

Unaprjeđenja konvencionalnih postupaka obrade odvajanjem čestica

Puhek, Mihael

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:218586>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-04**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mihael Puhek

Zagreb, 2018. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Toma Udiljak

Student:

Mihael Puhek

Zagreb, 2018. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija, materijale i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Tomi Udiljku na smjernicama i savjetima prilikom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem svojoj obitelji, osobito bratu Kristijanu te kolegama na potpori tijekom cijelog studija.

Mihael Puhek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mihael Puhek** Mat. br.: 0035197224

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Unaprjeđenja konvencionalnih postupaka obrade odvajanjem čestica**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Advances in conventional machining processes**

Opis zadatka:

Konvencionalni postupci obrade odvajanjem čestica imaju vrlo dugu tradiciju. Premda su fizikalni principi uvijek isti, postupci su tijekom vremena doživjeli značajne promjene i poboljšanja. Kako su ti procesi definirani sučeljem alata i obratka, svaka promjena kod alata i/ili materijala obratka unosi promjene i u sami proces. Promjene kod stroja, sustava hlađenja i podmazivanja također mogu imati značajan utjecaj na proces obrade. Kako bi se digla produktivnost obrade, omogućila ili olakšala obrada teško obradivih materijala, nastao je cijeli niz obrada koje se nazivaju hibridne obrade.

Kod hibridnih procesa obrade obično postoje dvije kategorije: procesi u kojima su svi konstitutivni procesi izravno uključeni u odvajanje materijala i hibridni procesi u kojima samo jedan proces izravno sudjeluje u odvajanju materijala, a drugi samo pomaže odvajanje materijala olakšavajući uvjete obrade odvajanjem čestica.

Jedno od najnovijih unaprjeđenja u postupcima konvencionalnih postupaka obrade predložila je tvrtka SANDVIK

i to za postupak tokarenja.

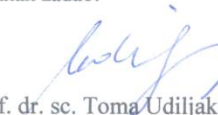
U radu je potrebno dati pregled značajnijih unaprjeđenja postupaka tokarenja, glodanja i bušenja s posebnim osvrtom na postupak tokarenja. Potrebno je razraditi teorijsku usporedbu uobičajenog pristupa tokarenju i inovacije koju je ove godine predložila tvrtka SANDVIK pod marketinškim nazivom „prime turning“. Bude li moguće, potrebno je provesti i eksperimentalnu usporedbu postupaka u Laboratoriju za alatne strojeve.

Zadatak zadan:
30. studenog 2017.


Rok predaje rada:
1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Toma Udiljak

Predsjednik Povjerenstva:


Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS KRATICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. OBILJEŽJA SUVREMENE PROIZVODNJE	2
2.1. Obilježja suvremenog tržišta i pokretači razvoja novih tehnologija.....	3
2.2. Moderan razvoj proizvoda i proizvodnih sustava.....	3
2.3. Trendovi u postupcima obrade	4
2.3.1. Visokobrzinske obrade	5
2.3.2. Tvrdе obrade	8
2.3.3. Suhe obrade.....	9
3. HIBRIDNE OBRADЕ	12
3.1. Aditivne tehnologije kao dio procesa u hibridnim obradama	12
3.1.1. Laser kao dio aditivnih tehnologija.....	13
3.2. Ultrazvučna tehnologija kao dio procesa u hibridnim obradama	14
4. UNAPRJEĐENJA KONVENCIONALNIH POSTUPAKA OBRADЕ ODVAJANJEM ČESTICA.....	15
4.1. Bušenje.....	15
4.1.1. Alat kao osnova za poboljšanja bušenja.....	16
4.1.2. Razvoj svrdla u SANDVIK-u.....	16
4.2. Mikro bušenje	18
4.3. Bušenje potpomognuto ultrazvučnom tehnologijom.....	19
5. GLODANJE	21
5.1. Visokobrzinska obrada glodanjem	21
5.1.1. Glodanje velikim posmacima	23
5.2. Razvoj materijala reznih alata za glodanje.....	24
5.3. Tvrdо glodanje.....	25

5.4.	Mikro glodanje	25
5.4.1.	Razvoj alata za mikro glodanje	26
6.	TOKARENJE	28
6.1.	Moderni materijali reznih oštrica za tokarenje	29
6.1.1	Prevlake	29
6.2.	Wiper geometrija reznih oštrica za tokarenje	30
6.3.	Tvrdo tokarenje	31
6.4.	Mikro tokarenje	33
6.5.	Suho tokarenje i tokarenje s minimalnom količinom SHIP-a	34
7.	PRIME TOKARENJE	36
7.1.	Gibanja kod prime tokarenja	37
7.1.1.	Ispravan ulaz za dulji vijek alata	38
7.2.	Alati za prime tokarenje	38
7.2.1.	Usporedba A i B- tipa reznog alata za prime tokarenje	39
7.2.2	Rezna oštrica (oštrice)	42
7.3.	Geometrija alata za prime tokarenje	44
7.4.	Preporuke kod prime tokarenja	45
7.5.	Usporedba konvencionalnog tokarenja i prime tokarenja	46
8.	ZAKLJUČAK	47

POPIS SLIKA

Slika 1. Obilježja proizvoda u suvremenoj proizvodnji [1]	4
Slika 2. VBO- tokarenje [2]	7
Slika 3. Troškovi automobilske industrije u Njemačkoj [28]	9
Slika 4. Usporedba CNC tehnologije i aditivnih tehnologija [5]	13
Slika 5. Ideničan držač alata, ticala i glave za lasersko oblaganje [6]	13
Slika 6. Svrđlo s mogućnošću upuštanja proizvođača SANDVIK [27]	17
Slika 7. Svrđlo za mikro bušenje [7]	18
Slika 8. Glavni dijelovi "ultrazvučne bušilice" [9]	20
Slika 9. Ovisnost veličine odvojene čestice o promjeru pločice [12]	23
Slika 10. Postupak izrade mikro glodala laserom [13]	26
Slika 11. Usporedba mikro glodala prije i nakon obrade laserom [13]	27
Slika 12. Razlika alata sa standardnim radijusom i alata s WIPER geometrijom [15]	31
Slika 13. Približna raspodjela topline kod tokarenja tvrdih materijala [16]	32
Slika 14. Ovisnost brzine rezanja i životnoga vijeka alata [17]	33
Slika 15. Dovod SHIP-a na alatu CoroTurn 300 [19]	35
Slika 16. Mogući smjerovi gibanja alata u zahvatu [21]	37
Slika 17. Ulaz alata u materijal [4]	38
Slika 18. A i B tipovi alata za prime tokarenje [22]	39
Slika 19. Rezna pločica A- tipa [23]	39
Slika 20. Rezna pločica B- tipa [23]	40
Slika 21. Područja primjene A i B tipa alata u ovisnosti o dubini rezanja i posmaku [24]	41
Slika 22. Usporedba iskoristivosti reznih oštrica[29]	42
Slika 23. Usporedba istrošenosti rezne oštrice konvencionalnog tokarenja i prime tokarenja[29]	43
Slika 24. Držač alata, dvije pločice A- tipa, vijak i moment ključ	48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Obrada SiC mikro glodalom od NPCD-a [13]	27
Tablica 2. Svojstva postupaka prevlačenja [14].....	30
Tablica 3. Svojstva prevlaka [14].....	30
Tablica 4. Specifikacije reznog alata A- tipa [23].....	40
Tablica 5. Specifikacije reznog alata B- tipa [23].....	40
Tablica 6. Brzine rezanja v_c u prime tokarenju [25].....	42
Tablica 7. Povećanje produktivnosti prime tokarenja u odnosu na konvencionalno tokarenje[4]	46

POPIS KRATICA

Kratika	Izvorni naziv
CAD	Computer - Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CBN	Cubic Boron Nitride
CIM	Computer-Integrated Manufacturing
CVD	Chemical Vapor Deposition
FMS	Flexible Manufacturing Systems
GV	Glavno Vreteno
HPC	High-Pressure Coolant
HSK	Hohl Schaft Kegel
IT	International Tolerance
JIT	Just In Time
MQCL	Minimum Quantity Cooling Lubrication
MQL	Minimum Quantity Lubrication
NPCD	Nano-Polycrystalline Diamond
OOČ	Obrada Odvajanjem Čestica
PCD	Polycrystalline Diamond
PVD	Physical Vapor Deposition
SHIP	Sredstvo za Hlađenje Ispiranje i Podmazivanje
TM	Tvrđi Metal
VBO	Visokobrzinske Obrade

