Specifičnosti obrade odvajanjem čestica pri obradi legura nikla

Gradečak, Denis

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:553509

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

Sveučilište Sjever

Završni rad br. 345/PS/2020

Specifičnosti obrade odvajanjem čestica pri obradi legura nikla

Denis Gradečak, 2103/336

Varaždin, prosinac 2020. godine

Sveučilište Sjever

Odjel za Strojarstvo

Završni rad br. 345/PS/2020

Specifičnosti obrade odvajanjem čestica pri obradi legura nikla

Student

Denis Gradečak, 2103/336

Mentor

Matija Bušić, dr.sc.

Varaždin, prosinac 2020. godine

Sveučilište Sjever
Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3, HR–42000 Varaždin

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL: Odjel za strojarstvo

STUDIJ: preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK: Denis Gradečak | MATIČNI BROJ: 0336021200

DATUM: 20.11.2020. | KOLEGIJ: Alatni strojevi

NASLOV RADA: Specifičnosti obrade odvajanjem čestica pri obradi legura nikla

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU: The specifics in machining of nickel alloys

MENTOR: Dr. sc. Matija Bušić | ZVANJE: docent

ČLANOVI POVJERENSTVA:
1. doc.dr.sc. Zlatko Botak, predsjednik povjerenstva
2. doc.dr.sc. Matija Bušić, mentor, član
3. prof.dr.sc. Živko Kondić, član
4. doc.dr.sc. Tomislav Veliki, zamjenski član
5.

Zadatak završnog rada

BROJ: 345/PS/2020

OPIS:

U završnom radu pristupnik treba na temelju literaturnih podataka proučiti kemijska i mehanička svojstva te podjelu legura nikla koje se koriste u izradi strojarskih elemenata. Potrebno je navesti najčešće razloge za primjenu legura nikla. Detaljno proučiti postupke obrade odvajanjem čestica koji se koriste pri obradi legura nikla. Potrebno je ustanoviti vrste oblika trošenja reznih alata pri obradi odvajanjem čestica legura nikla. Potrebno je navesti prikladne parametre obrade za pojedine vrste legura nikla. Donijeti vlastiti zaključak o obradivosti postupcima odvajanja čestica pojedinih legura nikla.

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE SJEVER

ZADATAK URUČEN: 23. 11. 2020. | POTPIS MENTORA: M. Bušić

Predgovor

Zahvaljujem se mentoru dr.sc Matiji Bušiću na iskazanom povjerenju i korisnim savjetima prilikom izrade završnog rada.

Također bih se zahvalio svojoj obitelji i prijateljima koji su me podržavali od prvog dana studiranja pa sve do završetka studija.

Sažetak

U ovom radu govorit će se općenito o niklu, njegovim svojstvima, načinu proizvodnje te o legurama nikla koje se koriste u širokom rasponu u današnjoj civilizaciji. Pošto je legura nikla izrazito mnogo, u ovom radu obratit će se više pažnje na nekoliko legura nikla koje sam izdvojio zbog izuzetnih svojstava. Zbog svojstva niklovih legura, otežano se obrađuju te će u ovom radu biti obrađen i način obrade legura nikla odvajanjem čestica te problematika prilikom obrade, poput povećanog trošenja alata. Kako bi se osigurala sigurnost prilikom obrade, govorit će se o svim postupcima obrade odvajanjem čestica te će biti prikazani preporučeni parametri za svaku od obrada. Pošto su neke legure nikla otporne na visoke temperature, obratit će se pažnja na odabir alata prilikom tokarenja i/ili glodanja takvih legura, odnosno superlegura. Poznavanje sastava legura uvelike olakšava odabir alata i parametara kod obrade, zbog toga će se najviše pažnje obratiti upravo sastavu i svojstvima legura na bazi nikla.

Ključne riječi: nikal, legure nikla, superlegure

Abstract

This paper will discuss nickel in general, its properties, method of production, and nickel alloys that are widely used in today's civilization. Since nickel alloys are hugely numerous, in this final paper we will pay more attention to several nickel alloys that I have singled out due to their exceptional properties. Due to the properties of nickel alloys, they are difficult to machine. In this paper, the method of processing nickel alloys by separating particles and problems during processing, such as increased tool wear, will be discussed. To ensure safety during processing, all processing procedures by particle separation will be discussed and the recommended parameters for each of the treatments will be presented. Since some nickel alloys are resistant to high temperatures, attention will be paid to the choice of tools when turning and/or milling alloys or superalloys. Knowing the composition of alloys greatly facilitates the selection of tools and parameters during machining, attention will be paid to the composition and properties of nickel-based alloys.

Keywords: nickel, nickel alloys, superalloys

Popis korištenih kratica

N- nikal
Mg- magnezij
Ti- titanij
Cu- bakar
Al- aluminij
N- dušik
Cl- klor
Br- brom
Co- kobalt
Fe- željezo
V- vanadij
Nb- niobij
H- vodik
W- volfram
C- ugljik
TiAlN- titan aluminij nitrid
BUE- engl. „built up edge“

Sadržaj

1. Uvod....1
2. Nikal i legure nikla....1

2.1. Svojstva nikla....2
2.1.1. Dostupnost nikla....5
2.1.2. Proizvodnja i rudarenje nikla....5
2.1.3. Prva upotreba nikla....6
2.1.4. Područja primjene nikla....6
2.2. Legure nikla....7

3. Primjena legura nikla, proizvodi....14

3.1. Mehanička svojstva i karakteristike pojedinih legura na bazi nikla kod sobne temperature....15
3.1.1. Nikal 200....15
3.1.2. Nikal 201....16
3.1.3. Legura 400....16
3.1.4. Legura K-500....16
3.1.5. Legura 600....17
3.1.6. Legura 625....17
3.1.7. Legura 800....17

4. Postupci obrade odvajanjem čestica koji se koriste u obradi legura nikla....17

4.1. Obrada superlegura....21
4.2. Tokarenje legura nikla....22
4.3. Bušenje....23
4.4. Blanjanje....24
4.5. Provlačenje....24
4.6. Glodanje....25
4.7. Piljenje....25
4.8. Brušenje i završna obrada površine (honanje)....26

5. Trošenje reznih alata i problematika....27

5.1. Problematika prilikom obrade legure nikla (140-475 HB)....28
5.1.1. Obrada alatima od karbida....28
5.1.2. Obrada keramičkim alatima....33
5.1.3. Obrada PCBN alatom....33
5.2. Nove tehnologije alata za rezanje....33

6. Zaključak....36
7. Literatura....37

1. Uvod

Od otkrića nikla, 1751.godine, nikal postaje neizbježan element zbog svojih svojstava poput visoke tvrdoće, otpornosti na koroziju te otpornosti kod različitih atmosferskih uvjeta. Upravo zbog svojih svojstava, nekoliko godina kasnije počele su se razvijati legure nikla. Velikim dijelom, nikal se koristi za legiranje sa čelikom, u svrhu postizanja nehrđajućih čelika. Osim toga, legure nikla često se koriste u visokotemperaturnim postrojenjima, zbog toga što dobro podnosi visoke temperature. Zbog tog svojstva, legure nikla neizbježne su u turbinama zrakoplovnih motora, kao i u ispušnim ventilima kroz koje prolazi vrući ispuh iz motora. Također, zbog izvanredne otpornosti na koroziju, legure nikla često se koriste i za pojedine dijelove na brodovima.

Pošto se legure nikla odlikuju visokom čvrstoćom kod povišenih temperatura, nažalost to rezultira značajno otežanom obradom. Brojne legure na bazi nikla zahtijevaju posebnu pažnju prilikom obrade odvajanjem čestica. Ukoliko se ne obrati pažnja na krutost stroja prilikom obrade, parametre obrade, alate koji se koriste za obradu, mogućnosti za obradu legura na bazi nikla postaju mnogo manje. Odabir alata za obradu od posebne je važnosti jer postoje brojne pogreške koje se mogu javiti kod obrade, poput naljepljivanja strugotine na alat, povećanog trošenja zbog svojstava legura nikla, nepoželjnog zagrijavanja. Ne smije se niti zanemariti posmak, jer ukoliko je posmak malen, opet može doći do neželjenog zagrijavanja, što može prouzročiti očvrsnuće legure koja se obrađuje.

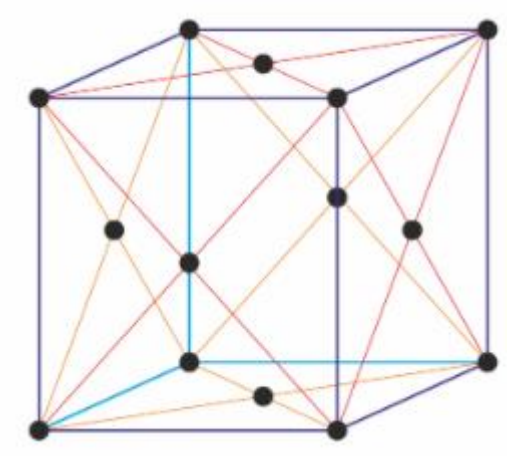
Hlađenje prilikom obrade odvajanjem čestica također je od velike važnosti. Strugotina nastala obradom, visoke je tvrdoće te se može urezati u površinu predmeta i oštetiti ju, tako da je bitna i geometrija alata, odnosno kut pod kojim se obrađuje. Kod obrade pojedinih legura, preporučljivo je koristiti rashladnu tekućinu pod povišenim tlakom, tako da tekućina osim što hladi, lomi strugotinu te time eliminira mogućnosti pojave problematike zbog strugotine kod obrade odvajanjem čestica [1].

2. Nikal i legure nikla

Nikal (Ni) je sjajan prirodni materijal srebrnasto-bijele boje. Peti je najučestaliji element na zemlji i javlja se u jezgri i kori. Jedan je od rijetkih materijala koji se koristi od samog početka civilizacije. Kemijske analize pokazuju prisutnost nikla u oružju, alatu te u kovanicama. Znanstvenik A.F. Cronstent, 1751. godine, nakon 5 godina istraživanja, utvrđuje da je „supertvrd“ metal pronađen u njemačkom rudniku novi element, te ga je nazvao niklom. Pet godina nakon toga, razvijena je prva legura na bazi nikla, te od tada počinje razvoj legura na bazi nikla [1]. Nikal, zajedno sa željezom, čest je element u meteoritima i može biti prisutan malim količinama u

biljkama, životinjama i morskoj vodi. Tehnički je zanimljiv materijal zbog svojih fizikalnih, mehaničkih i tehnoloških svojstava, otpornosti na koroziju i utjecaja na svojstva drugih metala [2,3].

Čisti nikal ima plošno centriranu kubičnu rešetku (FCC) i ona se ne mijenja toplinskom obradom, odnosno FCC kristalna struktura nikla ostaje nepromijenjena sve dok ne dosegne temperaturu tališta (slika 2.1.). Oko 50% svjetske proizvodnje nikla koristi se za metaluršku proizvodnju čelika, posebice nehrđajućeg čelika, a oko 25% nikla prerađuje se u metalurške proizvode od nikla i legure na bazi nikla.



Slika 2.1. Plošno centrirana kubična rešetka

2.1. Svojstva nikla

Nikal ima izvanredna fizička i kemijska svojstva, koja ga čine neophodnim u stotinama tisuća proizvoda. Njegova najveća upotreba je u legiranju- posebno s kromom i drugim metalima za proizvodnju nehrđajućih i toplinski otpornih čelika. Nikal ima visoku točku taljenja (1453 °C), otporan je na koroziju i oksidaciju, visoko je duktilan, magnetičan, ima katalitička svojstva, može biti u potpunosti recikliran [1, 3, 4]. Posjeduje jedno bitno svojstvo, a to je mogućnost legiranja s bakrom, kromom, željezom, kobaltom i molibdenom. Također, nikal ima visoku žilavost te posjeduje visoku čvrstoću na povišenim temperaturama. Dobro je otporan puzanju i dobro provodi toplinu i električnu energiju.

Tablica 2.1.1. Svojstva nikla

Svojstvo	Mjerna jedinica	Iznos
Gustoća	kg/m^3	8900
Talište	°C	1453
Modul elastičnosti	N/mm^2	210000
Toplinska rastezljivost	$10^{-6}/K$	13
Vlačna čvrstoća*	N/mm^2	380..500
Istezljivost*	%	2...60

*ovisno o stanju obrade

U tablici 2.1.1. navedena su fizikalna i mehanička svojstva nikla. Gospodarstveno najvažnije svojstvo čistog nikla je otpornost na koroziju. Bez nikla, kromirani čelični izradci ne bi bili otporni na galvansku koroziju. Krom ne može zaštititi čelik od korozije zbog toga što je sloj kroma nanesen na mikroskopski male pore i brazde. Galvanski nanešen sloj nikla nalazi se ispod sloja kroma, izrazito je snažan i nema nikakvih šupljina ili pukotina te zbog toga djelotvorno štiti čelik. Kada kromirani retrovizori ili stoperi vrata počinju korodirati, velika je vjerojatnost da je razlog tome nedovoljan nanos međusloja nikla [2,3].

Općenito je nikal zbog stvaranja zaštitnog sloja otporan na atmosferske utjecaje, postojan u morskoj vodi, neoksidirajućim hladnim kiselinama, lužnatim otopinama i rastaljenim jakim lužinama. Pri visokim temperaturama plinovi koji sadrže sumpor mogu prouzročiti stvaranje nisko taljivog eutektika Ni-NiS po granicama zrna zbog niske topljivosti sumpora u niklu. Pritom jači utjecaj imaju reducirajući plinovi u odnosu na oksidirajuće. Nataloženi nikal-sulfid uzrokuje pojavu površinskih pukotina pri hladnoj obradi deformiranje, kao i toplih pukotina kod zavarivanja i tople prerade. Također olakšava početak korozije u agresivnim sredinama zbog nepoželjnih primjesa po granicama zrna. Kod žarenja i zavarivanja nikal otapa veće količine kisika i vodika. Iznad 900°C nastaje po granicama zrna niklova oksida (NiO) koji otežava hladno oblikovanje deformiranjem slično kao i niklov sulfid (NiS) [2,3].

