebaketa- sorbatzaren erradioa (µm)	Jaulkitze- angelua (°)	Azpijan-angelua (°)	Higadura (mm)
1	15	6	6	$7,30 \times 10^{-6}$
2	17	6	7	$7,55 \times 10^{-6}$
3	19	6	8	$7,62 \times 10^{-6}$
4	15	8	8	$6,75 \times 10^{-6}$
5	17	8	6	$7,58 \times 10^{-6}$
6	19	8	7	$7,57 \times 10^{-6}$
7	15	10	7	$7,66 \times 10^{-6}$
8	17	10	8	$7,10 \times 10^{-6}$
9	19	10	6	$7,89 \times 10^{-6}$

Simulazioan erabilitako ebaketa-baldintzak honako hauek izan dira: ebaketa-abiadura (V_c) 26 m/min, hortzeko aitzinamendua (f_z) 0,058 mm/z, iraganaldi sakonera erradiala (a_e) 0,15 mm eta iraganaldi sakonera axiala (a_p) 0,1 mm. 4. irudian elementu finituen bidezko simulazioan lortutako erreminta-higadura adierazten da, non balio maximoa azpijan aurpegian ematen dela ikus daitekeen. Simulazioetan lortutako emaitzak 1. taulan adierazten dira.

Ondoren, lortutako emaitzekin ANOVA bat gauzatu da, parametro bakoitzaren eraginaren garrantzia aztertzeko erremintaren higaduraren sorreran. Hiru talde, hiru maila ezberdinekin, ezarri dira; horri esker, batezbesteko osoa, talde bakoitzaren batezbestekoa eta bariazioak kalkula daitezke. F-Fisher balio-muga kalkulatu da estatistikako tauletan oinarrituz; horretarako, $\alpha=0,05$ balioa eta 2 askatasun gradutako zenbakitzaile eta zatitzaileak erabili dira. Datu horiekin lagunduta bariazio-parametro bakoitzerako F balioak (F distribuzio estatistikoari jarraitzen dioten balioak) kalkulatu dira eta hauek muga-balioa baino handiagoak baldin badira, orduan % 0,05 mesfidantzarekin esan dezakegu aspektu horrek eragin esanguratsua duela. Emaitzak honako taula honetan aurkezten dira.

2. taula. ANOVAren emaitzak.

Bariazio-jatorria	Karratuen baturak	Askatasun Gradua	Karratuen batezbestekoa	F	F-Fisher
Azpijan-angelua	$3,0736 \times 10^{-13}$	2	$1,5368 \times 10^{-13}$	16,33	19
Jaulkitz- angelua	$1,1776 \times 10^{-13}$	2	$5,8878 \times 10^{-14}$	6,26	19
Sorbatz-erradioa	$9,6109 \times 10^{-13}$	2	$4,8054 \times 10^{-13}$	51,06	19
Talde partaideen artean	$1,8822 \times 10^{-14}$	2	$9,4111 \times 10^{-15}$		
Guztira	$1,4050 \times 10^{-12}$	8			

Erreferentziatzat balio horiek hartuta, honako ondorio hauetara hel daiteke: azpijan-angeluaren eta ebaketa-sorbatzaren erradioaren F balioak direla handienak. Biak alderatuz, ebaketa sorbatzaren erradioak garrantzi handiago duela berrets daiteke, balio handiagoa baitu. Hori dela eta, esan daiteke ebaketa-erreminten errendimenduan eragin handiena duen balioa sorbatz-erradioa dela, nikelean oinarritutako aleazioen mekanizazioan guxtienez.

4. ENTSEGU ESPERIMENTALA

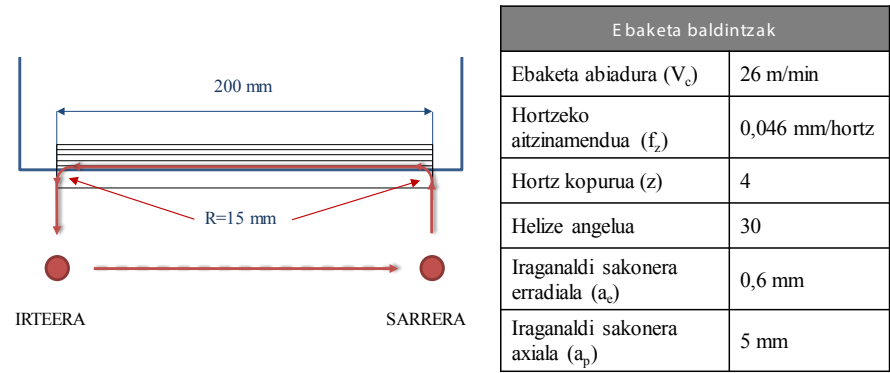
Erreminta puntaren geometriak nolako eragina duen fresaren bizitza erabilgarrian ikusteko, zenbait proba esperimental burutu dira. Proba horiek Kondia