Prime turning- Prime tokarenje (inovacija u tokarenju tvrtke SANDVIK Coromant)[4]

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A\alpha$	°	Stražnja površina alata
$A'\alpha$	°	Pomoćna stražnja površina alata
$A\gamma$	°	Prednja površina alata
a_p	mm	Dubina Obrade
ε_r	°	Kut vrha alata (vršni kut)
α	°	Kut stražnje površine
β	°	Kut klina
γ	°	Kut prednje površine
κ_r	°	Kut namještanja glavne oštrice
F_c	N	Glavna sila rezanja kod konvencionalnog tokarenja
F_p	N	Natražna (pasivna) sila rezanja kod konvencionalnog tokarenja
f	mm	Posmak
g	m/s^2	Gravitacijska konstanta
h	mm	Debljina odvojene čestice
S	mm	Glavna oštrica tokarskog noža kod konvencionalnog tokarenja
v_c	m/min	Brzina rezanja

SAŽETAK

Od srednjega vijeka način pretvorbe ideje u gotov proizvod zahtijevao je niz djelatnosti uz koje su bile usko vezane vještine i znanja radnika kako bi se ostvario primarni cilj obrade sirovine u proizvod spreman za ugradnju i korištenje. Konvencionalni postupci obrade poput tokarenja, glodanja i bušenja do današnjih dana su se od primitivnih mehanizama i alata razvili u kompleksne i sofisticirane postupke na strojevima koji svojim obradama daju značajan obol razvoju tehnologije i društva kakvo poznajemo danas. U ovom završnom radu bit će opisan razvoj konvencionalnih obrada unatrag nekoliko godina te će se dati usporedba novih načina procesa obrade s istima. Mnoge današnje obrade ističu se svojim značajkama koje služe poboljšanjima kvalitete, povećanjem obujma proizvodnje i dimenzijske točnosti te olakšanjem obrade teško obradivih materijala. Fokus će biti na obradama na numerički upravljanim strojevima jer je takvo upravljanje danas zbog svojih prednosti imperativ za ozbiljnije postupke obrade. Prvi dio rada bavit će se obilježjima suvremene proizvodnje kako bi se objasnili razlozi napretka proizvodnje kao cjeline i obradnih sustava koji su nosioci takve proizvodnje. Današnju proizvodnju prate i trendovi s kojima proizvođači jedino mogu konkurirati na tržištu te će u tim trendovima biti navedeni svi uvjeti primjene, potrebna oprema, prednosti ali i nedostaci koje oni nose sa sobom. Hibridne obrade koje polako ekspaniraju sa sobom nose do sada velike promjene u učinkovitosti, brzini i ekonomičnosti obrada. Aditivne tehnologije čije se prednosti kombiniraju s nedostacima strojnih obrada su zanimljiv način povećanja mogućnosti obrade dijelova složenih geometrija. Ultrazvučna tehnologija iskorištava se u strojnim obradama za poboljšanja uvjeta obrade materijala koji su zbog svojih karakteristika prekompleksni za konvencionalne obrade. U drugom dijelu bit će riječ o razvoju konvencionalnih obrada bušenja, glodanja i tokarenja. Kao primjer napretka alata za bušenje bit će prikazan razvoj alata tvrtke SANDVIK Coromant. U postupku obrada glodanjem dan je pregled većine trendova koji prate tu obradu te pregled reznih alata koji su danas zastupljeni. Treći i najvažniji dio obuhvaća sve važnije postupke tokarenja danas zastupljene, alate za tokarenje, njihova svojstva i geometriju te utjecaj geometrije na obrađenu površinu. Također će biti riječi o SHIP-u i njegovoj primjeni, novim načinima poboljšanja efikasnosti ili njegovoj eliminaciji u obradama tokarenja. Također u posljednjem dijelu rada prikazana je nova

metoda tokarenja pod nazivom prime tokarenje koju je nedavno predstavila tržištu tvrtka SANDVIK Coromant [4].

Radi se o tokarenju u svim smjerovima čime se ekstremno povećava produktivnost. Takvu obradu prate nesvakidašnje geometrije alata čiji je prikaz objašnjen kutovima i površinama. Pokazani su dostupni modeli reznih oštrica na tržištu te njihove mogućnosti u smislu parametara obrade. Za kraj je dana usporedba prime tokarenja s konvencionalnim načinom tokarenja kako bi se dokazalo povećanje produktivnosti.

Ključne riječi: *prime turning, prime tokarenje, tokarenje, glodanje, bušenje, hibridne obrade.*

SUMMARY

From the middle ages, the way of conversion of idea into a finished product required a number of activities that are closely related with skills and knowledge of workers in order to achieve the ultimate goal of processing of the raw material into a product ready for installation and use. Conventional machining processes such as turning, milling and drilling have developed from primitive mechanisms and tools to complex and sophisticated processes on machines, which with their operations make a significant contribution to development of technology and society as we know today. In this final assignment document, development of conventional machining will be described with comparison new machining technologies. The focus will be on machining on numerically controlled machines, as this kind of controlling is imperative today because of advantages on serious processing operations. First part of the final assignment will cover the features of modern production in order to explain the reasons of production development and the processing systems that are the carriers of this kind of production. Hybrid machining that slowly expands has brought great changes with them in way of efficiency, speed and cost-effectiveness of processing. Additive manufacturing technologies whose advantages are combined with disadvantages of machining are an interesting way to increase the ability to process parts of complex geometry. In the second part it will be shown development of conventional drilling, milling and turning processes. As example of drilling tool advancement will be shown development of SANDVIK Coromant's tools. The third and most important part includes all the most important turning processes present today, turning tools, their characteristics and geometry, and the impact of geometry on the treated surface. It will also be about coolant and its application.

Also, in the last part is shown a new turning method called prime turning, recently introduced on the market by SANDVIK Coromant company. Introduced is turning in all directions what is extremely increasing productivity. This kind of processing is accompanied by unusual geometry of the tool whose layout is explained by angles and surfaces. For the end is presented comparison of the prime turning with the conventional turning mode to demonstrate increased productivity.

Keywords:*prime turning, turning, milling, drilling, hybrid manufacturing.*

1. UVOD

Konstantna želja čovjeka ka napretku civilizacije dovela je do postupaka prerade i oblikovanja sirovina u svrhu nastanka oruđa, oružja i alata kako bi si olakšao život. Još od doba Egipta, ljudi su se koristili kretnjama alata i obratka kako bi svoj rad zamijenili strojnim te je tako nastala preteča današnjih tokarilica, glodalica i bušilica. Razvoj alatnih strojeva nikada nije bio upitan jer takav stroj ima mogućnosti izrade samoga sebe te svog unapređivanja. Tijekom prve industrijske revolucije snaga za rad se crpila iz pare te je time napravljen značajan pomak u odnosu na prethodne. Kasnije su šira eksploatacija nafte, masovna proizvodnja čelika te razvoj električne energije doprinijeli razvoju. Upravo električnom energijom te elektroničkim elementima poput numerički upravljačkih jedinica koje su čitale program s bušenih kartica te mikroprocesora strojevi su se razvili u onakve CNC strojeve kakve danas poznajemo. Paralelno razvojem modernih strojeva, razvijali su se načini i metode njihova programiranja od kojih su poznatiji G-kod (programiranje pomoću simbola i crteža) te CAD-CAM programiranje (3D model se pretvara u strojni kod pomoću posebnog programa). Kako bi se povećala efektivnost i produktivnost obrade, i obrađivali teško obradivi materijali postupnim promjenama i poboljšanjima u odnosu na temeljne nastale su hibridne obrade. U daljnjem radu bit će uz promjene i poboljšanja konvencionalnih obrada odvajanjem čestica (OOČ) tokarenja, glodanja i bušenja, navedena i njihova kombinacija s ostalim obradama koje zajedno čine hibridne obrade. Poseban osvrt dati će se postupcima tokarenja, a osobito usporedbi klasičnog tokarenja s tokarenjem koje je nedavno predstavila tvrtka SANDVIK pod marketinškim nazivom prime tokarenje [4]. Prime tokarenje podrazumijeva tokarenje u više smjerova što gotovo dvostruko povećava produktivnost. Pomoću prime tokarenja moguće je primijeniti različite parametre obrade uz istu toleranciju te bolju kontrolu odvojene čestice. Oblikom oštrica povećava se vijek alata u smislu da je u zahvatu veća duljina oštrice, a ne kao što smo navikli vrh rezne pločice.