U usporedbi sa nehrđajućim čelicima, legure na bazi nikla otporne na koroziju pokazuju znatno bolja svojstva kod različitih okruženja poput morske vode i raznih otopina soli, kao i klorovodične, bromovodične i fluorovodične kiseline [5, 6].

Legure na bazi nikla posjeduju dobru otpornost od utjecaja morske vode. Istraživanje provedeno u Sjedinjenim Američkim Državama prikazuje otpornost na pukotinsku koroziju u morskoj vodi koja miruje te u morskoj vodi koja teče. Rezultati istraživanja vidljivi su u tablici 2.1.2 [5].

Ne postoji sistematičan klasifikacijski sustav za legure nikla, kao što je to slučaj kod legura aluminija i željeza. Zbog toga su legure na bazi nikla označene zaštićenim trgovačkim nazivima ili brojem kojeg određuje sam proizvođač. Na primjer „INCONEL 625“ je zaštićeni trgovački naziv proizvođača „Special Metals“ i „HASTELLOY C-22“ je zaštićeni trgovački naziv proizvođača „Haynes International“ koji se također nazivaju legura 625 i legura C-22. U tablici 2.1.2. navedene su legure nikla prema oznakama proizvođača [7].

Tablica 2.1.2. Utjecaj morske vode na pojedine legure nikla

	Morska voda- miruje		Morska voda- teče	
Oznaka legure prema proizvođaču [7]	Broj strana kod kojih se pojavila korozija u procjepu	Dubina nastale korozije (mm)	Broj strana kod kojih se pojavila korozija u procjepu	Dubina nastale korozije (mm)
346L	2	1,80	2	0.32
254SMO	2	1,25	2	0.01
625	2	0.11	2	<0.01
C-22	0	0	0	0
C-276	1	0.12	0	0
C-2000	0	0	0	0

Rezultati istraživanja provedeni u Sjevernoj Karolini, kod kojih se istraživala korozija u procjepu prikazani su u tablici 2.1.2. Testovi su provedeni u morskoj vodi koja miruje te u morskoj vodi koja teče. U oba slučaja temperatura morske vode iznosila je 29 °C ± 3°C. Dva uzorka svake legure bila su testirana u mirujućoj vodi 180 dana, i dva uzorka svake legure bila su testirana u tekućoj vodi 180 dana. Svaki uzorak imao je dvije strane kod kojih je moglo doći do korozije u procjepu. Nakon određenog vremena (180 dana) uzorci su se izvadili iz morske vode te se mjerila dubina nastale korozije. Korozija u procijepu naziv je za koroziju koja se pojavljuje u uskim površinskim pukotinama ili u procijepima konstrukcijske izvedbe materijala istih korozijskih potencijala. U procijepu dolazi do nakupljanja raznih nečistoća i vode, povećava se kiselost otopine te se smanjuje pH vrijednost i ujedno se povećava koncentracija agresivnih čimbenika. Zbog navedenog, dolazi do formiranja korozijskih članaka kod kojeg se metalna površina ponaša kao anoda i otapa se. Kao najčešći primjer ovog tipa korozije navodi se korozija na navoju vijka i matice [5, 2].

Hidrobromna kiselina jedna je od najsnažnijih mineralnih kiselina. Zbog visoke temperature vrelišta i jačeg reducirajućeg djelovanja, hidrobromna kiselina učinkovitije je otapalo za neke minerale u odnosu na klorovodičnu kiselinu. Jedna od primarnih funkcija bromovodične kiseline je proizvodnja anorganskih bromida, koji se primjenjuju u lijekovima i fotoosjetljivim emulzijama. Legure nikla sa visokim udiom molibdena posjeduju najveću otpornost na ovu i ostale vrste kiselina [5].

Osim navedenih svojstava, nikal se odlikuje i feromagnetskim svojstvima. S time povezana magnetostrikcija omogućuje njegovu primjenu u podvodnim ultrazvučnim dubinomjerima kao i ultrazvučnim generatorima u tehničkim uređajima za pranje. Magnetostrikcija je pojava kod koje dolazi do promjene volumena zbog djelovanja magnetskog polja. Currieva temperatura feromagnetičnog nikla varira između 358°C i 362°C ovisno o tome koliko je nikal čist. Nikal gubi feromagnetska svojstva iznad navedene temperature. Uz to, dolazi do nekontinuirane temperaturne ovisnosti brojnih mehaničkih, a i fizikalnih svojstava. FCC kristalna struktura ne mijenja se sve do tališta [2,3].

2.1.1. Dostupnost nikla

Trenutno se procjenjuje da na svijetu ima oko 300 milijuna tona nikla. Australija, Indonezija, Južna Afrika, Rusija i Kanada posjeduju više od 50% svjetskih resursa nikla. Poboljšana tehnologija u rudarstvu, topljenju i pročišćavanju, kao i povećani kapaciteti, također omogućuju da se rude nikla nižeg stupnja mogu obraditi. Smanjivanje stupnja rude nije nužno znak smanjenja resursa, nego refleksija inovacije i poboljšanja u rudarenju i u procesnoj tehnologiji [21].

Također se računa da su u dubokom moru značajna ležišta nikla. Rude magnezija, koji se nalaze na dnu dubokog mora, sadrže značajan udio nikla. Nedavne procjene ukazuju na više od 290 milijuna tona nikla sadržanih u takvim izvorima. Očekuje se da će razvoj dubokomorskih rudarskih tehnologija olakšati pristup tim resursima u budućnosti [6].

2.1.2. Proizvodnja i rudarenje nikla

Nikal se prirodno javlja uglavnom kao oksid, sulfid ili silikat [1, 6]. Neprerađeni, sirovi nikal kao komercijalni proizvod, pojavljuje se na tržištu u obliku elektrolitičkog nikla, zrnaca, feronikla, finog praha, ingota i prešanih briketa. Čistoća mu je oko 99%, a kao glavne primjese pojavljuju se bakar i ugljik. Postoji mnogo različitih ruda nikla koje zahtijevaju razne tehnike za vađenje nikla. Rude koje sadrže nikal se trenutno kopaju u više od 25 zemalja svijeta [6, 4].

2.1.3. Prva upotreba nikla

Prva upotreba nikla definira se kao pretvorba sirovog nikla u poluproizvode koji su osnova za krajnje proizvode koji sadrže nikal. U gotovo svim slučajevima ti se proizvodi za prvu uporabu podvrgavaju daljnjoj preradi prije nego što budu spremni za upotrebu [6].

2.1.4. Područja primjene nikla

Zbog svojih izvanrednih fizikalnih i mehaničkih svojstava, nikal se koristi u širokom rasponu sektora krajnje upotrebe (35% u inženjerstvu, 19% u proizvodnji metalnih dobara, 16% u transportu, 15% u građevini, 11% u elektronici te 4% u ostale svrhe) [6].

Sigurna i isplativa proizvodnja farmaceutskih spojeva, gnojiva, plastike, petrokemije i mnoštva druge robe oslanja se na nehrđajući čelik i legure nikla. Nehrđajući čelici, legure nikla i druge legure koje sadrže nikal intenzivno se koriste u kemijskoj, farmaceutskoj i petrokemijskoj industriji. Njihova otpornost na koroziju u vodenom, plinovitom i visoko temperaturnom okruženju, mehanička svojstva pri svim temperaturama od kriogenih do vrlo visokih i povremeno posebna fizička svojstva čine ih neprocjenjivima. Oblaganje niklom preferira se zbog specifičnih svojstava kao što su tvrdoća i otpornost na koroziju. Uz to, materijali koji sadrže nikal često se koriste kao katalizatori. Kemijska i petrokemijska industrija predstavljaju jedinstveni niz izazova, uključujući kriogene primjene, povišene temperature, vrlo korozivna okruženja, rukovanje visokim tlakom i čistoću gotovih proizvoda. Stoga nije iznenađujuće što su legure nikla široko prihvaćene u kemijskoj i petrokemijskoj industriji. Njihova sposobnost da izdrže visoko korozivne tvari u širokom rasponu temperatura, kao i impresivne mehaničke karakteristike pomažu u postizanju visoke razine potražnje. Zbog visoke otpornosti na koroziju, jednostavnog čišćenja, jednostavne proizvodnje, nehrđajući čelik sa sadržajem nikla široko se koristi u farmaceutskoj industriji [6].

Također, nikal je prisutan i kod pojedinih dijelova prijevoznih sredstava. Nikal se koristi u baterijama električnih vozila, legure nikla u turbinama mlaznih motora, dok se nehrđajući čelik koji sadrži nikal koristi za pojedine dijelove putničkih vlakova i podzemnih željeznica. Nikal osigurava da karoserije vlakova i kamiona budu snažne, izdržljive i može pomoći pri apsorbiranju udara prilikom sudara.

Prema Dr. Karen Scriveneru, preko 90% problema sa trajnošću betona kod nadvožnjaka povezano je sa korozijom u armaturnim šipkama. Upravo zbog toga, materijali koji sadrže nikal sve više se primjenjuju i u armaturi mostova i tunela [6, 2].

Sve se više vodi briga o održivosti pa se tako i mora znati više o materijalima koji doprinose održivoj budućnosti. Nikal je jedan od tih materijala. Nikal je element, ne može se stvoriti niti uništiti. Njegovi atributi- otpornost na koroziju, stabilnost pri visokim temperaturama, čvrstoća, žilavost, mogućnost recikliranja kao i katalička i elektromagnetska svojstva pomažu u postizanju održivosti [6].

Nikal je prirodni resurs koji se ne može potrošiti. Kao i mnogi drugi metali, nikal se u potpunosti može reciklirati. Može se ponovno i ponovno reciklirati bez gubitka kvalitete, što doprinosi modelu kružne ekonomije. Kako proizvodi koji sadrže nikal imaju vrijednost, postoji infrastruktura za njihovo prikupljanje i preradu. Prikupljanje, razvrstavanje, priprema, transport i upotreba starog željeza stvara značajno zapošljavanje i dodaje ekonomsku vrijednost [6, 1].

2.2. Legure nikla

FCC kristalna struktura glavno je obilježje legura na bazi nikla. Legure nikla žilavi su materijali. Potrebno ih je odžarivati tijekom prerade zbog toga što imaju veliku brzinu hladnog očvrsnuća. Otpornost na koroziju te otpornost pri povišenim temperaturama glavni su razlozi zbog čega je došlo do razvijanja legura nikla. Pošto se sve više zahtijevala izdržljivost materijala na visokim temperaturama u postrojenjima, razvijena je grupa materijala pod nazivom “superlegure”. Ova grupa materijala dobivena je legiranjem više elemenata, u svrhu postizanja materijala koji može zadržati veliku čvrstoću pri određenim temperaturnim intervalima. Pravljenje takve superlegure zahtjeva skupocjenu opremu te brojna testiranja, što rezultira izuzetnim svojstvima koja opravdavaju visoku cijenu ove superlegure. Mogućnost zadržavanja vlačne čvrstoće i otpornosti na puzanje do temperatura 0,7 T_t (T_t- temperatura taljenja u kelvinima) čini ove legure izvrsnima. Također, razvijaju se i legure za rad i kod visokih temperature [2, 3, 4].

Dvadesetih godina 20-tog stoljeća otkrivena su i druga dobra svojstva legura nikla, kao što su magnetska i električna svojstva, te mogućnost rastezanja i oblikovanja [2, 3].

Svaka legura ima svoju oznaku ovisnu o proizvođaču. U tablici 2.2.1. navedene su neke od legura, sa pripadajućim trgovačkim imenima.

Tablica 2.2.1. Trgovačke oznake legura na bazi nikla

Skupina	Trgovačko ime[1]
1.Nikal-bakar	Monel(Nicrorros)
Nikal-krom	Nimonic(Nicrofer)
2.Nikal-molibden-krom	Hastelloy(Nimofer)
3.Nikal-krom-željezo	Inconel(Nicrofer)
4.Nikal-krom+(A)[2] aluminij-titan+(B)[2] kobalt-volfram-molibden+(C)[2] ugljik	Različite vrste legura pod skupnim imenom "SUPERLEGURE"

[1]Nicorros, Nicrofer i Nimofer su oznake tvrtke VDM (Vereinigte Deutsche Metallwerke AG); Monel, Nimonic, Inconel i Incoloy su oznake tvrtke Inco Alloys; Hastelloy je oznaka tvrtke Haynes.

[2]A- precipitacijski očvrstljive, B- očvrstljive kristalima mješancima, C-očvrstljive karbidima.

"Superlegure" su višekomponentni sustavi na osnovi nikla i kobalta s visokim udjelima visoko taljivih elemenata molibdena i volframa, te titana i aluminija. Precipitacijom intermetalnih spojeva i/ili karbida raspoređenih u austenitnoj matrici i otapanjem legirnih elemenata u kristalima mješancima postižu se njihova mehanička svojstva. Kobalt ima najveći utjecaj na očvrsnuće kristalima mješancima, ali tek iznad 16%. Legirni elementi imaju utjecaja u precipitacijskom očvrsnuću:

-molibden stvaranjem Mo_6C,

-krom (uz otapanje u austenitnoj matrici) stvaranjem $Cr_{23}C_6$,

-aluminij i titan stvaranjem koherentnih ɣ´-faza (Ni_3Al) i nekoherentnih ɳ-faza (Ni_3Ti)

-niobij, tantal i vanadij stvaranjem karbida.