A6 mekanizazio-zentroan burutu dira, eta 3 ardatzetan oinarritutako zentroa da. Erabilitako materiala nikelan oinarritutako aleazioa izan da, Inconel®718 hain zuzen. Aleazio hau oso erabilia da turbomakineria aeronautikoko fabrikatzaileen artean tenperatura altuetan dituen ezaugarri mekanikoei esker. Honako taula honetan erakusten da material honen konposizio kimikoa:

3. taula. Inconel®718aren konposizio kimikoa [%].

Ni	Cr	Co	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	B	C	Mn	Si	Beste batzuk
52,50	19,00	1,00	17,00	5,00	3,00	1,00	0,60	0,01	0,08	0,35	0,35	0,11

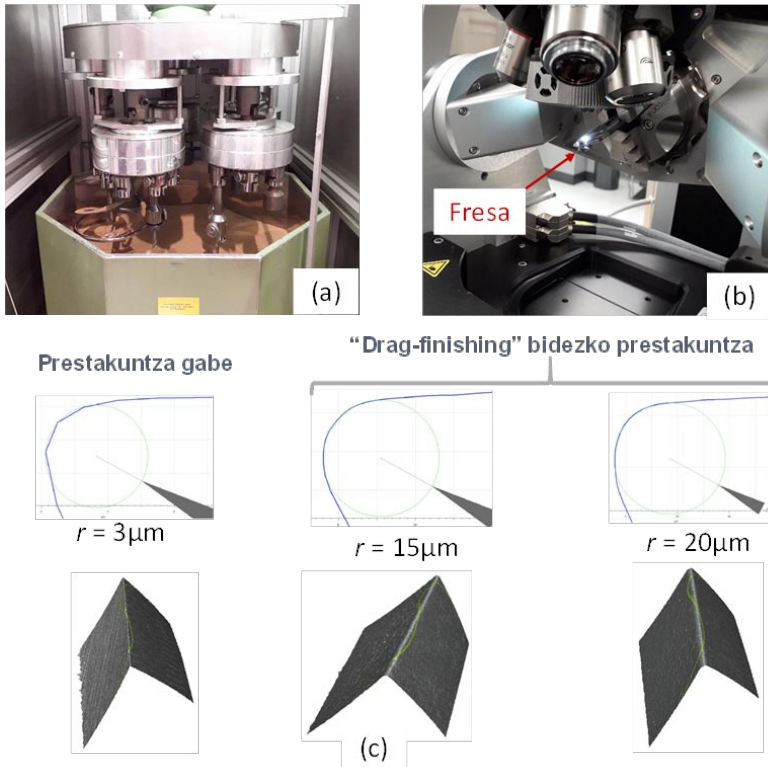
Proba horietan 10 mm diametroko tungsteno karburoan oinarritutako erre-mintak erabili dira, inolako estalkirik gabe. 5. irudian, eskuineko zonaldean, ikus daiteke prozesuan erabilitako ebaketa-baldintzak, eta ezkerreko zonaldean, konfigurazio esperimentalak. Iraganaldiak komunztaduran programatu dira, eta luzetara 200 milimetroko ibilbidea egin behar du. Nabarmendu beharra dago bai sarrera zein irteera tangentialki programatu direla, 15 milimetroko erradioa mantenduz. Gainera, fresaketa-prozesuan zehar ez da ebaketa-jariakinik erabili ebaketa-sorbatzen eragina areagotzeko. Ebaketa-baldintzak egileek aurrez burututako esperientzien arabera aukeratu dira [15]. Entsegu esperimentaletan erabilitako iraganaldi sakonera erradial eta axialaren balioak simulazioan erabilitako balioak baino handiagoak dira, sorbatzaren erradioak higiduran duen eragina areagotzeko asmotan.



5. irudia. Entseguaren konfigurazio esperimentalak eta ebaketa-baldintzak.

Fresaketa-proba geldiarazteko baldintza-irizpidea 0,2 milimetroko sorbatz albo-higiduran [16] finkatu da, aeronautika-sektoreko eskaki-

zun zorrotzetan oinarrituz. Iraganaldien artean, PCE-200 mikroskopiaoren bitartez, erremintaren higaduraren neurketa-kontrol zehatza jarraitu da. Neurketaren batek geldialdi-baldintzaren irizpidea betetzen badu, entsegua amaitutzat ematen da.