2. OBILJEŽJA SUVREMENE PROIZVODNJE

Poduzeće treba uz poslovnu definirati i proizvodnu strategiju. Kada su zahtjevi tržišta postali visoki, a kapaciteti proizvodnje neadekvatni, jedina zabrinutost bila je hoće li ulaz sirovina biti dovoljan kako bi se iz njih proizveo entitet. Danas je slika znatno drugačija. Skladišta su puna, konkurencija je oštra i bavi se raznim postupcima i načinima kako bi opstala na tržištu. Razni sustavi su razvijeni kako bi organizacije stekle prednosti i iskoristile svoj maksimalni potencijal. Neki od njih su JIT proizvodnja, proizvodnja koja stavlja sirovce u proizvodni proces u najkraćem roku te izbjegava skladištenje istih, FMS proizvodni sustavi spremni reagirati na promjene (osjetljivi na njih) bili oni predviđeni ili nepredviđeni te CIM proizvodnja koja se koristi računalima kako bi se kontrolirao cijeli proizvodni proces. Važno je spomenuti četvrtu industrijsku revoluciju pod pojmom Industrija 4.0. Industrija 4.0. obuhvaća veliki spektar pojmova kao što su smart factory (pametna tvornica), Internet of Things (internet stvari) i slično te je svima njima osobina fleksibilnost.

Digitalizacija ima doslovno značenje kao proces pretvaranja analognog signala u digitalni, te predstavlja jedan od najvažnijih pojmova kada se radi o Industriji 4.0. Ispitivanje učinka alata za poboljšanje proizvodnog sustava nalazi se u digitalizaciji. Ugradnjom senzora i brojača za pregled i kvalitetu proizvoda dobiva se povratna informacija o količini proizvedenih proizvoda, stanju alata i stroja te o eventualnim greškama. Baza podataka o stanju skladišta govori koliko proizvoda se nalazi spremno za prodaju, koliko je u proizvodnji a koliko je još potrebno proizvesti ako je potrebno. Postoje uređaji pomoću kojih se može nadgledati i ocijeniti rad zaposlenika uz sakupljene podatke. Gotovo svaki segment proizvodnog sustava moguće je digitalizirati. Dobra strana digitalizacije je povećanje ergonomije radnih mjesta i povećanje profitabilnosti. Današnja industrijska proizvodnja ima znatan utjecaj na okoliš. Sprečavanje negativnog utjecaja industrije može se postići planskim gospodarenjem otpadom, ulaganjem u moderne i „čiste“ tehnologije te praćenjem emisije onečišćujućih tvari u okolišu. Takvim pristupom okoliš se može očuvati kao nasljeđe idućim generacijama. Tim pristupom ostvaruje se održiva proizvodnja.

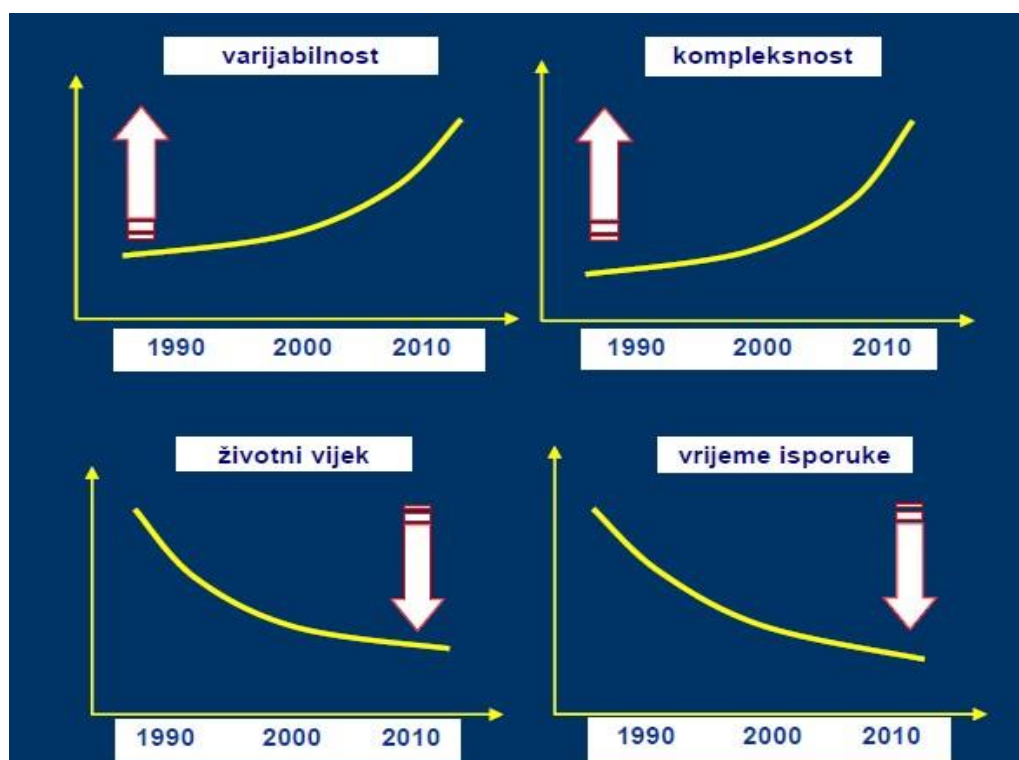
2.1. Obilježja suvremenog tržišta i pokretači razvoja novih tehnologija

Danas je tržište uzburkano novim trendovima i stilovima života, iznova se traže drugačiji i specifični proizvodi po mjeri kupaca. Takvo stanje značajno utječe na vijek trajanja proizvoda na tržištu. Konzumerizam i masovna proizvodnja također su uvelike skratili vremenski interval u kojem proizvod pronalazi svoje mjesto na tržištu. Veličine serija proizvoda su smanjene, a zahtjevi za varijantama proizvoda su sve veći (auto industrija). Ekspanzija individualizma je kupcima omogućio velik utjecaj na oblik, karakteristike i značajke proizvoda (želja za isticanjem). Pojavom masovne komunikacije i oglašavanja, dojam konkurencije je postao značajniji nego ikad prije. Promijenila se svijest o konkurenciji te se lakše može pratiti njihov rad i njihov utjecaj na tržište. Jasno je i da su želje svih kupaca neovisno o njihovu profilu kvalitetniji a jeftiniji proizvodi. Navedeni zahtjevi iznjedrili su vrlo brzo i značajne promjene u pogledu alatnih strojeva. Kako bi odgovorili tim zahtjevima proizvođači moraju povećavati konstantno svoju produktivnost i efikasnost uz kraće vrijeme ne samo obrade već i pripreme proizvodnje te isporuke. Iskorištenje alatnih strojeva (osobito novih) mora biti maksimalno, nikakvi zastoji nisu poželjni osim onih nužnih poput servisiranja stroja. Kvaliteta obrade je oduvijek bila nužna te je uvijek poželjan njezin rast uz držanje ostalih troškova koliko je to god moguće konstantnima. Javljaju se potrebe suradnje s npr. granama medicine kojima su potrebne obrade minijturnih dijelova koji svoje odredište često nalaze u ljudskome tijelu. Takvi dijelovi imaju svoju kompleksnost i obrada na njima nije trivijalna nego se mora u potpunosti prilagoditi, od načina prihvata do uvjeta pod kojima se obrada vrši. Novi materijali često pronalaze svoj put prema tržištu i njihove obrade su prilagođene uvjetima koji se razlikuju od uvjeta obrade konvencionalnih materijala poput čelika. Briga za okoliš je donedavno bila samo fraza koja nije imala svoju težinu, no danas se polako mijenja svijest o stanju okoliša i o elementima obradnih sustava koji na to utječu poput SHIP-a, odbačene odvojene čestice i energetske učinkovitosti alatnih strojeva