Lantanidi i magnezij dodaju se legurama u svrhu povišenja otpornosti na visokotemperaturnu koroziju, kao i manji udjeli bora i cirkonija koji otežavaju difuziju drugih elemenata po granicama zrna, što je također povoljno. Superlegure mogu kratko izdržati temperature do oko 1400°C te služe za izradu:

-zrakoplovnih i plinskih turbina,

-brodskih turbina

-lokomotivskih turbina

-uređaja u energanama

-postrojenja za proizvodnju nafte i sl.

U navedenim dijelovima, niklove superlegure slobodno se opterete do temperature 1100°C.

Viši stupanj legiranosti prouzročava nižu deformabilnost te otežava obradivost odvajanjem čestica pa se zbog toga legure s najvišim stupnjem legiranosti većinom lijevaju [2, 3].

Nikal se može lako legirati s mnogim drugim metalima, uključujući željezo, molibden i bakar. To omogućuje široku paletu legura koje pokazuju izvanrednu otpornost na koroziju, izuzetnu čvrstoću pri visokim temperaturama i druga jedinstvena svojstva poput pamćenja oblika i niskog koeficijenta širenja. FCC kristalna rešetka legura nikla omogućuje da kod niskih temperatura ne dolazi do naglog prijelaza iz žilavog područja u područje krhkog loma [6]. Legure nikla svrstane su u grupe za zavarivanje prema američkoj normi „ASME Pressure Vessel Section IX“, prema kojoj svaka skupina legura dobiva oznaku P te određen broj [8]. Brojevi su od 41 do 47 te označavaju sastav legure. Prikaz ove podjele prikazan je u tablici 2.2.2.

Tablica 2.2.2.Prikaz podjele nikla i legura nikla prema normi ASME Pressure Vessel Section IX [8]

P-broj	Osnovni metal
41	Visoki sadržaj nikla
42	Nikal, bakar (Monel)
43	Nikal, bakar, željezo (Inconel)
44	Nikal, molibden (Hastelloy B2, C22, C276, X)
45	Nikal, krom, željezo (Inconel)
46	Nikal, krom
47	Nikal, krom, volfram

Na sličan način, standardizirana podjela prema europskoj normi PD CEN ISO/TR 15608:2017 razvrstava vrste nikla i legura nikla u osam grupa također prema kemijskom sastavu, kao što je prikazano u tablici 2.2.3 [9].

Tablica 2.2.3. Prikaz podjele nikla i legura nikla prema normi PD CEN ISO/TR 15608:2017 [9]

Grupa	Osnovni metal
41	Čisti nikal
42	Nikal – bakar (Ni-Cu) legure, Ni ≥ 45%, Cu ≥ 10%
43	Nikal- krom (Ni-Cr-Fe-Mo) legure, Ni≥ 40%
44	Nikal – molibden (Ni-Mo) legure, Ni ≥ 45%, Mo ≤ 32%
45	Nikal - željezo - krom legure (Ni-Fe-Cr), Ni ≥ 30%
46	Nikal - krom - kobalt legure (Ni-Cr-Co), Ni ≥ 45%, Co ≥ 10%
47	Nikal - željezo - krom - bakar legure (Ni-Fe-Cr-Cu), Ni ≥ 45%
48	Nikal - željezo - kobalt legure (Ni-Fe-Co-Cr-Mo-Cu), 25% ≤ Ni≤ 45% i Fe ≥ 20%

Prema literaturnom izvoru [10], nikal i niklove legure mogu se podijeliti u 3 različite grupe označene slovima G, I i J. U grupu G spadaju korozijski postojane legure nikla, u grupu I legure nikla za rad pri povišenim temperaturama a u grupi J spadaju Ni, Ni-Cu i Ni-Mo legure. U tablici 2.2.4. prikazana je navedena podjela legura nikla te su navedene pojedine legure za svaku grupu prema europskoj normi PD CEN ISO/TR 15608:2017.

Tablica 2.2.4. Podjela nikla i legura nikla [10]

	Grupa	**Legura**	**Norma (ISO/TR 15608:2017)**
Korozijski postojane legure nikla	G-0	625	43
	G-1	C	43
	G-2	C-246	43
	G-3	C-22	43
	G-4	C-2000	43
	G-5	28	45
	G-6	G-30	42
	G-7	690	46
Legure nikla za rad pri povišenim temperaturama	I-0	800	48
	I-1	600	47
	I-2	45TM	46
	I-3	333	43
	I-4	617	46
	I-5	X	43
Ni,Ni-Cu iNi-Mo legure	J-0	200	41
	J-1	400	42
	J-2	Ni-Cu	42
	J-3	B	44

Kao što je vidljivo u tablici 2.2.4., korozijski postojane legure nikla spadaju u grupu označenu su slovom G. U navedenu skupinu spadaju:

-legura 625 (22Cr–62Ni–9Mo–3,5Nb),

- legura C (22Cr–62Ni–9Mo–3,5Nb),

- legura C-276 (0,01C–0,08Si–16Cr–57Ni–16Mo–4W),

- legura C-22 (0,01C–0,08Si–22Cr–56Ni–13Mo–3W),

- legura C-2000 (0,01C–0,08Si–23Cr–59Ni–16Mo–3Fe),
- legura 28 (28Cr–30Ni–3,5Mo–1,2Cu)
- legura G-30 (0,03C–0,8Si–30Cr–43Ni–5,5Mo–15Fe),
-legura 690 (0,03C–29Cr–61Ni).

Legure nikla za rad na povišenim temperaturama spadaju u grupu označenu slovom I. U navedenu skupinu spadaju:

-legura 800 (32Ni-21Cr-0.3~1.2（Al + Ti）−0.02C)
-legura 600 (72Ni-151Cr-8Fr-0.2Cu-0.02C)
-legura 45TM (26Cr–45Ni–2,50i)
-legura 333 (24Cr–44Ni–2.50Mo–2.50Co–2.50W–0.75Si),
-legura 617 (0.07C–22Cr–50Ni–9Mo–12Co-1Al–0.3Ti)
-legura X (22Cr–47Ni–9Mo–1.5Co–0.2Al–0.1Ti).

U skupinu označenu slovom J spadaju sljedeće legure:

-legura 200 (99Ni-0.15Fe-0.2Mn-0.1Si-0.1Cu-0.1C)
-legura 400 (63Ni-32Cu-1Fe-0.1C)
-Cu-Ni legura (55–90Cu– 45 –10Ni)
-legura B (68 Ni–28Mo).

Legure nikla i kroma karakterizirane su visokom korozijskom postojanošću kod normalnih ali i kod visokih temperatura, imaju dobru čvrstoću na visokim temperaturama te posjeduju visok električki otpor [6, 11].

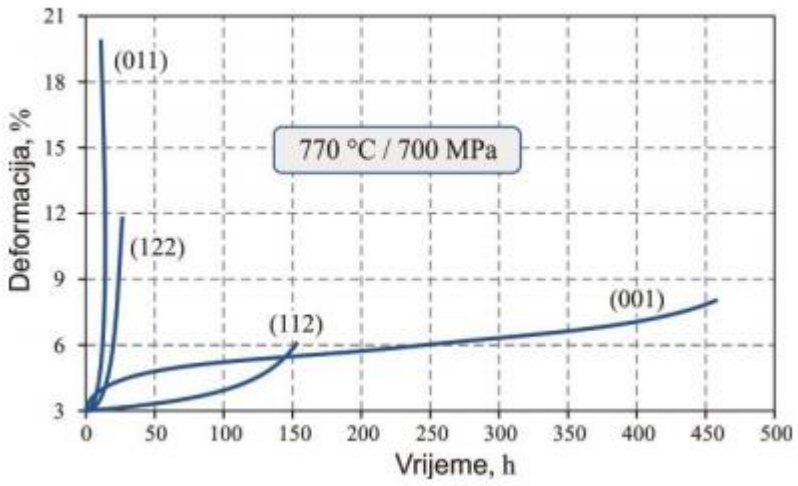
Ni-Fe-Cr legure dizajnirane su kako bi popunile "rupu" u performansama između nehrđajućih čelika s visokim udiom molibdena i nikal-krom-molibden legura. Zbog toga posjeduju dobru otpornost na pojave izazvane kloridom, kao što je rupičasta korozija, puknuća i koroziju u pukotinama. Dijele se u dvije grupe. Jedna grupa odlikuje se izvanrednom čvrstoćom pri visokim temperaturama te mogućnošću otpora oksidaciji, karburaciji i ostalim tipovima visoko temperaturne korozije. Najpoznatija legura iz ove skupine je legura 800 (UNS N08800) te 800H (UNS N08810). Druga grupa odlikuje se odličnom otpornošću na koroziju u specifičnim uvjetima. Vjerojatno najpoznatija legura iz ove skupine je legura 825 (UNS N08825) koja nudi izvrsnu otpornost na sumpornu kiselinu. Legura G-3 nudi izuzetnu otpornost na koroziju komercijalnih fosfornih kiselina, kao i mnoge složene otopine koje sadrže visoko oksidirajuće kiseline [11, 6].

Ni-Cr-Mo legure također su visoko otporne na koroziju. Posebno su otporne na nepredvidljive oblike korozije uzrokovane kloridima. Pružaju izuzetnu otpornost na reducirajuće kiseline poput klorovodične i sumporne. Među poznatijim legurama iz ove skupine su legura C-22 te legure C-2000 i 686 [12, 6].

Hastelloy X legura je nikal-krom-željezo-molibden legura koja se odlikuje visokom čvrstoćom i otpornošću na koroziju do temperature 1093 °C. Očvršćuje kristalima mješancima i zbog toga je namijenjena za rad pri nižim temperaturama. Kemijski sastav prikazan je u tablici 2.2.4. Također je utvrđeno da je ova legura izuzetno otporna napetosnoj koroziji u petrokemijskim primjenama. X legura pokazuje dobru duktilnost nakon duljeg izlaganja na temperaturama 650, 760 i 870 °C do 16 000 sati [13, 14, 15, 1].

Jednostavnost izrade- X legura ima odlična svojstva oblikovanja i zavarivanja. Može se kovati ili na bilo koji drugi način obraditi vrućim postupcima, pod uvjetom da se drži na temperaturi 1177 °C dovoljno dugo da se cijeli komad dovede na tu temperaturu. Kao posljedica dobre duktilnost, legura Hastelloy X također se lako obrađuje hladnom obradom. Sve vruće ili hladno obrađene dijelove treba žariti i brzo hladiti kako bi se postigla najbolja ravnoteža svojstava. Legura se može zavariti različitim tehnikama, uključujući plinski volframov luk, plinski metalni luk, zaštićeni metalni luk i otporno zavarivanje. Kovani oblici legure hastelloy X isporučuju se u toplinski obrađenom stanju, osim ako nije drugačije naznačeno. Hastelloy legura preporučuje se posebno za upotrebu u pećima, jer ima odličnu otpornost na oksidacijske, redukcijske i neutralne atmosfere. Jednako je pogodna za upotrebu u ispušnim cijevima mlaznih motora, komponentama dogorijevanja, lopaticama turbina i mlaznica i ostalim dijelovima zrakoplova. Lopatice turbina trebaju biti grubo zrnate ili monokristalne strukture da bi se poboljšala otpornost puzanju. Dodatno se otpornost puzanju monokristalnih lopatica može poboljšati usmjeravanjem kristalne rešetke tako da u smjeru najveće otpornosti rešetke djeluju najveća vlačna naprezanja. Na dijagramu 2.2.5 prikazano je puzanje hastelloy X superlegure za različite smjerove naprezanja monokristalne lopatice. [12, 13, 14, 1].

Dijagram 2.2.5. Puzanje hastelloy x superlegure za različite smjerove naprezanja monokristalne lopatice



Tablica 2.2.4. Kemijski sastav Hastelloy X legure [13]

Kemijski element	Količina (min ... max %)
Molibden	8.00...10.0
Krom	20.5...23.0
Željezo	17.0...20.0
Volfram	0.20...1.00
Kobalt	0.50...2.50
Ugljik	0.05...0.015
Silicij	0...1
Mangan	0...1
Bor	0...0.01
Fosfor	0...0.04

Hastelloy C-22 legura jedna je od poznatijih legura čije su glavne karakteristike otpornost na koroziju, otpornost na rupičastu koroziju, otpornost na ne-oksidirajuće kemikalije, puknuća i koroziju u pukotinama. Visok udio kroma osigurava visoku otpornost na oksidirajuće medije. Kao i ostale legure nikla, hastelloy C-22 legura je također vrlo duktilna, ima izrazito dobru zavarljivost te je lako ugrađena u industrijske dijelove. Jedno od glavnih svojstava ove legure je njihova otpornost na korozijsko razaranje izazvano kloridom. Uobičajno rješenje za procjenu otpornosti materijala na ovaj, krajnje destruktivan oblik napada, je zagrijavanje 45%-tne otopine magnezijeva klorida sa uzorkom savijenim obično u U oblik te se mjeri vrijeme potrebno da dođe do loma. Hastelloy C-22 legura dostupna je u obliku ploča, traka i limova, šipka, žica i cijevi. Sastav legure prikazan je u tablici ispod [12, 15].

Tablica 2.2.5. Kemijski sastav legure Hastelloy C-22 [12]

Kemijski element	Količina (%)
Nikal	56 max
Krom	22
Molibden	13
Željezo	3
Kobalt	2.5 max.
Volfram	3
Magnezij	0.5 max.
Silicij	0.08 max.
Ugljik	0.01 max
Vanadij	0.35 max.
Bakar	0.5 max.