6. irudia. (a) DF70 OTEC® arrastatze-makina, (b) higadura-neurketak egiteko Alicona® Infinite Focus mikroskopia, eta (c) lortutako ebaketa sorbatzen erradioen neurketak.

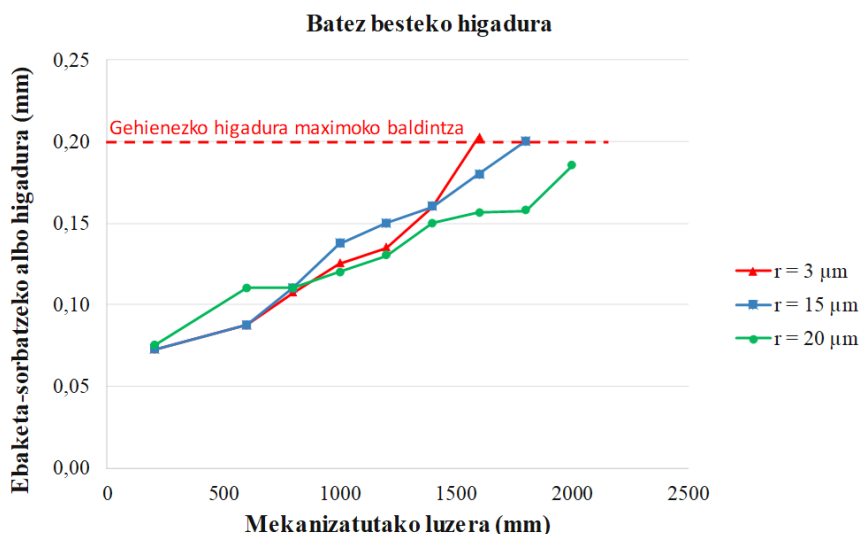
Erremintaren ebaketa-sorbatzen prestakuntzari dagokionez, arrastatze-metodo bat erabili da. Arrastatze-teknika hori fresaketa-erremintak partikula urratzailez betetako ingurune batean murgilduta mugitzean datza. Modu horretan, beso nagusia eta haren satellite eramaileak biratuz, erremintaren eta partikulen arteko kontaktua gauzatzen da, ondorioz gutxi gorabeherako profil simetriko biribila sortzen da erremintaren ebaketa sorbatzetan. Sorbatz magnitudea faktore askoren araberakoa da, besteak beste, ingurune urratzailearen partikulen tamaina, sistema planetarioaren mugimenduaren abiadura edota arrastatzeko prozesuaren iraupena. Prozesu honen abantaila nagusia da eba-

keta-sorbatz konplexuko erreminten prestaketa errazten dela, hala nola ertzen biribilketa homogenea lortu behar diren fresetan [17].

Arrastatze-prozesua DF70 OTEC® (6.a irudia) makinan burutu da. Erremintak % 50 intxaur oskol eta beste % 50 SiC partikulez osatutako ingurune urratzailean murgiltzen dira. Erremintaren ebaketa-sorbatzaren erradioa Alicona® Infinite Focus mikroskopiaoren (6.b irudia) bidez neurtu da, EdgeMaster® modulua erabiliz. Aztertutako erradioak honako hauek izan dira: biribilketarik gabekoa (erreminta fabrikatzaileari zuzen erositia), $15\text{ }\mu\text{m}$ erradiokoa eta $20\text{ }\mu\text{m}$ -koa, 6.c irudian erakusten den moduan. Ebaketa-sorbatz bakoitzeko, bi erreminta probatu dira. Erremintaren bizitza erabilgarria batez besteko higaduraren bitartez aztertu da, aurreko lerroetan aipatutako gelditze-baldintzan oinarrituz.

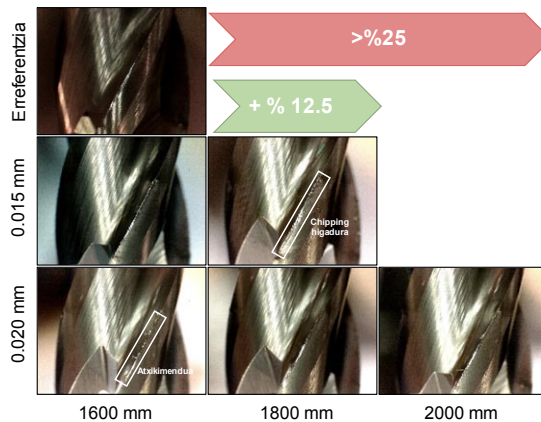
5. EMAITZAK

Ebaketa-sorbatzen prestakuntzak eragin onuragarriak ditu erremintaren sorbatz-higaduraren garapenean, erremintaren bizitza erabilgarria luzatuz, 7. irudian ikusi daitekeen bezala. Eragin hori Rodriguezek ere adierazi zuen [12] CK45 altzairua karburozko erremintekin torneatzera-koan.