2.2. Moderan razvoj proizvoda i proizvodnih sustava

Vremena za razvoj proizvoda ako želimo konkurirati s proizvodom je jako malo te je za razvoj, izradu i provjeru proizvoda potreban takt tržišta. Već kod same konstrukcije proizvoda treba voditi računa o njegovim mogućim brzim izmjenama, dopunama i

inovacijama, također, ta konstrukcija mora biti podložna manipulaciji robotima i prilagođena automatizaciji rukovanja s istom tijekom proizvodnog procesa. Sve to moraju osigurati proizvodni sustavi. Njihova fleksibilnost i mogućnost brze reakcije na zahtjeve postavljene pred njih temelj su moderne proizvodnje. Poželjna je njihova velika iskoristivost koja se može postići isključivo neprekidnim radom unutar 24 satnog vremena. Sve više se truda ulaže u razvoj autonomnosti proizvodnih sustava i njihovoj samoodrživosti u smislu prepoznavanja pogrešaka te dojavljivanja o mogućim kvarovima uz minimaliziranje otpada ("reciklažu" SHIP-a ili pretaljivanje odvojenih čestica) kao način brige za okoliš.



Slika 1. Obilježja proizvoda u suvremenoj proizvodnji [1]

2.3. Trendovi u postupcima obrade

Današnji trendovi su zanimljivi jer su oni produkt razvoja novih tehnologija.

Neki od trendova su:

- Visokobrzinske obrade
- Tvrde obrade
- Suhe obrade

- Kriogene obrade
- Obrade s minimalnom primjenom SHIP-a
- Laserske obrade
- Mikro obrade
- Nekonvencionalne obrade
- Hibridne obrade

2.3.1. Visokobrzinske obrade

Pod VBO se podrazumijeva obrada odvajanjem čestica s velikim glavnim i posmičnim brzinama. Ideja je stara gotovo kao i moderniji stroj, ali ju je bilo nemoguće primijeniti zbog sljedećih ograničenja:

- velike učestalosti vrtnje glavnog vretena
- uležištenja GV
- sustava stezanja obratka (moguća pozamašna šteta otpuštanjem obratka)
- sustav stezanja alata
- rješenje velikih brzina i ubrzanja posmičnih gibanja
- sustav upravljanja i programiranja
- nepostojanost materijala reznih oštrica

Još jedan problem kod prelaska konvencionalnih obrada na VBO bio je zadržavanje nastale topline. Kod većih brzina konvencionalnih obrada toplina se zadržavala u alatu što je uzrokovalo njegovim zatupljivanjem, narušavanjem geometrije te je izravna posljedica toga bila loša kvaliteta obrađene površine. VBO „preskače“ takvo nepovoljno područje pa se nastala toplina odvodi odvojenom česticom

Teško je definirati VBO jer brzina rezanja ovisi o načinu obrade, materijalu, alatu, stroju, SHIP-u, prihvatu alata i ostalim čimbenicima.

Brzina rezanja koja označava granicu između konvencionalnih obrada i visokobrzinskih obrada je ona kod koje dolazi do pada temperatura u zoni rezanja. Dokazano je da postoji kritična brzina rezanja nakon koje temperatura počinje padati te je ona ovisna o vrsti materijala koji se obrađuje[11]. Kod VBO smanjuju se sile rezanja. Manje sile uzrokuju

manje deformacije obratka pa je moguća preciznija obrada[14]. Bitno je pronaći optimum između brzine rezanja i trošenja alata kako metoda VBO ne bi bila kontraproduktivna. Najveća prednost primjene VBO je povećanje produktivnosti a izravni pokazatelj povećanja produktivnosti je specifični volumen odvojene čestice.

Osnovne karakteristike VBO mogu se svrstati u četiri skupine[14]:

1. Tehnološke mogućnosti:

- obrada zakaljenih čelika
- obrada teško obradivih materija
- učinkovitija obrada sivog lijeva
- obrada tankostjenih obradaka
- obrada materijala osjetljivih na toplinu

2. Povećanje kvalitete:

- bolja kvaliteta obrađene površine
- smanjenje hrapavosti
- manja oštećenja površinskih slojeva
- obrada bez vibracija
- smanjenje sila rezanja

3. Smanjenje vremena obrade:

- veće brzine rezanja
- veće posmične brzine
- veći volumen odvojenih čestica
- kraća pomoćna vremena

4. Smanjenje troškova obrade

- kraće komadno vrijeme
- veće vremensko iskorištenje stroja
- bolje iskorištenje alata
- suha obrada
- smanjenje ručne obrade kod kalupa i ukovnja

Za VBO moraju se primjenjivati odgovarajući alati. Zahtjevi koje alat mora ispuniti su:

- tvrdoća i čvrstoća
- žilavost
- rezna čvrstoća brida
- unutrašnja stabilnost strukture
- temperaturna izdržljivost, oksidacijska postojanost
- ne nagnjanje difuziji i stvaranju naljepka

Rezni alati koji pogoduju VBO kasnije su nabrojani u poglavljima glodanja a nadopuna svojstava prevlakama opisana je kod tokarenja. U ovome dijelu napomenuti ćemo samo efekte primjene prevučenih alata kod VBO obrada:

- veći posmak i brzina rezanja
- veća postojanost oštrice alata
- dulje zadržavanje tolerancije
- bolja kvaliteta obrađene površine



Slika 2. VBO- tokarenje [2]

Engineering Research Center, Ohio state University, Columbus, USA dao je preporuke kod primjene VBO. Poželjna je simetrična konstrukcija alata, HSK prihvat je preferirana opcija prihvata alata. Presjek odvojene čestice ako se drži konstantnim može spriječiti pojave vibracija. Višeslojne prevlake daju veću postojanost i bolji prijenos topline. Kod obrade otvrdnutih čelika koristiti alate s ravnom prednjom površinom jer je kod primjene VBO na takvim materijalima lomač nepotreban. Kod odvođenja odvojenih čestica koristiti zrak pod visokim tlakom, a izbjegavati SHIP. Preporuke su utemeljene na istraživanjima obrade čelika H13, tvrdoće 46 HRC[14].

2.3.2. Tvrde obrade

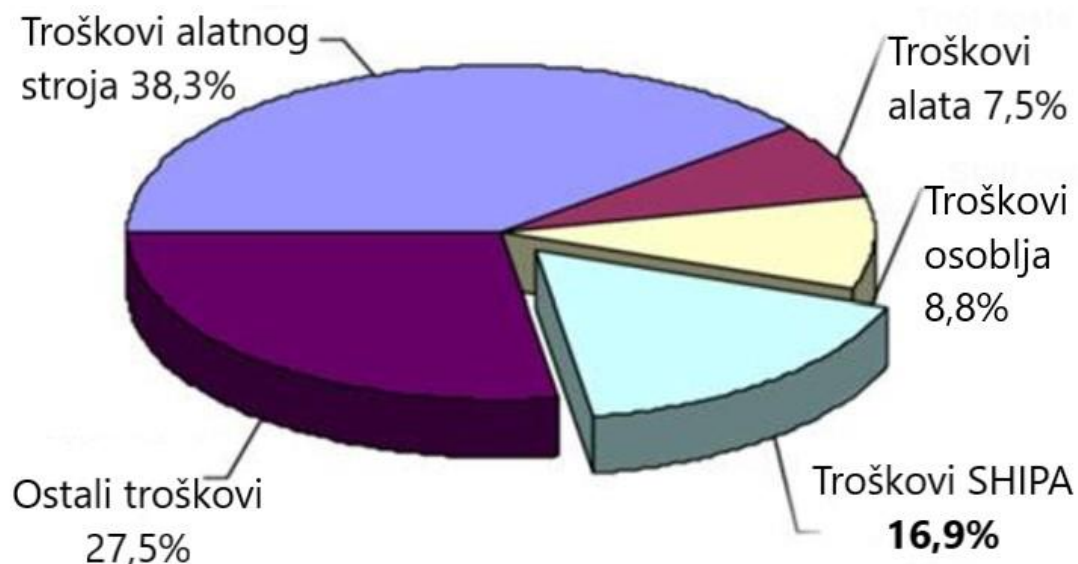
Pod pojmom tvrdih obrada podrazumijeva se obrada obradaka povišene tvrdoće. Kod tokarenja to su često tvrdoće iznad 45 HRC iako nije rijetkost obrada obradaka tvrdoće između 58 i 68 HRC. Materijali obradaka su legure otvrdnutog čelika, alatni čelik, superlegure, toplinsko obrađeni dijelovi dobiveni sinteriranjem praha...