Tablica 2.2.6. Test otpornosti legura nikla na koroziju [12]

Legura	Vrijeme do pojave pukotina
316L	2h
254SMO	24h
625	nema loma do 1008h
C-276	nema loma do 1008h
C-22	nema loma do 1008h

U tablici 2.2.6 prikazani su rezultati testa otpornost na korozijske pukotine izazvane kloridom. Prema provedenom testu, vidljivo je da su legure nikla (625, C-76, C-22) znatno otpornije ovom tipu napada, od austenitnih nehrđajućih čelika. Test se zaustavio nakon 1008 sati ispitivanja [12].

3. Primjena legura nikla, proizvodi

Legure nikla koriste se za široku paletu proizvoda, od kojih većina zahtjeva otpornost na koroziju i/ili otpornost na povišene temperature. Neki od tih proizvoda su:

-Zrakoplovne plinske turbine: diskovi, komore za izgaranje, vijci, kućišta, osovine, ispušni sustavi, lopatice, okretači potiska

-Parne turbine: vijci, lopatice

-Klipni motori: turbopunjač, ispušni ventili, umetci sjedala ventila

-Obrada metala: alati i matice za rad na visokim temperaturama

-Medicinske svrhe: stomatološki alati, implantati

-dijelovi za raketne motore

-Nuklearna postrojenja: pogonski mehanizmi, opruge, cijevi

3.1. Mehanička svojstva i karakteristike pojedinih legura na bazi nikla kod sobne temperature

Gotovo sve legure nikla sadrže i više nego dobru otpornost na koroziju, tako da će u daljnjem tekstu biti više govora o ostalim svojstvima i primjenama legura nikla. Pošto je legura nikla izrazito puno, razradit će se svojstva pojedinih legura [2].

U tablici 3.1.1. prikazana su mehanička svojstva legura nikla.

Tablica 3.1.1. Mehanička svojstva legura nikla

Oznaka legure	Vlačna čvrstoća (Mpa)	Modul elastičnosti (Gpa)	Tvrdoća (HB)
Nikal 200	462	204	109
Nikal 201	403	30	129
Nikal 400	550	180	110-150
Legura K-500	1100	180	300
Legura 600	655	207	75
Legura 625	930	207	190
Legura X	785	196	89
Legura 800	600	193	138

3.1.1. Nikal 200

Komercijalno čisti kovani nikl sa dobrim mehaničkim svojstvima. Također, ima i iznimnu otpornost na kaustične lužine pri različitim koncentracijama i temperaturama. Legura ima nizak udio plina, te visoku toplinsku i električnu vodljivost. Lako se može toplo i hladno oblikovati. Za toplo oblikovanje preporučuje se raspon temperatura od 650°C do 1230°C [2, 15].

3.1.2. Nikal 201

Također komercijalno čisto kovani nikal sa sličnim svojstvima leguri nikla 200, ali sa nižim udjelom ugljika. Na sobnoj temperaturi otporan je na kiseline i lužine te suhe plinove. Također je otporan na mineralne kiseline, ovisno o temperaturi i koncentraciji otopine. Zbog manjeg udjela ugljika u odnosu na nikal 200, sprječava se krhkost granularnim ugljikom na temperaturama iznad 315°C. Smanjen udio ugljika također smanjuje i tvrdoću [2, 15].

3.1.3. Legura 400

Nikal-Bakar legure često se nazivaju „MONEL“ prema proizvođaču. Postoji više vrsta Monel legura, a neke od poznatijih su: Monel 400, Monel 401, Monel 450, Monel K-500. Legura Monel 400 posjeduje visoku čvrstoću i izvrsnu otpornost na koroziju u širokom spektru medija uključujući morsku vodu, sumporu kiselinu, lužine. Ova legura postoji u više od 400 varijanti, od kojih svaka varijanta ima zasebna svojstva prilagođena potrebama upotrebe. Legiranjem s bakrom povećava se otpornost na različite agresivne medije poput otopina koje sadrže sumpor. Iz tog razloga imaju visoku otpornost na koroziju, posebno na djelovanje slane vode i određenih kiselina [2, 15, 16].

Moneli mogu biti osjetljivi na rupičastu koroziju (engl „pitting“) u mirujućoj vodi. Zbog toga preporuča se da se legure Monela primjenjuju za izradu dijelova konstrukcija gdje postoji strujanje medija jer se uz strujanje bolje održava pasivnost [17]

3.1.4. Legura K-500

Legura nikla i bakra nastala precipitacijskim očvrsnućem koja posjeduje korozijsku otpornost legure 400, ali bolju čvrstoću i tvrdoću. Osim nikla i bakra, sadrži još mnogo legirnih elemenata u svrhu postizanja željenih svojstava. Ova legura ima izvrsnu otpornost na koroziju i odlična mehanička svojstva u širokom rasponu temperatura. Odlikuje se povišenom čvrstoćom i tvrdoćom do 650°C. Talište ove legure je na 1338°C. Poboljšana svojstva ove legure postižu se dodavanjem aluminija i titana bazi od nikla i bakra te grijanjem u kontroliranim uvjetima tako da se aluminij i titan precipitiraju u matrici. Koristi se za osovine pumpi, alate za bušotine, opruge, obloge ventila, vratila brodskih propelera [16, 15, 2]. Legura Monel K-500 ima najvišu vrijednost vlačne čvrstoće u odnosu na ostale legure iz Monel skupine.

3.1.5. Legura 600

Legure nikla i kroma često se nazivaju „INCONEL“ prema proizvođaču. Spadaju u skupinu korozijski postojanih i vatrootpornih legura nikla. Najpoznatije legure iz ove skupine su: Inconel 600, Inconel 601, Inconel 625, Inconel 718 i Inconel X-750. Legura Inconel 600 je legura s dobrom otpornošću na oksidaciju pri visokim temperaturama. Ova legura je idealna za povišene temperature, odnosno visoko je otporna na koroziju, posjeduje visoku čvrstoću, izdržljiva je, stabilna kod visokih temperatura. Talište ove legure je na 1399°C. Upravo zbog tih navedenih svojstava, pogodna je za izradu komponenata za peći, u nuklearnom inženjerstvu, izmjenjivačima topline. Osim toga, koristi se i obradi hrane i kemikalija [16, 2].

3.1.6. Legura 625

Legura nikla-kroma-molibdena sa dodatkom niobija koji zajedno s molibdenom učvršćuje matricu legure i time pružaju visoku čvrstoću bez dodatne toplinske obrade. Ova legura posebno je otporna na rupičastu i pukotinsku koroziju. Koristi se kod opreme za kemijske procese u kojima se koriste miješane kiseline, nuklearnim reaktorima, zrakoplovnom inženjerstvu [1, 16, 15].

3.1.7. Legura 800

Željezo-nikal-krom legura sa dobrom čvrstoćom i odličnom otpornošću na oksidaciju i karburizaciju u visoko temperaturnim atmosferama. Legura održava stabilnu, austenitnu strukturu tijekom duljeg izlaganja visokim temperaturama. Legura je žarena na temperaturnom rasponu od 983°C do 1038°C. Legura je predstavljena 1950-tih godina. Nastala je zbog potrebe toplinske otpornosti te korozijske otpornosti sa niskim udjelom ugljika jer je u to doba nikal bio određen strateškim materijalom. Proteklih 40 godina koristi se u širokom rasponu upravo zbog svojstava otpornosti pri visokim temperaturama te otpornosti na koroziju, kao i otpornosti na oksidaciju. Koristi se za procesne cjevovode, toplinske izmjenjivače, opremu za rasplinjavanje [1, 13, 10].

4. Postupci obrade odvajanjem čestica koji se koriste u obradi legura nikla

Obrada nikla i legura na bazi nikla može se lako izvršiti pod uvjetom da su temeljni principi koji utječu na njihovu obradivost uzeti u obzir. U usporedbi s ostalim materijalima, najznačajnija

karakteristika legura na bazi nikla je ta da su obično mnogo jači kod reznih temperatura alata. Zbog toga snažni strojevi daju najbolje rezultate i često su neophodni za uspješnu obradu. Alati za obradu legura nikla moraju biti odabrani na način da se smanje rezne sile, rubovi alata moraju biti što čvršći i moraju moći izdržati što više temperature. Uz uvažavanje osnovnih svojstava samih legura nikla, od presudne je važnosti, za uspješnu obradu, razumijevanje osnovnih principa koji dolaze u obzir u vezi s određenom legurom i metodom kojom se vrši obrada. Proteklih godina postignut je niz napredaka povezanih sa reznim alatima i primjenjivim metodama za obradu legura nikla. Legure nikla prvenstveno se koriste u primjenama koja uključuju dobru otpornost na koroziju, visoku čvrstoću i otpornost na oksidaciju pri povišenim temperaturama. Postoji puno legura koje mogu zadovoljiti ove zahtjeve, ali sve one imaju neka zajednička svojstva koja u različitoj mjeri utječu na njihovu obradivost. Austenitna struktura daje svojstva visoke duktilnost te očvrsnuća plastičnom deformacijom, što ima za posljedicu otežanu obradu odvajanjem čestica. Odnosno, što je tvrdoća materijala veća, obradivost odvajanjem čestica je teža zbog toga što tvrdoća utječe na sile rezanja, povećanje temperature i naprezanja na reznoj oštrici. Legure namijenjene za rad na visokim temperaturama ostaju snažne prilikom obrade te postoji mogućnost formiranja naljepaka, poteškoće s lomom odvojene čestice te loša kvaliteta obrade. Toplinska vodljivost legura nikla značajno je manja u odnosu na čelik te brojne druge materijale. Starenjem legure nikla također sadrže abrazivne čestice titana i aluminija. Pošto je legure nikla teže obrađivati nego čelik, velika pažnja mora se obratiti na utjecaje svih legirnih elemenata i čimbenika prilikom obrade. To je ključ za uspješnu obradu legura nikla. U tablici 4.1. prikazana je podjela legura nikla s obzirom na obradivost te su ujedno prikazani kemijski sastavi pojedine legure [18, 12, 19].

Tablica 4.1. Kemijski sastav legura nikla [18]

Grupa	Legura	Ni	Cu	Fe	Cr	Mo	Co	Al	Ti	Nb
A	200	99.6								
	201	99.6								
	205	99.6								
	212	97								
	222	99.5								
B	400	66.5	31.5							
	401	42.5	55.5	0.3						
	450	30	68	0.7						
	36	36	64	64						
	K	29.5	53	53			17			
	MS 250	19		76		3			1.4	
C	600	76		8	15.5					
	690	61		9	29					
	601	60.5		14	23			1.4		

	825	42	2.2	30	21.5	3			1	
	DS	37		41	18					
	330	35.5		44	18.5					
	20	35	3.5	37	20	2.5				0.6
	800	32.5		46	21					
	800HT	32.5		46	21			Al+Ti 1.0		
	802	32.5		46	21					
	270	99.98								
	K-500	65.5	29.5	1				2.7	0.6	
	75	80			19.5					
	86	64			25	10				
D-1	301	94						4.4	0.6	
	925	42	2.2	32	21	3		0.3	2.1	
	902	42.5		49	5.3			0.5	2.4	
D-2	301 (očvrsnuta)	94						4.4	0.6	
	K-500 (očvrsnuta)	65.5	29.5	1				2.7	0.6	
	902 (očvrsnuta)	42.5		49	5.3			0.5	2.4	
	81	67			30			0.9	1.8	
	G-3	44	2	19.5	22	7	2.5			0.3
	HX	47.5		18.5	21.8	9	1.5			
	625	61		2.5	21.5	9				3.6
	925 (očvrsnuta)	42	2.2	32	21	3		0.3	2.1	
	716	57.5			19.2	8.2			1.4	3.4
	725	57		9	20.8	8.2			1.4	3.4
	MA 754	77.5		1	20			0.3	0.5	
	80A	76			19.5			1.4	2.4	
	718	54		18.5	18	3				5.1
	PE11	39		34	18	5.2		0.8	2.3	
	706	42		36.5	16				1.8	3.1
	PE16	43.5			16.5	3.3		1.2	1.2	
	C-276	57		5.5	15.5	16	1.2			
	751	73		7	15.5			1.1	2.5	1
	X-750	73		7	15.5			0.7	2.5	1
	901	42.5		34	12.5	5.8			2.9	
	617	52		1.5	22	9	12.5	1.2		
	263	51		36	20	5.8	20	0.5	2.2	
	105	54			15	5	20	4.7	1.3	
	90	60			19		16.5	1.5	2.5	
	PK50	58			19.5	4.25	13.5	1.4	3	
	115	60			14.2	3.2	13.2	4.9	3.8	
	B-2	66		1	0.5	27.5		0.1	0.1	
	903	38		41.5			15	0.9	1.4	3
	907	38.4		42			13	0	1.5	4.7
	909	38.4		42			13	0	1.5	4.7
E	R-405	66.5	31.5	1.2						

Skupina A iz tablice 4.1. je skupina legura sa najnižom čvrstoćom i očvrsnućem prilikom obrade od svih niklovih legura. Pokazuju "gumeno" ponašanje kod užarenog stanja; mogu očvrsnuti samo kod hladnog oblikovanja, što rezultira najboljim uvjetima za obradu.

Skupina B postiže veću snagu hladnim oblikovanjem nego skupina A, što ih čini malo teže obradivima. Najbolja obradivost postiže se hladnim vučenjem ili zagrijavanjem te hlađenjem u svrhu uklanjanja zaostalih naprezanja. Prilikom uklanjanja zaostalih naprezanja, potrebno je paziti da ne dođe do dodatnog ne-željenog povišenja tvrdoće materijala.

Skupina C ima slična mehanička svojstva kao i austenitni nehrđajući čelici. Razlika je u tome što austenitni čelici imaju manju čvrstoću na povišenim temperaturama. Najlakše ih je obrađivati u vučenom stanju, kao i legure iz skupine B.