7. irudia. Batez besteko higaduraren eboluzioa ebaketa-erradio balio ezberdinentzako

Nahiz eta hasiera batean prestakuntzarik gabeko erremintetan higadura txikiagoa izan, entsegua aurrera doan heinean, higadura-joera txikiagoa mantentzen da ebaketa-sorbatzen prestakuntza jasan duten erremintetan. Aldiz, prestakuntzarik jaso ez duten erremintetan, hau da, $3\text{ }\mu\text{m}$ erradiokoetan, 1600 mm-ko luzera bakarrik mekanizatzeko gai izan dira, geldiketa-irizpideaari jarraituz. Balio hau erreferentziatatzat hartuta, beste bi erremintek, ebaketa sorbatzen prestakuntza jasan dutenek, mekanizazio-distantzia luzeagoak lortu dituzte. Alde batetik, $15\text{ }\mu\text{m}$ -ko erradio biribilketakoak, 1800 mm-ko distantzia mekanizatzeko gai izan dira. Kasu horretan, chipping deritzon higadura zabaldua zegoen ebaketa-sorbatz osotik, 8. irudian ikusten den bezala.



8. irudia. Erreminten arteko higadura konparazioa.

Bestalde, $20\text{ }\mu\text{m}$ -ko erradio biribilketa zutenek, erreferentziarekin alderatuz, %25eko hobekuntza tasa lortu dute. Izan ere, erreferentzia-erreminta 0,2 mm-tako higadura izatera ailegatzen denean, erreminta horrek material atxikimendu kantitate minimoa dauka sorbatzean zehar; gainera, material itsatsia iraganaldiak aurrera joan ahala kentzen da. Bestalde, erreminta hori 2000 mm-ko distantzia mekanizatzerara heldu da, eta higadura uniformekei banatzen da ebaketa sorbatz guztian zehar. Entsegu horretan egiaztatzen da ebaketa-sorbatzen prestakuntza jaso duten erremintetan higadura era uniformeagoan hedatzen dela Inconel®718 materialaren fresaketa prozesuan zehar, euren sorbatzetan artezketa-prozesua bakarrik pairatu duten erremintekin alderatuz. Aurre-prestakuntza prozesuak sorbatzen inguruko eremuaren ehundura hobetzen du. Azken finean, estrategia horrek hobekuntza handia dakar, erremintaren higadura kontrolatzeko tresna delako: ondorioz, erremintaren bizitza erabilgarria luzatzen du.

6. ONDORIOAK

Lan honetan, erreminta geometriaren eragina aztertzen da Inconel®718 materiala mekanizatzerakoan, EF simulazioetan oinarritutako diseinu esperimental baten bitartez. Segidan, simulazio hauetatik lortutako balioekin ANOVA bat eginez, geometriaren aspektu ezberdinek daukaten eragina kuantifikatu dira (azpijan-angelua, jaulkitze-angelua eta ebaketa-sorbatzaren erradioa). Azterketa horrek egiaztatzen du erremintaren faktore geometriko esanguratsuen erremintaren higadurarentzako ebaketa-sorbatzaren erradioa dela, ondoren azpijan-angelua, eta, azkenik, jaulkitze-angelua.

Entsegu esperimentalak burutu dira, fresaketa periferikoan oinarrituta, ebaketa-sorbatzaren prestaketak zelako eragina izan dezakeen erremintaren errendimenduan aztertzeko. Arrastatze-prozesua jasan duten erremintek higadura gutxiago izan dute, eta euren bizitza erabilgarria areagotu egin da. Erremintaren sorbatzen erradioa $20\ \mu\text{m}$ -tara biribiltzen denean, % 25 inguru luzatzen da bizitza erabilgarria, artezketa bakarrik jasan duten erremintekin konparatzen badugu. Sorbatz prestaketak urradura uniformeagoa izatea egiten du, eta ebaketa-prozesuan zehar gertatzen den itsaspen-mekanismoa murrizten du, sorbatzaren mikrotopografiaren hobekuntza dela eta.