Takav način obrade svoju primjenu većinom nalazi u završnoj obradi kojoj su imperativ točnost dimenzija (postizanje tolerancija) i točnost oblika. Tvrdo tokarenje pokazalo se kao zamjena brušenju. U pogledu ekonomičnosti, u proizvodnom sustavu nije potreban još jedan stroj, radnik na njemu te je smanjeno vrijeme rukovanja (stezanje i otpuštanje). Uporabom CBN-a za rezanje bez SHIP-a (u nastavku detaljnije) povećala se produktivnost i efektivnost tvrdih obrada.. Takvim načinom tokarenja moguće je obraditi više oblika površina nego brušenjem. Zbog toga bi tvrdo tokarenje trebalo kada je god moguće zamijeniti operacije završnih obrada. Naravno, utjecajni faktori poput krutosti, načina stezanja i vibracija na tokarilicama ograničavaju kvalitetu. Također, udarna opterećenja koja se javljaju prilikom tokarenja tvrdih obradaka su velika te je potrebno smanjiti njihov utjecaj skošenjima ili zaobljenjima dijelova na mjestima gdje je kontura prekinuta npr na utoru za pero.

2.3.3. Suhe obrade

Suhe obrade općenito svoju primjenu pronalaze zbog tri glavna razloga:

- zaštite zdravlja operatera na strojevima (SHIP može izazvati oboljenja kože i dišnih putove)
- zaštita okoliša
- cijena (SHIP košta i kod nabave i kod zbrinjavanja)



Slika 3. Troškovi automobilske industrije u Njemačkoj [28]

Još neki od razloga korištenja suhih obrada su povoljan utjecaj na prevučene TM, te općenito dulji vijeka trajanja alata osjetljivih na temperaturni šok. Kako nema SHIP-a koji je znatno niže temperature nego temperature u zoni obrade, smanjena je mogućnost toplinskih napuknuća jer ne dolazi do velikih i naglih promjena u temperaturi. Suhe obrade se preporučuju za visokobrzinske obrade glodanjem zato što je za razliku od tokarenja više oštrica u zahvatu te se naizmjenice hlade. Kod bušenja dubokih provrta je pak gotovo neophodan SHIP jer je otežano evakuiranje odvojene čestice, a s njom i topline te se svrdlo konstantno nalazi u zoni utjecaja topline. Industrije se suočavaju s visokim političkim

pritiskom i strogim zakonima zbog problema uzrokovanih korištenjem prirodnih resursa i zagađenjem okoliša te se moraju orijentirati suhim obradama. Prednosti suhih obrada su također izostanak troškova nabave, skladištenja i zbrinjavanja SHIP-a te opreme za njegovu eksploataciju na stroju. Obradak nije potrebno čistiti od SHIP-a te je uvjetno poboljšana preglednost. Jednako povoljan utjecaj je na okoliš kao i na radnika (operatera) stroja jer ne dolazi u doticaj s kožom i nema udisanja jer se SHIP atomizira i ulazi u respiratorni sustav što je izraženije kod visokobrzinskih obrada. Nedostatci suhih obrada su odvođenje odvojene čestice što predstavlja problem kod stvaranja naljepaka kod obrade aluminijskog materijala, otežana je obrada glodanja vatrootpornih čelika te ne odnosi prašinu koja se stvara (ne veže ju na sebe). Najveću brigu kod suhog tokarenja predstavljaju neželjene promjene mikrostrukture na površini obratka i formiranje vlačnog naprezanja. Kako bi se kod suhih obrada omogućilo efikasnije odvođenje odvojenih čestica, razvijaju se nove konstrukcije alatnih strojeva, a određeni učinci (kod obrade određenih vrsta materijala) se postižu primjenom stlačenog zraka i/ili vakuuma. Problem kod suhih obrada može nastati ako se odvojena čestica vrati neposredno na mjesto rezanja te se troši energija i oštrica na „ponovno rezanje“ već odvojene čestice. U takvom slučaju koristi se komprimirani zrak. Komprimirani zrak nije štetan za ljude i okoliš a niti za alatni stroj te troškovi vezani uz njega nisu visoki. Intenzivnost hlađenja mu je manja od SHIP-a te se ta prednost koristi kod obrade alatima od CBN kako ne bi došlo do njegovog pucanja uslijed toplinskih naprezanja.

Dosadašnji način dopremanja SHIP-a u zonu rezanja je takav da se kontinuirano dovodi velika količina na prednju površinu alata što je neefikasno. SHIP doveden u prekomjernoj količini uopće ne može doseći zonu obrade jer ga odbija odvojena čestica. Obrada minimalnom primjenom SHIP-a (MQL) je strojna obrada u kojoj se mješavina zraka i minimalne količine SHIP-a disperzira direktno u zonu rezanja pod visokim tlakom. Koristi se ejetor gdje se komprimirani zrak koristi za raspršivanje SHIP-a. Prolaskom zraka kroz Venturijev cijev, suženje ejetora stvara Venturijev efekt i povlači SHIP u ejetor te se nastala mješavina raspršuje po izlasku iz ejetora. Međutim, nastala „magla“ predstavlja opasnost po zdravlje operatera.

Alat može biti oblikovan tako da se SHIP dobavlja kroz njega u zonu utjecaja topline tako da je sredstvo pod visokom tlakom ispušteno kroz provrt na njemu do prednje površine reznog alata. Rashladno sredstvo je moguće na tako učinkovitije dobiti u zonu rezanja nego ejetorom. Ovisno o funkciji i vrsti SHIP-a ako je primarni zadatak podmazivanje koristi se postupak obrade minimalnom količinom SHIP-a (MQL).

Ako je pak primarni zadatak hlađenje i podmazivanje takav postupak se naziva MQLC. Nije rijetkost da se u MQL obradama koriste biljna ulja i sintetički esteri koji su biorazgradivi.

Kriogene obrade su obrade koje se koriste tehnologijom dubokog hlađenja kod kojih se koriste kriogenici za hlađenje alata i/ili obratka tijekom procesa obrade. Korištenje kriogenika za hlađenje alata kod strojne obrade počelo je ranih 50-ih godina prošlog stoljeća. Kriogenici koji su se koristili bili su ugljični dioksid i freon koji su se nanosili na obradak prije procesa obrade. Pretjeranim korištenjem kriogenika jako su se povećali troškovi obrade te osim toga takav način aplikacije nije pružao podmazivanje nego samo hlađenje. Kriogenik koji se danas najčešće koristi je tekući dušik. Takve metode obrade danas su poželjne jer su prihvatljive za zdravlje i okoliš te su čiste. Moguće su povećane brzine rezanja bez povećanja trošenja alata što je s aspekta ekonomičnosti opravdano. Također su omogućene obrade tvrdih i teško obradivih materijala uz bolju kvalitetu površine te time i samog proizvoda.