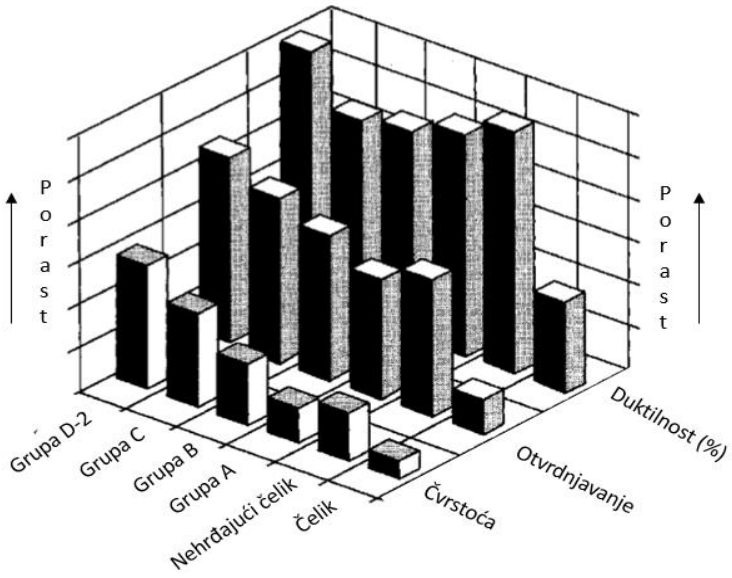
Skupina D-1 relativno je jednostavna za obradu.

Legure iz skupine D-2 sadrže legure iz skupine D-1, ali precipitacijski očvrsnute te su zbog toga teško obradive. Osim tih legura, sadrže i druge precipitacijski očvrsnute i žarene legure od kojih su neke izrazito visoke čvrstoće. Te legure sadrže ojačala i abrazivne precipitate, što ih čini teško obradivima. Te legure trebaju biti grubo obrađene u užarenom stanju, zatim fino obrađene nakon starenja legure.

Legura u skupini E je specijalna legura 400 dizajnirana da bude jednostavno obradiva te visoko produktivna.

Zbog lakšeg predočenja koliko su legura nikle iz pojedinih skupina teže obradive od čelika i nehrđajućeg čelika, poslužit ćemo se dijagramom. Na dijagramu je vidljivo da od čelika, nehrđajućeg čelika pa do ranije objašnjenih kategorija niklovih legura, duktilnost, otpornost materijala na deformiranje pri povišenim temperaturama i otvrdnjavanje prilikom plastične deformacije rastu, odnosno otežava se obradivost te se mijenjaju uvjeti obrade [18, 20].

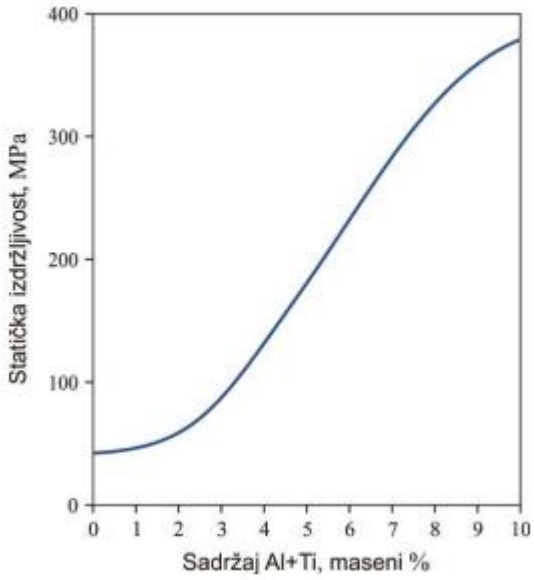
Dijagram 4.1.2 Obradivost legura nikla i čelika.



4.1. Obrada superlegura

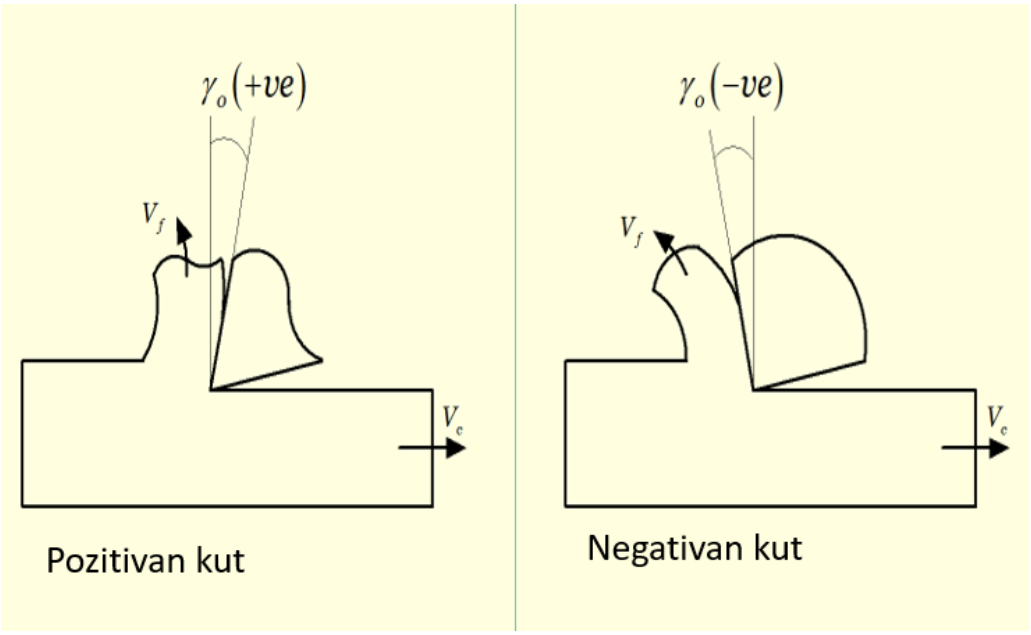
Superlegure, znane kao i legure otporne na toplinu, su materijali koji mogu biti obradivi na temperaturama koje prelaze 540°C. Neke superlegure mogu podnijeti i temperature do 85% Tt (Tt-točka taljenja) [5]. Nijedna druga legura nema bolju kombinaciju otpornosti pri visokim temperaturama, otpornosti na oksidaciju te otpor puzanju. Legure nikla pripadaju skupini najsloženijih superlegura koje se rabe za toplinski izrazito opterećene dijelove. One mogu očvrsnuti kristalima mješancima u nižim radnim temperaturama ili precipitacijom intermetalnih faza u visokotemperaturnim primjenama. Sadrže minimalno 50% Nikla. Najvažniji precipitat u niklovim superlegurama koje sadrže Ti i Al je γ' faza koja se izlučuje u austenitnoj γ niklovoj matrici. Čvrstoća i statička izdržljivost ovih legura rastu s povećanjem sadržaja aluminija i titana koji pospješuju izlučivanje γ' faze, slika 4.1.1 [22]. Zbog tih karakteristika, superlegure su široko upotrebljive u dijelovima avionskih motora te u dijelovima plinskih turbina. Nijedan materijal nije savršen. Mana superlegura je loša obradivost. Produktivnost obrade superlegura je mala, jer brzine reznih alata moraju biti smanjene zbog svojstava superlegura. Jedan od glavnih izazova kod obrade je visoka čvrstoća superlegura na bazi nikla, što uzrokuje veće sile rezanja, što uzrokuje više temperature na vrhu alata u odnosu na obradu legura čelika te time dolazi i do smanjenja vijeka trajanja alata. Prilikom obrade odvajanja čestica, formira se tvrda i kontinuirana strugotina koja također može ometati proces obrade odvajanjem čestica, tako da je potrebno kontrolirati geometriju strugotine [21, 22, 23].

Dijagram 4.1.1. Utjecaj sadržaja aluminija i titana na statičku izdržljivost Ni- superlegura [23]



4.2. Tokarenje legura nikla

Niklove legure mogu se tokariti sa konvencionalnim alatima za tokarenje, ali programer mora znati da produktivnost i ekonomičnost značajno ovise o optimizaciji stroja, alata i parametara rezanja. Zbog relativno niskog ograničenja brzine rezanja, brzorezni alati trebali bi se uzimati u obzir samo gdje je potrebna visoka žilavost, kao u slučaju prekinutih rezova ili gdje je potrebna vrlo fina površina materijala. Tokarenje sa alatom od brzoreznog čelika može osigurati razumnu produktivnost kod mekših legura, poput legura iz skupine A i B ranije navedenih. Sa alatom od brzoreznog čelika dobra prednost može se postići pozitivnim kutovima obrade kako bi se olakšalo rezanje i smanjilo otvrdnjivanje prilikom obrade [18, 1].



Slika 4.2.1. Pozitivan i negativan kut obrade

Alati od karbida trebali bi se uzeti u obzir za obradu jačih legura, poput legura iz skupine B te ostalim skupinama nakon skupine B. Ključ uspješne upotrebe ovih alata nalazi se u tome da se koriste snažni strojevi da se smanje vibracije prilikom obrade što je više moguće. Zbog visoke čvrstoće legura nikla, veliku pozornost treba obratiti na čimbenike koji utječu na čvrstoću ruba alata i radijus vrha alata [18].

4.3. Bušenje

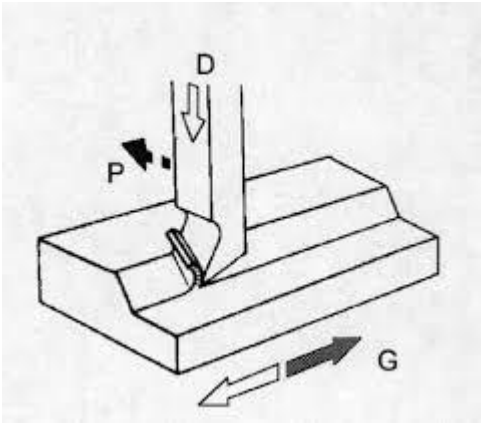
Za uspješno bušenje legura nikla, najvažnije je osigurati pozitivno rezanje i minimizirati zadržavanje kako bi se izbjeglo otvrdnjavanje materijala koji se buši. Zadovoljavajući rezultati mogu se dobiti korištenjem karbidnih spiralnih svrdla. Postrojenje treba biti kruto te se trebaju koristiti kratka svrdla ili kratke vodilice. Kut vrha svrdla obično je 118°. Svrdla korištena za brušenje moraju biti redovito naoštrena. Parametri bušenja prikazani su u tablici 4.3.1., posebno za svaki tip niklove legure [18].

Tablica 4.3.1. Parametri bušenja legura nikla [18]

Grupa legure	Promjer svrdla (mm)	Brzina bušenja (m/min)	Posmak svrdla (mm/okr)
A	<1.6	17-23	0.01-0.03
B	1.6-3.2	14-17	0.03-0.05
C	3.2-4.8	8-11	0.05-0.10
D-1	6.4-7.9	6-9	0.08-0.13
D-2	9.5-11	3-4	0.10-0.18
D-2(očvrsnut)	13-17	2-3	0.15-0.25
E	19-25	15-21	0.20-0.38

4.4. Blanjanje

Alati i uvjeti kod kojih se vrši blanjanje slični su onima koji se koriste kod tokarenja. Razlika je u tome što se blanjanje izvodi kod manjih brzina (80-85% brzine). Alat se prilikom obrade giba paralelno s ravninom obrađivanog predmeta, kao što je prikazano na slici 4.4.1. Kod korištenja alata od brzoreznog čelika, najbitniji je gornji kut nagiba; mora biti ekstremno pozitivan u svrhu postizanja dobre rezljivosti. Strugotina nastala kombinacijom prikladnog bočnog kuta (4-6°) i gornjeg kuta nagiba (10-20°) savija se prije alata i lomi se kada udari predmet [18].



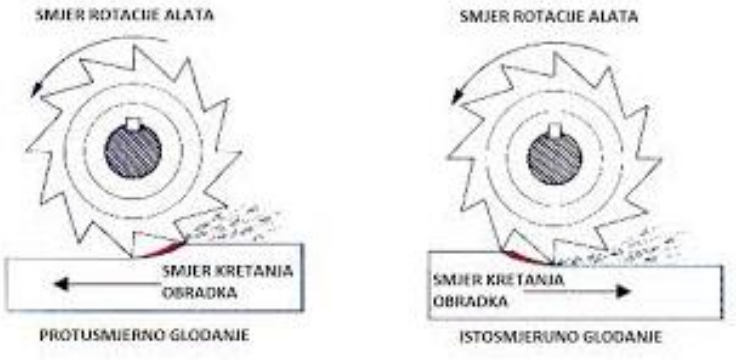
Slika 4.4.1. Blanjanje

4.5. Provlačenje

Kod provlačenja niklovih legura, najbitnije je održavanje zuba oštrim. Treba ih često brusiti i polirati, ili honati nakon brušenja. Također, neophodno je da mazivo teče do reznog dijela zuba u cilju produljenja vijeka trajanja zuba. Kao mazivo preporuča se sumporeno mineralno ulje. Za legure nikla, dobro dizajnirane provlačilice imaju posmak od 0.005 - 0.10 mm [18, 1].

4.6. Glodanje

Kod glodanja legura nikla, ukoliko se žele postići optimalni rezultati, potrebno je pažljivo odrediti parametre obrade poput promjera glodala, broja zubi na glodalu, posmak po zubu, brzine rezanja. Faktori poput snage glodalice i krutosti glodalice izrazito su bitni zbog visoke čvrstoće i očvrsnuća legura nikla. Preferira se istosmjerno glodanje zbog toga što rezni rub ulazi u komad ispod očvrsnutog sloja. Istosmjerno glodanja je glodanje kod kojeg je rotacija alata u istom smjeru kao i smjer posmaka (slika 4.6.1.). Općenito, poželjno je glodati pod pozitivnim kutom glodala. Glodala se moraju održavati oštrima te se preporuča izbjegavati sporije posmake jer može doći do prevelikog formiranja očvrsnutog sloja, što uvelike otežava obradu [21, 18].