Beraz, lan honen emaitzetan oinarrituz, ebaketa sorbatzaren prestaketa kontuan izan beharreko parametroa da mekanizazio-prozesuak hobetzeko bidean. Hortaz, fabrikatzaileek parametro hau zehatz-mehatz kontrolatzeko gai izan behar dute, material bakoitzak eskatzen duen baldintzetarako.

7. ESKER ONAK

Egileok eskertu nahi dugu Euskal unibertsitate-sistemako ikerketa-taldeek jarduerak bultzatzeko diru-laguntzari (IT IT1337-19) eta MINECO PID2019-109340RB-I00 proiektuaren diru-laguntzari ere.

BIBLIOGRAFIA

- [1] LIU, L., ZHANG, C. *Nickel-Based Superalloys* in Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, (2020), <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.12093-4>.
- [2] HOSOKAWA A, UEDA T, ONISHI R, TANAKA R, FURUMOTO T, *Turning of difficult-to-machine materials with actively driven rotary tool* in. CIRP Annals - Manufacturing Technology 59, pp. 89-92, (2010).
- [3] CELIK, A., ALAGAC, M.S., TURAN, S., KARA, A., KARA, F. *Wear behavior of solid SiAlON milling tools during high speed milling of Inconel 718* in Wear 378-379, pp. 58-67, (2017).

- [4] BHATT, A, ATTIA, H, VARGAS, R, THOMSON, V., *Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718* in Tribology International 43, pp. 1113-1121, (2010).
- [5] HALIM, N.H.A, HARON, C.H.C, GHANI, J.A, AZHAR, M.F. *Tool wear and chip morphology in high-speed milling of hardened Inconel 718 under dry and cryogenic CO2 conditions* in Wear 426-427, pp. 1683-1690, (2019)
- [6] POKORNÝ, P., PATOPRSTÝ, B. VOPÁT, T. PETERKA, J. VOZÁR, M., SIMNA, V. *Cutting edge radius preparation* in Materials Today: Proceedings 22, pp. 212-218, (2020).
- [7] BERGS, T., SCHNEIDER, S.A.M., AMARA, M. AND GANSER, P. *Preparation of symmetrical and asymmetrical cutting edges on solid cutting tools using brushing tools with filament-integrated diamond grits*, Procedia CIRP 93, pp. 873-878, (2020).
- [8] PRIARONE, P.C., RIZZUTI, S., SETTIRENI, L., VERGNANO, G. *Effects of cutting angle, edge preparation, and nanostructured coating on milling performance of a gamma titanium aluminide* in Journal of Materials Processing Technology 212, pp. 2619-2628, (2012).
- [9] BOUZAKIS, K.D. *et. al.*, *Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials*, in CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 7, pp. 264-273, (2014).
- [10] XIE, W., FANG, F. *Effect of tool edge radius on material removal mechanism in atomic and close-to-atomic scale cutting* in Applied Surface Science 504, pp. 144-151, (2020).
- [11] PETERKA, J., VOZAR, M., VOPAT, T., POKORNY, P. BATOPRSTY, B. *Using multi-criteria analysis to evaluate the impact of drag-finishing technological parameters on the carbide tool radius* in Proceeding of Material Today 22 (2), pp. 205-211, (2020).
- [12] RODRIGUEZ, C.J.C. *Cutting edge preparation of precision tools by applying microabrasive jet machining and brushing*, Ph.D. thesis, Kassel University, 2009.
- [13] Scientific forming technologies corporation Deform 3D manual.
- [14] SATYNARAYANA, B., DILEEP, M., RUTHVIK, P., *Optimization of Controllable Turning Parameters for High Speed Dry Machining of Super Alloy: FEA and Experimentation* in Materials Today: Proceedings 4, pp. 2203-2212, (2017).
- [15] PEREIRA, O. URBKAIN, G., RODRÍGUEZ, A., FERNÁNDEZ-VALDIVIELSO, A., CALLEJA, A., AYESTA, I., LÓPEZ DE LACALLE, L.N., *Internal Cryolubrication approach for Inconel 718 milling* in Procedia Manufacturing 13, pp. 89-93 (2017).
- [16] FERNÁNDEZ-VALDIVIELSO, A., LÓPEZ DE LACALLE, L.N. URBKAIN, G., RODRÍGUEZ, A., *Detecting the key geometrical features and grades of carbide inserts for the turning of nickel-based alloys concerning surface integrity* in J. of Mech. Eng. Sci., in press. DOI: 10.1177/0954406215616145 (2015).
- [17] DENKENA, B., BIERMANN, B., BIERMANN, D., *Cutting edge geometries*, in CIRP Annals-Manufacturing Technology 63, pp. 631-653, (2014).