3.HIBRIDNE OBRADNE

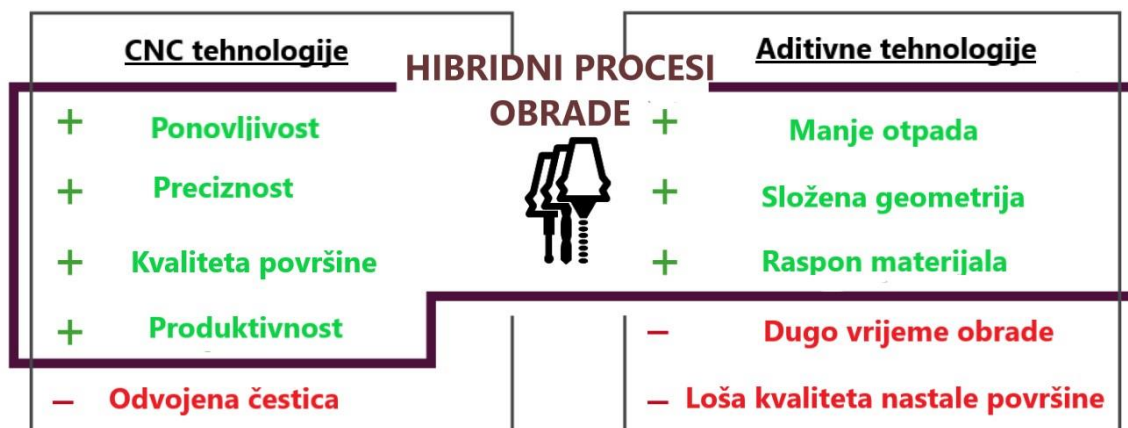
Složeni oblici, uske tolerancije, precizne završne obrade, i strogo određen dizajn, zahtijevali su istraživanje i pronalaženje novih metoda obrade koje su u stanju obraditi teško obradive materijale i materijale neprimjerene konvencionalnome načinu obrade. Izvorna ideja koja se krije iza hibridnih obrada je zapravo sraščivanje kombinacija konstitutivnih procesa obrade u cilju savladavanja nedostataka jednog, prednostima drugog u svrhu efikasnog uklanjanja odvojenog materijala. Razlog takve kombinacije su većinom povećanje produktivnosti, efektivnosti, kvalitete obrađene površine i uštede. Proizvodnja složenih dijelova uključuje mnogo različitih procesa obrade na kojima se premještanjem s jedne obrade na drugu gubi mnogo vremena, a samim time i novca (narušen Kaizen princip) te otvara prostor pogreškama kod rukovanja, stezanja i sl. Jedan od bitnih nedostataka takvog načina proizvodnje je i zauzimanje prostora različitim proizvodnim ćelijama. Ekonomska prednost ostvaruje se razvojem stroja koji ima u sebi mogućnosti više načina obrada.

Hibridne procese obrade može se kategorizirati u dvije kategorije:

- procese u kojima su svi konstitutivni procesi izravno uključeni u odvajanje materijala
- procese u kojima samo jedan proces izravno sudjeluje u odvajanju materijala, a drugi samo pomaže odvajanju materijala olakšavajući uvjete obrade

3.1. Aditivne tehnologije kao dio procesa u hibridnim obradama

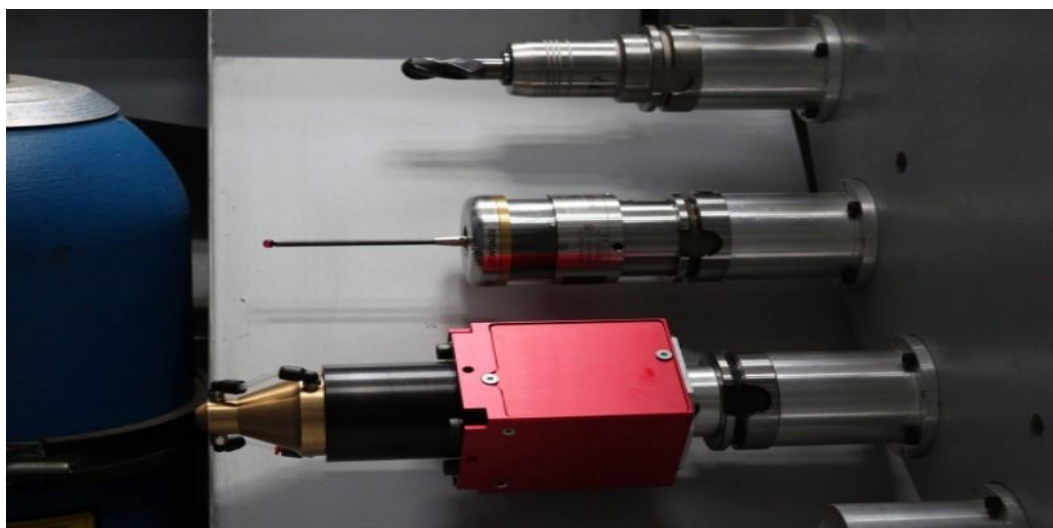
Aditivna tehnologija je jedan od rješenja čijim se procesima može ostvariti proizvodnja širokog spektra složenih geometrija uz iznimno veliko iskorištenje materijala ali uz nedostatak kvalitete nastale površine, velikog vremena izrade te slabe točnosti. Iz stajališta konvencionalnih CNC obrada svi ti nedostaci su zapravo njihove prednosti. Jedna od prvih aditivnih tehnologija u kombinaciji s CNC tehnologijom bila je uvođenje lasera.



Slika 4. Usporedba CNC tehnologije i aditivnih tehnologija [5]

3.1.1. Laser kao dio aditivnih tehnologija

Prvi korak napretka je bio najpovoljniji način aditivne proizvodnje koji će biti dodan CNC stroju bez promjene tog stroja iz temelja. Kao odgovor na to pitanje javio se proces laserskog oblaganja. Ideja je izvorno bila dodavanje aditivne tehnologije koja se može primijeniti na strojevima bez obzira na njihovu starost. Odgovor na problem programiranja lasera na CNC stroju bio je jednak onome programiranju postojećih strojeva. Na takav način je programer u stanju razumjeti, voditi i uređivati naredbe za hibridni proces, kao i dosadašnje putanje alata. Razuman odabir smještaja glave za lasersko oblaganje je u glavno vreteno, a prihvat je izveden poput držača alata [6]. Takvom kombinacijom npr laserskog oblaganja i 5 osnog glodanja moguće je postići reparaciju dijelova koji su skupi za ponovnu proizvodnju kao što su turbinske lopatice oštećene kavitacijom.



Slika 5. Identičan držač alata, ticala i glave za lasersko oblaganje [6]

3.2. Ultrazvučna tehnologija kao dio procesa u hibridnim obradama

U obradama potpomognutim ultrazvučnom tehnologijom radi se o dodavanju male amplitude vibracija (1-15 μ m) frekvencijama 10-80 kHz koja je dodana alatu ili obratku u gibanju. U većini sustava radi se o ultrazvučnim frekvencijama raspona 18-25 kHz. te se vibracija ostvaruje piezoelektričnim efektom. Smanjenje sila rezanja i produženi vijek trajanja alata razlog su korištenja takve tehnologije. Također, olakšana je obrada elastičnih ili krutih materijala poput keramike, kvarca, PCD-a i grafita. Obrada keramike je jako zahtjevna jer mora biti obrađivana procesima u kojima se ne razvijaju prevelike temperature, obradom koja nije kemijska obrada i obradom u kojoj nema utjecaja električne energije kako bi mikrostruktura i fizikalna svojstva ostala nepromijenjena. Takva primjena pronalazi se u kombinaciji korištenja ultrazvučne tehnologije s konvencionalnim obradama tokarenja, brušenja i glodanja. Kod metala, pozitivan efekt očituje se u kvaliteti površine, nema nastanka potpovršinskih oštećenja te je smanjena zona utjecaja topline. Trik je u tome da se vibracija mora primijeniti u pravom smjeru. Kod kompozita baziranih na aluminiju koji su ojačani silicijevim karbidima vibracija se može primjenjivati samo ako nije u radijalnom smjeru obratka. Na takav način moguća je obrada silikona koja daje znatno bolju površinsku kvalitetu. Učinci ultrazvučne tehnologije nisu uvijek pozitivni. Kod obrade utora vibracija u smjeru alata može sitnim udaranjem alata u površinu rezultirati pukotinama.

4. UNAPRJEĐENJA KONVENCIONALNIH POSTUPAKA OBRADE ODVAJANJEM ČESTICA

4.1. Bušenje

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) koji se upotrebljava za bušenje provrta manjih promjera (5-10 mm) ili proširivanje provrta većih promjera. Izvodi se na alatnim strojevima, pretežno bušilicama, pri čemu je glavno gibanje kružno kontinuirano, a posmično gibanje pravolinijsko kontinuirano i izvodi se istodobno kad i glavno gibanje (kod blanjanja je drugačije). Ako se obrada izvodi na bušilicama sva gibanja izvodi alat. Alat za bušenje je svrdlo, definirane geometrije reznog dijela, s dvije glavne rezne oštrice i jednom poprečnom oštricom koja otežava obradu.