Slika 4.6.1. Istosmjerno i protusmjerno glodanje

4.7. Piljenje

Kružne i tračne pile su prikladne za piljenje svih vrsta legura osim grupe D-2. Grupa legura iz skupine D-2 teško se režu tim pilama. Prilikom piljenja također se mora koristiti primjena pozitivnog pritiska zbog toga da zubi pile konstantno ulaze u materijal i obrađuju ga. Zubovi pile obično su čelični, a prilikom obrade tvrđih legura nikla, njihovi zubi nerijetko su i od posebno tvrde kovine ili drugog materijala, toplinski obrađenog. List pile za obradu legura nikla prikazan je na slici 4.7.1.

Cirkularna pila sa velikim brojem okretaja koristi se do materijala debljine 25 mm. U tablici 4.7.1. prikazani su parametri piljenja cirkularnom pilom za legure nikla, ovisno o grupi legure.

Tablica 4.7.1. Parametri piljenja [18]

Grupa legure	Brzina piljenja(m/min)	Debljina materijala(mm)
A	3.1-5.5	1
B	3.1-5.5	5
C	1.5-3.7	13
D-1	1.8	15

Suho se mogu piliti legure nikla do debljine 25 mm, dok se za veće debljine preporuča hlađenje materijala [18].



Slika 4.7.1. Zub pile za legure nikla

4.8. Brušenje i završna obrada površine (honanje)

Brušenje legura nikla vrši se postupcima sličnima onima koji se koriste za čelik. Brušenje se može provesti i na teško obradivim legurama (legure iz skupine D-1 i D-2) i zadovoljavajuća je alternativa završne obrade. Brušenje se izvodi u mokrom stanju da se izbjegne zagrijavanje površine materijala koji se brusi, što može rezultirati metalurškim oštećenjima površine. Za podmazivanje koristi se mješavina vode i ulja u omjeru 50:1. Silikon-karbid brusne ploče (slika 4.8.1) daju najbolje rezultate za brušenje legura iz skupine A, B, D-1 i E, dok se aluminij-oksid ploče (slika 4.8.1.) koriste za legure iz skupine C i D-2. U svim slučajevima pritisak kod brušenja treba biti dovoljan da uzrokuje lagano trošenje brusne ploče. Ukoliko bi se koristio prevelik, moglo bi doći do neželjenog zagrijavanja što može prouzročiti promjenom geometrije komada koji se brusi [18].

Honanje je završna obrada, koja se provodi kod malih brzina i sila. Pritisak kod honanja legura nikla treba biti oko 3100 kPa [18].



Slika 4.8.1. Silikon-Karbid brusna ploča



Slika 4.8.2. Aluminij-oksid brusna ploča

5. Trošenje reznih alata i problematika

Postoji velik broj legura nikla, svaka sa svojim univerzalnim svojstvima. Neke se velikom većinom sastoje od nikla, te su one ujedno najmekanije od legura. Postaju vrlo „gumenaste“ prilikom obrade odvajanjem čestica. Druge legure, poput Ni-Cu (nikal-bakar) i Ni-Fe (nikal-željezo) , imaju veću čvrstoću te su obično hladno vučene jer ne mogu biti očvrsnute toplinskom obradom. Ranije spomenute, legure koje sadrže titan i/ili aluminij dodaju novi stupanj teškoće obrade. Prvi korak je identificirati vrstu niklove legure koja se obrađuje tako da se mogu pravilno odabrati prikladni alati za rezanje, CNC stroj i razrada plana obrade. Generalno gledajući, legure na bazi nikla teže očvrsnuću prilikom obrade/rezanja. To znači da metal oko reznog alata može postati znatno teže obradiv u nastavku obrade. U tome se vidi važnost odabira alata prilikom obrade. Od izuzetne je važnosti odabrati alat prikladne geometrije i tvrdoće. Ne smije se niti zaboraviti učestalo oštrenje alata. Kao što je i ranije navedeno, od velike je važnosti i odabir

prikladnog CNC stroja. Stroj mora imati kruto vreteno i dršku alata, da se smanje vibracije prilikom obrade što je to više moguće [22, 21].

5.1. Problematika prilikom obrade legure nikla (140-475 HB)

Tvrdoća brojnih legura na bazi nikla značajno raste nakon toplinske obrade. Potrebno je izbjegavati obradu u fazi gdje je legura najjača, odnosno obrada se mora izvoditi u što mekanijem stanju legure. Preporuča se upotreba pozitivnog kuta kod obrade kada god je to moguće. Geometrija pozitivnog kuta kod obrade minimalizira stvrdnjavanje prilikom obrade uklanjanjem odvojenog materijala (strugotine) od radnog predmeta na efektivan način u svrhu minimiziranja naljepljivanja na rezni alat. Naljepljivanje odvojenog materijala otežava daljnje rezanje te dovodi do oštećenja rezne oštrice. Naljepljivanje je moguće smanjiti povećanjem brzine obrade ili brušenjem ruba reznog alata (oštrice). Tupi ili nepropisno brušeni rubovi povećavaju sile rezanja tijekom obrade, uzrokovajući naljepljivanje materijala na alat te kidanje radnog komada. Međutim, važno je napomenuti da su oštri rubovi lomljiviji i osjetljiviji na utjecaje odvojenog materijala kod obrade odvajanjem čestica, stoga se brušeni rubovi preporučaju za većinu operacija grube obrade gdje je zabrinutost zbog hrapavosti površine mala. Oštri rubovi se koriste za završne operacije. Korištenje velikog radijusa vrha alata gdje god to geometrija predmeta koji se obrađuje ne sprječava, može ojačati rezni rub [22]. Pojava žljeba ili udubine na reznom alatu može nastati zbog pogrešnog kuta prilikom obrade. Povećanjem prilaznog kuta povišena temperatura i pritisak raspoređuju se na veću površinu alata te se time smanjuje mogućnost pojave žljebova na alatu. Moguće je i koristiti alat veće tvrdoće kod tokarenja, proizvođaća Kennametal, oznaka KC5525 i KY4300. KC5525 oznaka je za napredni PVD TiAlN presvučen finozrnati volframov karbid koji sadrži 10% kobalta, proizvođaća Kennametal. KY4300 oznaka je za keramički alat, također proizvođaća Kennametal. Dubina rezanja mora biti veća od debljine očvrsnutog sloja materijala za minimalno 0,12 mm. Naljepljivanje strugotine na materijal može se spriječiti povećanjem brzine rezanja, korištenjem pozitivnog kuta rezanja te uporabom rashladne tekućine pod povišenim tlakom. Ukoliko je površina nakon obrade loše kvalitete, potrebno je smanjiti posmak, a kod glodanja povećati broj okretaja glodala [21, 22, 24].

5.1.1. Obrada alatima od karbida

Karbidni alati prevučeni PVD-om sa pozitivnim nagibom obrade prikladni su za srednju te završnu obradu. Smanjuju se rezne sile i temperature. Prilikom uporabe karbidnog alata, potrebno je održavati velik posmak i dubinu rezanja, u svrhu minimiziranja očvrsnuća. Da bi se izbjeglo

naljepljivanje te ubrzano trošenje alata, potrebno je dobro hlađenje. Kada god je to moguće, poželjno je koristiti rashladnu tekućinu pod visokim tlakom. Prilikom uporabe pločice od karbida, potrebno je koristiti umjerene brzine rezanja u svrhu minimiziranja temperature na vrhu alata i povišenja vijeka trajanja alata.

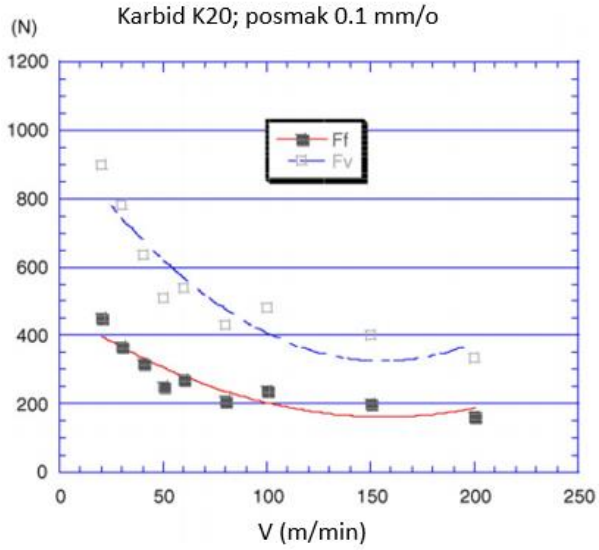
Cementirani karbidni alati često se koriste kod obrade superlegura na bazi nikla, posebice za obradu legure Inconel 718. Zbog što brže mogućnosti odvajanja čestica materijala i postizanja visoke kvalitete površine obrađivanog materijala, razvijeno je obrađivanje kod velikih brzina. Za legure na bazi nikla, obrađivanje velikim brzinama smatra se od brzine 50 m/min. Prema literaturnom izvoru [25], provedeno je tokarenje navedene legure (Inconel 718) sa nekoliko alata prevučenih različitim karbidnim prevlakama. Parametri tokarenja su kod svakog alata bili jednaki: suha obrada, brzina rezanja bila je od 20-200 m/min, posmak 0.1mm/o te 0.2 mm/o, a širina rezanja iznosila je 1.5 mm. Tvrdoća legure Inconel 718 iznosila je 68 HRC. Kao što je navedeno u tablici 5.1.1, testirali su se alati prevučeni jednim i više slojeva. Jednoslojne prevlake bile su od TiAlN (kod 1 i kod 2), jedna višeslojna prevlaka sastojala se od TiAlN sloja na koji je dodan WC/C (volframov karbid/karbon, kod 3) niskog trenja, a na drugi alat nanesen je sloj TiAlN na koji je dodan sloj sa malim udjelom titana u spoju MoST (Molibden-disulfid) [25].

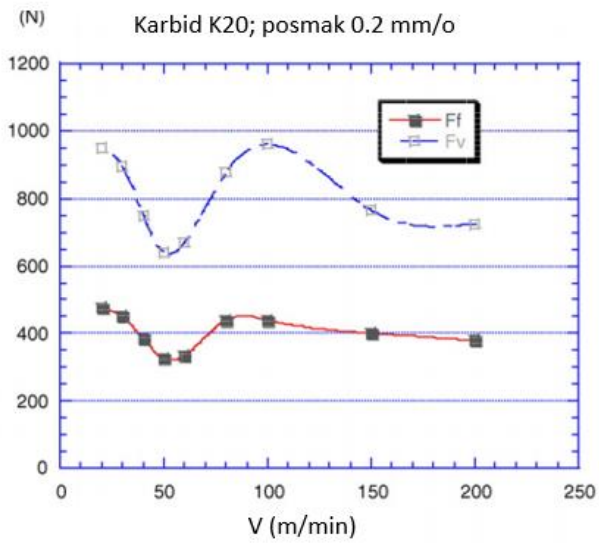
Tablica 5.1.1. Svojstva PVD prevlaka

Prevlaka	Kod prevlake	Tvrdoća (HRV)	Debljina (µm)
Karbid K20 (bez prevlake)	0	1700	0
TiAlN	1	3300	2…4
TiAlN	2	3000…3500	3
TiAlN+ WC/C	3	2600	3…6
TiAlN + MoST (MoS_2T)	4	2500…5000	3…10

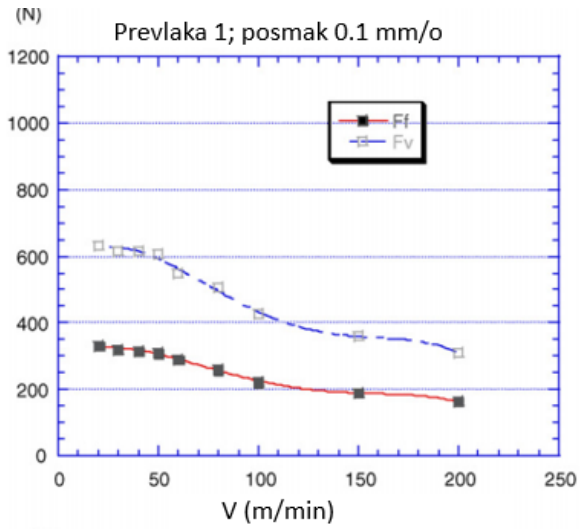
Kod posmaka od 0.1 mm/o posmična sila (Ff) i glavna sila rezanja (Fv) padaju ovisno o brzini rezanja te vrijednosti sile iznose od 200-1000 N. Za jednaku vrijednost posmaka, sile izmjerene na svim alatima sa prevlakama su manje te iznose od 200-600 N (dijagram 5.1.2 i 5.1.3). Ovaj povoljan učinak prevlaka ne prepoznatljiv je kod obrade sa posmakom 0.2 mm/o. Sile rezanja su u tom slučaju u jednakom rasponu, od 300-1000 N. U ovom slučaju značajna razlika može se primijetiti u trošenju alata.

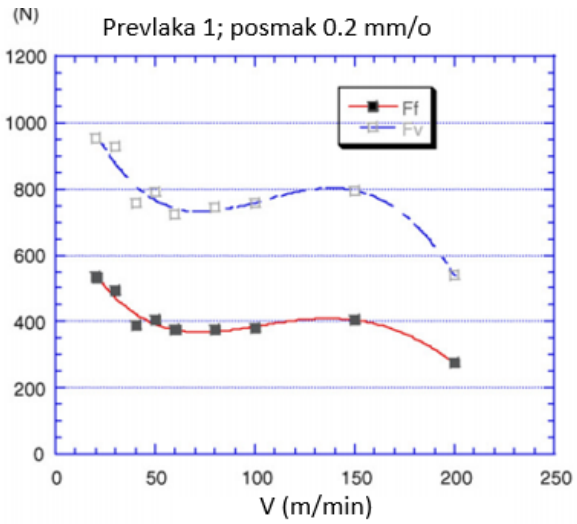
Dijagram 5.1.2 Posmična sila i sila rezanja u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja karbida K20

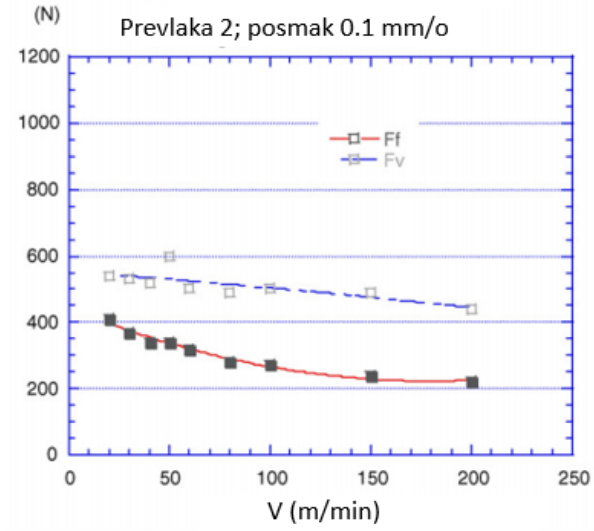


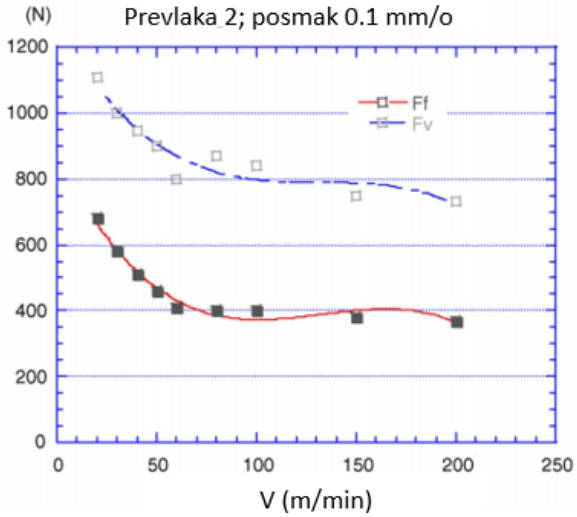


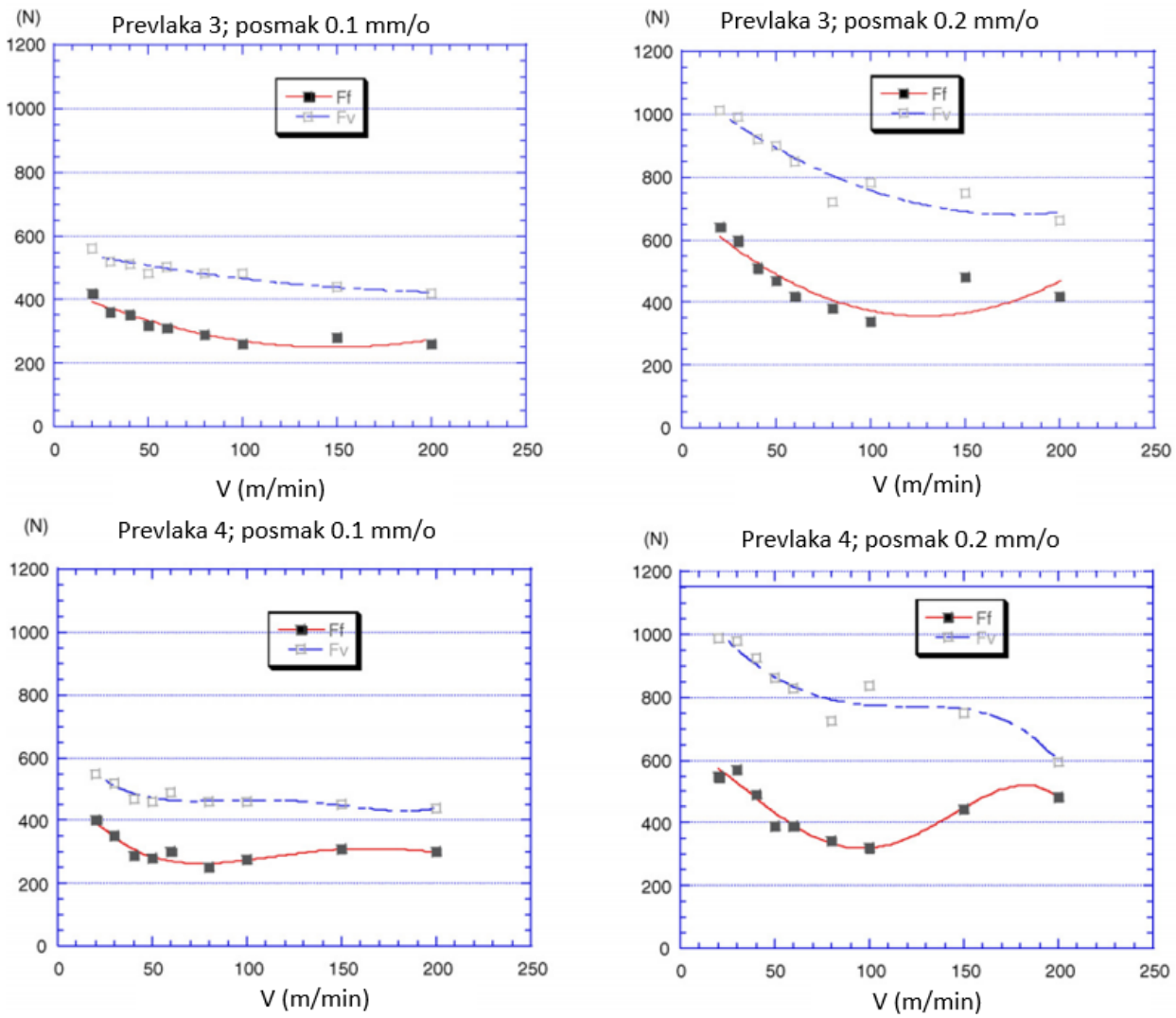
Dijagram 5.1.3. Posmična sila i sila rezanja u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja premaza 1, 2, 3, 4.





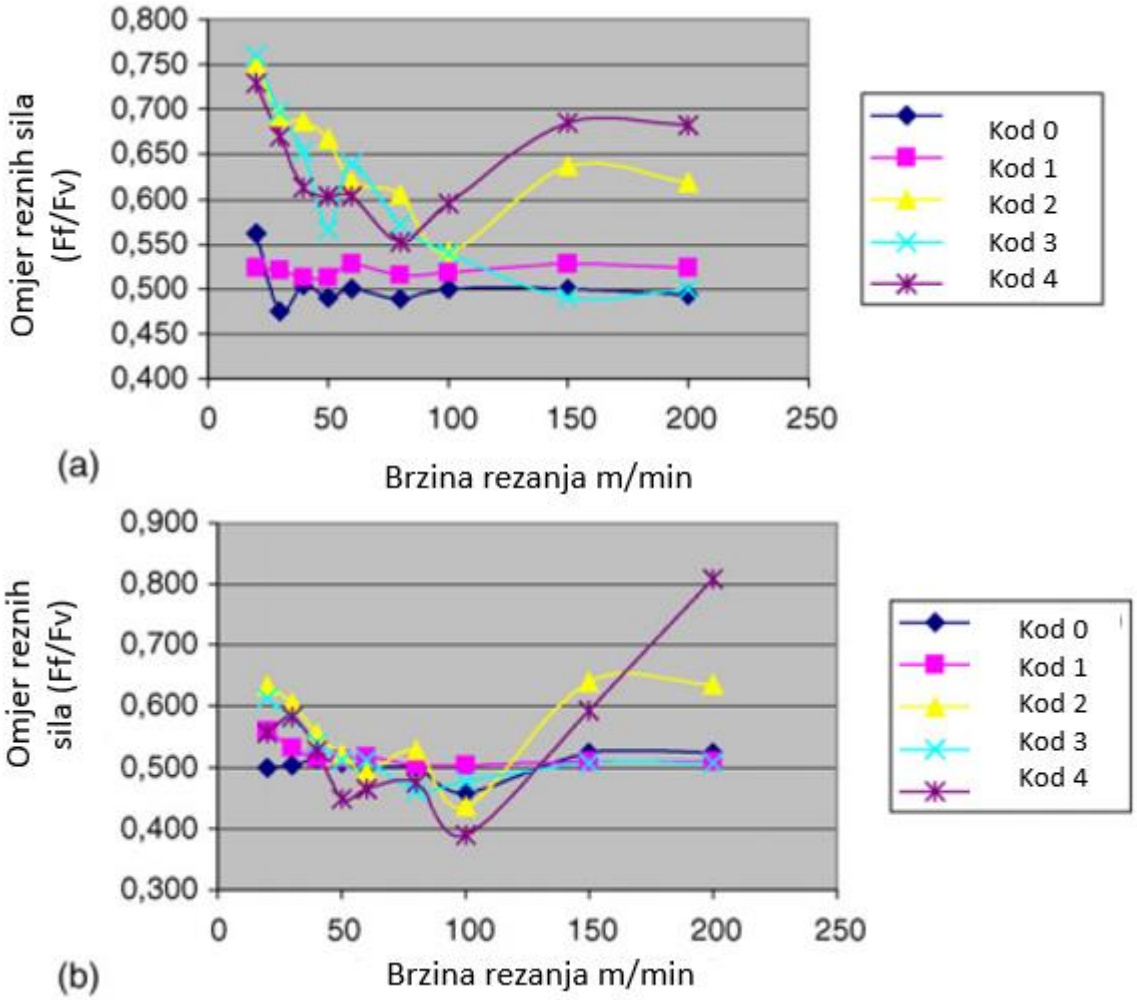




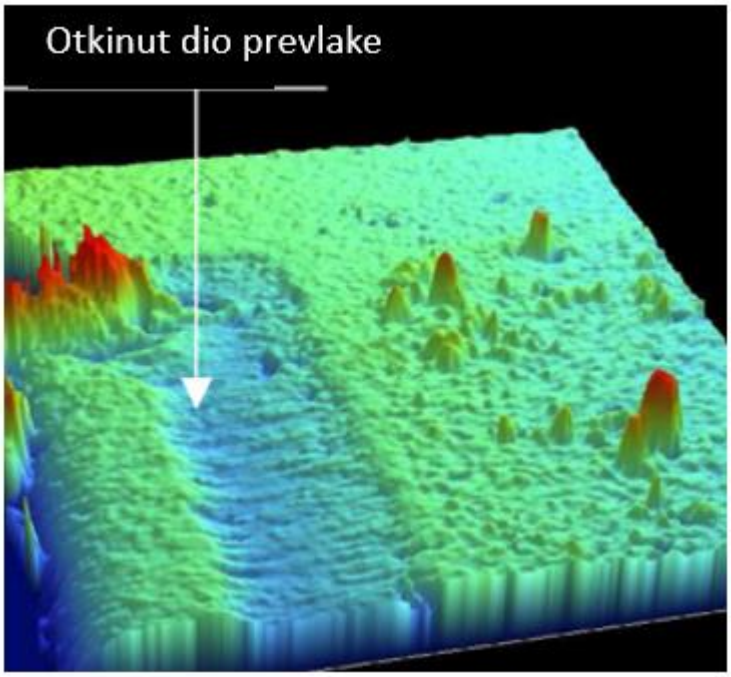


Omjer reznih sila (Ff/Fv) približno je jednak kod brzine obrade od 100 m/min. Iako su testovi provedeni samo do brzine od 250 m/min, prema dijagramu 5.1.4 vidljivo je da daljnje povećanje brzine rezanja (iznad 100 m/min) uzrokuje drastičnim promjenama u omjeru reznih sila, dakle i u povišenju trošenja alata sa prevlakama od karbida. U dijagramu 5.1.4 (a) prikazan je omjer reznih sila u ovisnosti o brzini obrade sa posmakom od 0,1 mm/o, a na (b) dijelu dijagrama prikazan je isti taj omjer, ali za posmak od 0,2 mm.

Dijagram 5.1.4.Omjer reznih sila u odnosu na brzinu rezanja kod posmaka 0,1 mm/o (a) i 0,2 mm/o (b)



Nakon provedene obrade, slijedila je analiza potrošenosti alata. Kod svih alata došlo je do BUE-a (engl.“built up edge“) odnosno naljepljivanja odvojene čestice na vrh alata kojim se obrađuje, što može rezultirati pogreškama prilikom obrade kao što je to navedeno ranije u ovome radu. Kao najbolje pokazale su se AlTiN prevlake zbog svojih triboloških svojstava. Kod njih naljepljivanje materijala na vrh alata uzrokuje blagim guljenjem/otklanjanjem prevlake sa vrha alata, kao što je to vidljivo na slici 5.1.5.



Slika 5.1.5. Otkinut dio TiAlN prevlake nakon obrade

5.1.2. Obrada keramičkim alatima

Keramički alat omogućava veću brzinu obrade, nema potrebe za hlađenjem. Izraženija su oštećenja na alatu, nego što je to kod karbidnih alata. Kada je zarezivanje veće, potrebno je koristiti veći ulazni kut obrade u svrhu smanjenja pritiska alata te poboljšanja kvalitete površine nakon obrade.