Svrkla se dijele na: spiralna svrdla, svrdla za središnje uvrte te posebna svrdla za duboko bušenje.

Bušenje karakterizira:

- promjenjiva brzina rezanja duž glavne oštrice
- promjenjivi kutovi rezanja duž glavne oštrice
- otežano odvođenje odvojene čestice i dovod SHIP-a
- mala krutost sustava

S obzirom na procese OOC, bušenje se u odnosu na tokarenje i glodanje ističe tako da je za razliku od njih proces obrade "sakriven" u materijalu te iz opažanja nije moguće učiti i razvijati proces bušenja. Nevidljivost je jedan od faktora zašto i danas nije bušenje razumljivo do najsitnijih detalja. Dio koji je nedovoljno istražen su vibracije koje nastaju prilikom bušenja. Neki provrti nastaju prvoklasno, dok su neki nedostatni zahtjevima što se na kraju očituje u visokoj cijeni koštanja. Da bi razumjeli na koji način je moguće primijeniti poboljšanja potrebno je ući u srž problema. Rezonancijom prilikom početka obrade između obratka i alata javljaju se vibracije kod kojih je moguće čuti zvuk udaranja alata u obradak. Kako svrdlo počinje penetrirati u materijal, na oštricama se javljaju momenti torzije. Taj problem uzrokuje "omatanje" svrdla oko svoje osi te se ono želi izdužiti, ali je to nemoguće zbog gnječenja poprečne oštrice obratka jer je u sredini svrdla brzina rezanja jednaka nuli. Kao rezultat javljaju se dvije sile. Jedna sila koja je nastala od momenta torzije te druga koja se opire produljenju svrdla. Na taj način svrdlo se savija između oscilacija tih sila. Zapanjujuće je da se to gibanje može ponoviti i do 30 puta po samo jednom okretaju. Ako se oscilacija takvog gibanja vremenski preklapi s oscilacijom okretanja svrdla nastaje rezonancija te

amplitude rastu. Kao rezultat ostaje nepoželjna valovitost na površini a nije rijetkost niti pucanje alata.

Ozbiljna ušteda mogla se je postići efektivnijim bušenjem provrta na samo jednom krilu zrakoplova na kojem se izvode operacije bušenja 45 000 provrta. Učenjem kako postići te provrte bolje kružnosti, ravnosti i bolje kvalitete površine znatno bi se smanjili troškovi.

Takvom problemu može se stati na kraj:

- usklađivanjem učestalosti vrtnje koja je često iskustveno procijenjena i ovisi o više faktora kao što su materijal obratka i alata, posmaci
- povećanjem krutosti stroja
- oblikovanjem reznih oštrica
- kontrolom utjecaja topline i odvođenja odvojene čestice.

U nastavku rada bit će razrađena poboljšanja postupaka bušenja koja se očituju u alatima, te nekonvencionalni postupak bušenja.

4.1.1. Alat kao osnova za poboljšanja bušenja

Sredinom sedamdesetih, prosječna brzina izrade provrta bila je oko minutu, danas se isti takav provrt može načiniti u samo dvije sekunde. To je u pogledu produktivnosti značio razvoj alata za bušenje. Bušenje je bilo na glasu kao spora operacija zbog konstantnog korištenja iste geometrije alata koja se nije mijenjala desetljećima. Dvije glavne rezne oštrice i jedna poprečna oštrica deformira materijal i uzima golemi dio snage potrebne za obradu.

4.1.2. Razvoj svrdla u SANDVIK-u

Uvođenje keramičkih oštrica kontinuirano su se smanjivala vremena obrada. Davne 1977 proizvođač alata SANDVIK Coromant proizveo je svrdlo s umetcima koje je moglo izraditi provrt deset puta brže u odnosu na klasično svrdlo od brzoreznog čelika. Sastojao se od dva bočna i jednog središnjeg umetka svaki sa svojom zadaćom i preklapanjem međusobnih putanja kako bi se postigla dobra svojstva po čitavom promjeru provrta. Rubovi reznih oštrica su bili opremljeni sa specijalno razvijenim načinom otkidanja odvojene čestice. To je rezultiralo smanjenjem širine odvojene čestice koja se lakše evakuirala iz zone obrade. Najveći problem tada i sada bilo je začepeljivanje žljebova za odvođenje odvojene čestice jer je svrdlo prodiralo vrlo brzo u materijal. Praćenje geometrije i boje

odvojene čestice je veoma bitno za razvoj takvih svrdala. Daljnji razvoj se temeljio na zaobljivanju žljebova na tijelu svrdla kako bi se učinkovitije evakuirala odvojena čestica te dovođenje SHIP-a neposredno u zonu obrade. Dubine bušenja su se time povećale na 5 puta veličine promjera svrdla. Treća faza razvoja je postizanje IT 13 tolerancija s umetcima za koje se smatra da su namijenjeni isključivo za grubu obradu. Takva obrada postignuta je osobito kod ulaska svrdla u materijal rasporedom sila rezanja koje su distribuirane "malo po malo" duž reznih pločica i imaju pozitivan utjecaj na balansiranje sila rezanja. Također su razvili svrdla s mogućnošću upuštanja koja mogu u jednom prolazu vršiti dvije operacije.

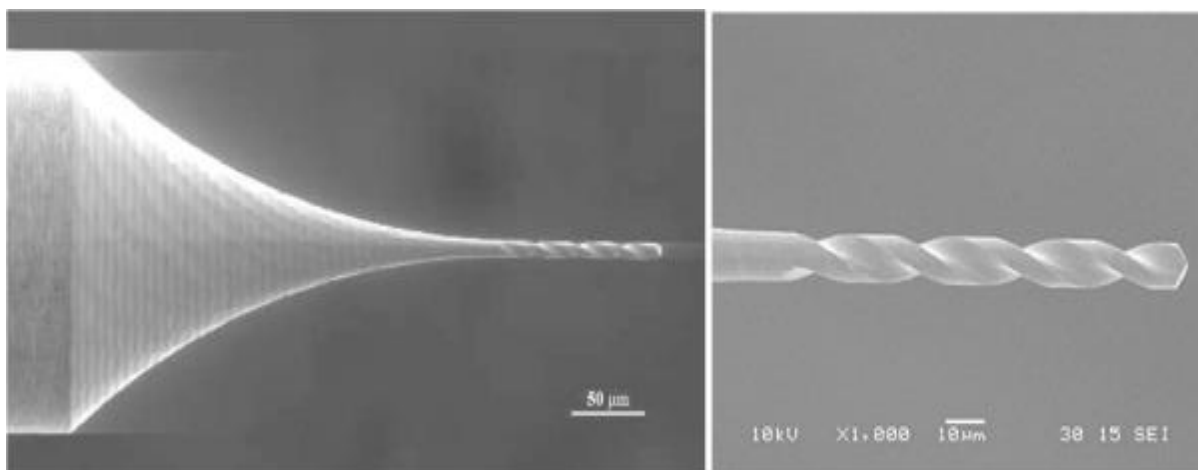


Slika 6. Svrdlo s mogućnošću upuštanja proizvođača SANDVIK [27]

4.2. Mikro bušenje

Definicija mikro bušenja je proizvodnja provrta veoma malih promjera (0.5 mm prema manjima). Ta tehnologija je nastala i razvija se paralelno u skladu s trendom smanjivanja dimenzija dijelova koji se osobito koriste u elektronici, i medicini. Pogodan primjer dijela koji se izrađuje takvim načinom izrade je filter koji se koristi u medicinske svrhe. Filter se sastoji od pločice titana na kojoj je raspoređeno 400 mikro provrta. Drugi primjer je matična ploča na računalu koja zahtijeva veoma malene provrte kako bi se komponente mogle smjestiti na nju. Mikro bušenje može se ostvariti gotovo na svim materijalima kao i konvencionalno bušenje. Materijal alata za mikro bušenje je ili volframov karbid ili čelik ojačan kobaltom. Prioritet za takvo bušenje su ravne površine jer svaka neravnina predstavlja otklon alata u odnosu na željeno središte provrta. Unatoč tome, moguće je i bušenje pod kutem ali je potrebna posebna priprema u vidu laganog zarezivanja površine pri čemu je to polazna točka bušenja (ekvivalent zabušivanju). Moguće je također mikro bušenje polimera pri čemu treba posebnu pozornost obratiti na zagrijavanje materijala kako ne bi došlo do sljepljivanja i narušavanja geometrije provrta.