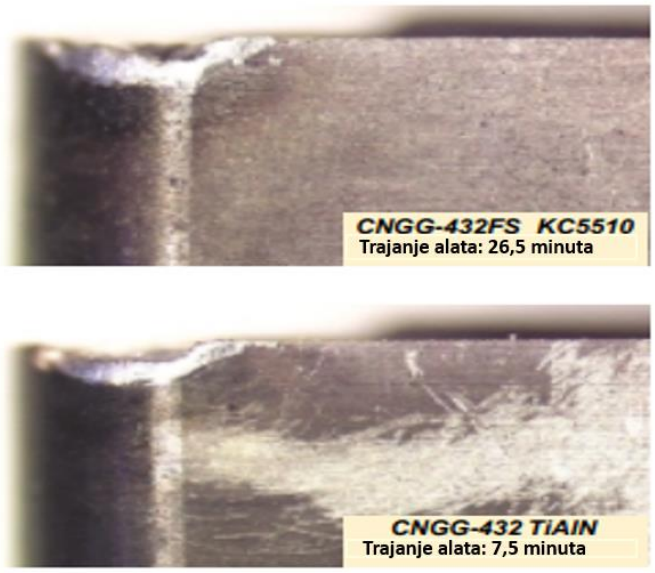
5.1.3. Obrada PCBN alatom

PCBN alati za rezanje sintetički su kubični bor nitridni alati koji se odlikuju zadržavanjem visoke čvrstoće kod visokih temperatura. Osim visoke tvrdoće i toplinske stabilnosti na visokim temperaturama, navedeni alati odlikuju se i kemijskom inertnošću. Zbog svojih karakteristika, superioran je u odnosu na ostale alate. Polikristalni kubični bor nitrid drugi je najtvrđi materijal na svijetu, stoga se često koristi kod obrade teško obradivih legura.

5.2. Nove tehnologije alata za rezanje

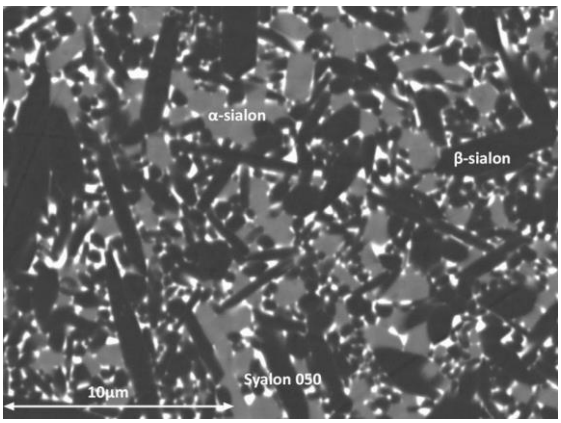
Kennametal je američki dobavljač alata i industrijskih materijala. Većina problema prilikom obrade legura otpornih na visoke temperature riješena je uporabom ispravne geometrije i naprednih PVD TiAlN prevučenih karbida KC 5510 i KC 5525. Ovi proizvodi su revolucionarni

u produktivnosti kod srednje i završne obrade superlegura, kao i kod legura na bazi titana. Brzine rezanja mogu biti i do 122 m/min kod završne obrade pločicom prevučenom sa KC 5510. Obično se brzine mogu udvostručiti u odnosu na konvencionalni PVD proizvod bez utjecaja na vijek trajanja alata. KC 5510 je napredni PVD AlTiN presvučeni finozrnati volframov karbid. Napravljen je za produktivnu obradu legura otpornih na visoke temperature. Finozrnata volframova karbidna podloga ima izvrsnu otpornost na tvrdoću i deformabilnost. KC 5525 koristi istu naprednu PVD prevlaku kao i KC 5510, kombiniran sa finozrnatom volfram karbidnom podlogom (10% kobalt). Povišen udio kobalta osigurava sigurnost prilikom prekinutih rezanja, dok finozrnasti volfram održava otpornost na deformacije. U razvoju ovih proizvoda, Kennametal je provodio opsežne metalurške testove. U više od 100 testova, ti su novi proizvodi visokih performansi nadmašili konkurenciju u 95% slučajeva. Usporedba vijeka trajanja alata CNGG-432 prevučenog sa TiAlN (titan-aluminij nitridom) te istog alata prevučenog naprednom Kennametalvom PVD prevlakom prikazana je na slici 5.2.2. Kao što slika prikazuje, vijek trajanja alata prevučenog sa KC 5510 znatno je veći, gotovo 4 puta.



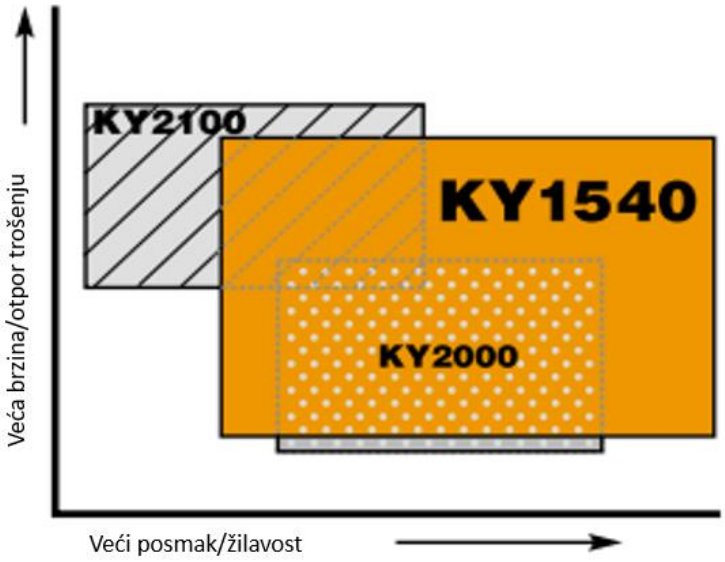
Slika 5.2.2. Vijek trajanja alata

Kyon 1540 je Kennametalov revolucionaran SiAlON keramički rezni materijal posebno napravljen za obradu visokotemperaturnih legura. Mikrostruktura Kyon 1540 konstruirana je da poboljša žilavost (veća pouzdanost) i tvrdoću (otpornost na abrazivno trošenje). Jedinstvena kombinacija svojstava razvijena u Kyon 1540 značajno proširuju raspon efektivne obrade materijala otpornih na visoke temperature, kod tokarenja i kod glodanja. Na slici 5.2.3. prikazana je mikrostruktura SiAlON-a.



Slika 5.2.3. Mikrostruktura SiAlON-a

Dijagram 5.2.4. Parametri obrade keramičkih alata



Kao što je vidljivo na dijagramu iznad, Kyon 1540 rezni materijal preporučuje se za širok raspon obrade visokotemperaturnih legura. Kyon 2100 preporučuje se za visoke brzine glodanja i tokarenja visokotemperaturnih legura. Preporučuje se i za tokarenje očvrsnutih visokotemperaturnih legura (>48 HRC), kao i za fino tokarenje visokotemperaturnih legura. Uporabom pravilno odabranog alata, moguće je postići značajne uštede prilikom obrade [21].

6. Zaključak

Iz ovog rada može se zaključiti da je problematika obrade odvajanjem čestica legura nikla izrazito složena. Postoji čitav niz čimbenika i parametara na koje je potrebno obratiti pažnju. Zanemarivanje bilo kojeg čimbenika može rezultirati pogreškama kod obrade, a to ima za posljedicu povećan trošak obrade. Legure nikla neizbježne su u današnjem svijetu, a koriste se sve više i više. Cijena obrade legura nikla relativno je visoka, zbog cijene alata koji su neizbježni za obradu odvajanjem čestica. Novije tehnologije obrade uvelike povećavaju produktivnost reznih alata, produljuju vijek trajanja alata, iz čega proizlazi sve viša produktivnost obrade. Trošenje reznih alata predstavlja poseban problem kod obrade, pošto je trošenje alata ponekad povećano i preko 4 puta kod obrade pojedinih legura, poput Hastelloy X, C-22.

7. Literatura

[1] Skupina autora: ASM Handbook;Volume 2; Properties and Selectio: Non ferrous Alloys and Special-Purpose materials

[2] Inženjerski priručnik IP4: Proizvodno strojarstvo- Materijali, Školska knjiga; Zagreb; 1998

[3] Filetin, Kovačiček, Indof: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2011.

[4] Ljiljana Kovačević, Ivan Žugaj: Kemijski elementi, Zagreb : Media sci, 1996.

[5] Crook, Paul: Corrosion-resistant nickel alloys Part 3. Advanced materials & processes, br. 165 (6), 2007, str. 45-48

[6] https://nickelinstitute.org/ (dostupno 15.9.2020)

[7] Dupont JN, Lippold JC, Kiser SD. Welding Metallurgy and Weldability of Nickel Base Alloys. Hoboken, NJ: Wiley and Sons, Inc; 2009

[8] ASME Pressure Vessel Section IX

[9] PD CEN ISO/TR 15608:2017, Welding.Guidelines for a metallic materials grouping system

[10] J.C.M. Farrer: The Alloy Tree: A Guide to Low-Alloy Steels, Stainless Steels, and Nickel-base Alloys, CRC Press, 2004.

[11] http://www.zhalloys.com/dongtai-zhonghai-high-temperature-alloy-technology-coltd-nickel%20200.html

[12] Haynes International: Hastelloy C-22 Alloy brochure, 2020.

[13] Haynes International: Hastelloy X Alloy brochure, 2020.

[14] https://www.hightempmetals.com/techdata/hitempHastXdata.php (dostupno 15.9.2020)

[15] https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2194 (dostupno 15.9.2020)

[16] https://www.magellanmetals.com/nickel-alloys (dostupno 15.9.2020)

[17] Schütze M., Roche M., Bender R.: Corrosion Resistance of Steels, Nickel Alloys, and Zinc in Aqueous Media: Waste Water, Seawater, Drinking Water, High-Purity Water, John Wiley & Sons, 2015

[18] Machining Nickel alloys, Nickel development institute, Reference book, Series No: 11008.

[19] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/zavar/nikl.html (dostupno 15.9.2020)

[20] Haynes International: Fabrication of Hastelloy corrosion-resistant alloys,2003.

[21] Kennametal France: High-temperature machining guide

[22] Ćorić: Posebni metalni materijali,predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016/2017.

[23] F.C. Campbell: Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials, Elsevier, 2006.

[24] https://www.haasfactoryoutlet.com/about/local-news-and-events/bid/342766/3-Tips-For-Machining-Nickel-Based-Alloys (dostupno 15.9.2020)

[25] Devillez, A., Schneider, F., Dominiak, S., Dudzinski, D., & Larrouquere., et al. Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. Wear, 2007, 262.7-8: 931-942.

Popis slika

Slika 2.1. Plošno centrirana kubična rešetka 2
Slika 4.2.1. Pozitivan i negativan kut obrade.....23
Slika 4.4.1. Blanjanje 24
Slika 4.6.1. Istosmjerno i protusmjerno glodanje 25
Slika 4.7.1. Zub pile za legure nikla 26
Slika 4.8.1. Silikon-Karbid brusna ploča 27
Slika 4.8.2. Aluminij-oksid brusna ploča.....27
Slika 5.1.5. Otkinut dio TiAlN prevlake nakon obrade 33
Slika 5.2.2. Vijek trajanja alata 34
Slika 5.2.3. Mikrostruktura SiAlON-a 35

Popis tablica i dijagrama

Tablica 2.1.1. Svojstva nikla 3
Tablica 2.1.2. Utjecaj morske vode na pojedine legure nikla 4
Tablica 2.2.1. Trgovačke oznake legura na bazi nikla 8
Tablica 2.2.2. Prikaz podjele legura nikla prema normi ASME Pressure Vessel Section IX ... 9
Tablica 2.2.3. Prikaz podjele nikla i legura nikla prema normi PD CEN ISO/TR 15608:2017 9
Tablica 2.2.4. Podjela nikla i legura nikla [10] 10
Dijagram 2.2.5. Puzanje hastelloy x superlegure za različite smjerove naprezanja monokristalne lopatice 12
Tablica 2.2.4. Kemijski sastav Hastelloy X legure [13] 13
Tablica 2.2.5. Kemijski sastav legure Hastelloy C-22 [12] 14
Tablica 2.2.6. Test otpornosti legura nikla na koroziju [12] 14
Tablica 3.1.1. Mehanička svojstva legura nikla 15
Tablica 4.1. Kemijski sastav legura nikla [18] 18
Dijagram 4.1.2 Obradivost legura nikla i čelika. 21
Dijagram 4.1.1. Utjecaj sadržaja aluminija i titana na statučku izdržljivost Ni- superlegura [23] 22
Tablica 4.3.1. Parametri bušenja legura nikla [18] 24
Tablica 4.7.1. Parametri piljenja [18] 26
Tablica 5.1.1. Svojstva PVD prevlaka 29
Dijagram 5.1.2 Posmična sila i sila rezanja u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja karbida K20 30
Dijagram 5.1.3. Posmična sila i sila rezanja u ovisnosti o posmaku i brzini rezanja premaza 1, 2, 3, 4. 30
Dijagram 5.1.4.Omjer reznih sila u odnosu na brzinu rezanja kod posmaka 0,1 mm/o (a) i 0,2 mm/o (b) 32
Dijagram 5.2.4. Parametri obrade keramičkih alata 35

Sveučilište Sjever

SVEUČILIŠTE SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU

I

SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Denis Gradečak pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom Specifičnosti obrade odvajanjem čestica pri obradi legura nikla te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:
Denis Gradečak
Denis Gradečak
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnost i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Denis Gradečak neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom Specifičnosti obrade odvajanjem čestica pri obradi legura nikla čiji sam autor.

Student:
Denis Gradečak
Denis Gradečak
(vlastoručni potpis)