Za precizno mikro bušenje potrebno je imati stroj bez ikakvih zračnosti, osobito držače alata.



Slika 7. Svrđlo za mikro bušenje [7]

4.3. Bušenje potpomognuto ultrazvučnom tehnologijom

Ultrazvučno bušenje je netradicionalan proces strojne obrade abrazivima. Uklanjanje materijala je postignuto izravnim ili neizravnim udaranjem abrazivnih čestica alatom u obradak. NASA je 2000. godine razvila stroj za ultrazvučno bušenje koji je bio mase samo 7 kilograma. Sljedeći njihov razvoj, razvijena je takva "bušilica" smještena na Rover[8].

Ultrazvučni valovi postižu frekvencije više od 20000 Hz, a mogu biti izazvani mehaničkim, elektromagnetskim ili termalnim izvorima energije. Oni se mogu proizvesti u plinovima (zrak), tekućinama i krutinama. Materijal se uklanja na način mikro odvajanja erozijom abrazivnih čestica. Prilikom jednog udarca, alat postiže brzinu od nule do maksimalne kada postiže udarac u obradak koji se ostvaruje između suspenzije vode i abraziva te obratka. Abrazivna suspenzija sadrži fine abrazivne čestice borova karbida, aluminijske oksida ili silicijeva karbida veličine ovisne o gruboj ili finoj obradi. One svojim udaranjem otkidaju mikro dijelove materijala i uklanjaju ga iz zone obrade. Alata je oblikovan cilindrično ili konično kako bi se osigurale ultrazvučne vibracije. Kako ne bi došlo do njegovog oštećivanja, prije upotrebe mora biti očišćen od nečistoća, moraju se ukloniti postojeće ogrebotine i ostvariti fina površina poliranjem. Materijal alata mora biti čvrst i duktilan, takva svojstva mogu se ostvariti niskougličnim čelicima i nehrđajućim čelicima. Veličina alata je jednaka veličini provrta minus dvostruka veličina abraziva. Masa mora biti minimalizirana kako ne bi upijao energiju ultrazvuka.

Parametri obrade su:

- amplituda vibracija 15-50 μm
- frekvencija vibracija 19-25 kHz
- posmak (vezan za geometriju alata)
- veličina abraziva 15-150 μm
- materijal abraziva Al_2O_3 , SiC...
- volumen abraziva u vodenoj otopini

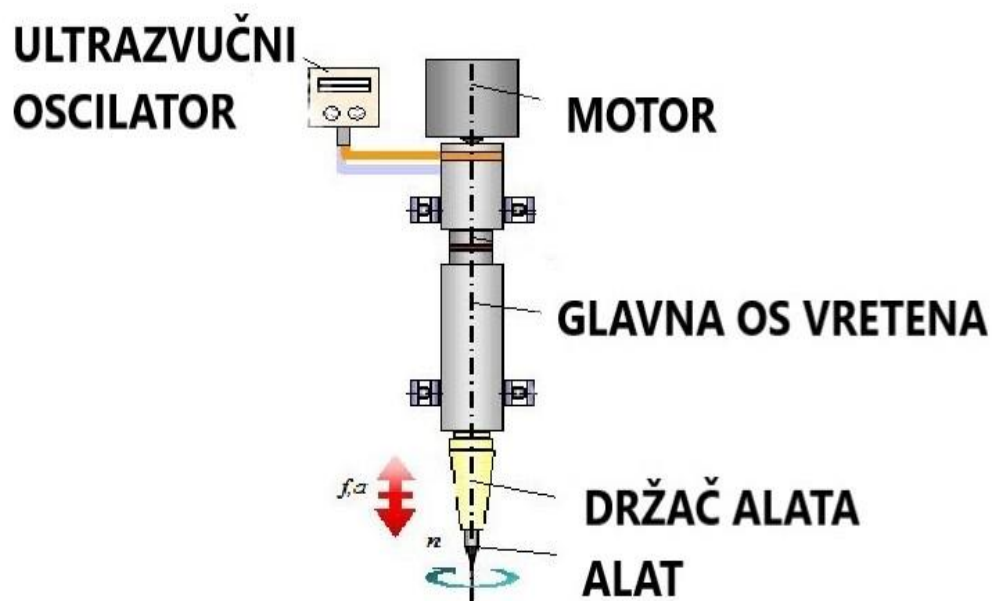
Materijali koji su pogodni za ovakvu obradu su: nehrđajući čelik, staklo, keramika, kvarc, pogodni su za obradu krhkih materijala.

Ograničenja:

- u idealnim uvjetima može se ostvariti penetracija od 5 mm/min
- mala proizvodnost u smislu odvojene čestice
- tolerancija provrta do 0.007 mm

Prednosti:

- potrebna mala snaga
- moguće postići ujednačenu kvalitetu na visokim i niskim temperaturama
- obrada ne utječe kemijski, ili toplinski na površinu
- moguće bušiti cilindrične i necilindrične provrte u tvrdim materijalima



Slika 8. Glavni dijelovi "ultrazvučne bušilice" [9]

5. GLODANJE

Glodanje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) obradnih površina proizvoljnih oblika. Izvodi se na alatnim strojevima, glodalicama, pri čemu je glavno (rezo) gibanje kružno kontinuirano i pridruženo je alatu. Posmično gibanje je kontinuirano, proizvoljnog oblika i smjera i pridruženo je obratku ili alatu.

Alat za glodanje je glodalo definirane geometrije reznog dijela, s više glavnih reznih oštrica koje se nalaze na zubima glodala i mogu biti smještene ili na obodnoj ili na obodnoj i čeonj plohi glodala.

Rezne oštrice periodično ulaze u zahvat s obratkom i izlaze iz njega tako da im je dinamičko opterećenje jedno od osnovnih obilježja. U nastavku rada bit će prikazani današnji trendovi u procesima glodanja i razvoj reznih alata.

5.1. Visokobrzinska obrada glodanjem

Jedna od definicija visokobrzinske obrade je uklanjanje velikog volumena odvojene čestice brzim prolazima glodala. Druga pak se smatra da je to brzina kojom se uklanja dovoljno materijala u samo jednom prolazu za postizanje zadovoljavajućih točnosti. Sve definicije su ispravne jer je poznato da je u prošlosti smatrano kako se povećanjem brzina obrade povećava jedino temperatura i time se narušava kvaliteta ali je danas dokazano da kod nekih materijala temperatura obrade pada upravo povećanjem brzine. Istim istraživanjem [10] pokazano je da se povećanjem do odgovarajućeg broja okretaja mogu smanjiti sile rezanja.

Pod povećanjem brzina rezanja smatra se obrada povećanim brzinama rezanja i povećanim posmacima. S obzirom na to da se VBO u prošlosti razvijala u organizacijama u kojima se nisu obrađivale velike serije, njezin puni potencijal u smislu efikasnosti i produktivnosti je ostvaren tek nedavno. Stanjem na tržištu i praćenjem konkurencije takav način obrade je postao nužan.

Kako bi se klasificirao pojam VBO Schiffer predlaže tri područja obrade [11]:

- klasična obrada, $v_c < 500$ m/min,
- visokobrzinska obrada $v_c = 500$ do 10000 m/min,
- ultravisokobrzinska obrada $v_c > 10000$ m/min.

Poželjno je držati u zahvatu kompletno glodalo radi balansa sila usmjerenih aksijalno prema vretenu jer ako je manje od 60% glodala u zahvatu može doći do odbijanja glodala od obrađivanog komada.

Dužina držača alata je ključna za smanjenje vibracija koje nastaju sličnim mehanizmom koji je opisan kod postupaka bušenja. Glodanje velikim posmacima nije lak zadatak. Kao primjer može se uzeti situacija kada glodalo dolazi do ugla utora pri čemu je nemoguće istim posmakom izvesti promjenu smjera glodala nego je potrebna glađa tranzicija. Također, glodanje velikim posmacima može poslužiti kao odlična alternativa bušenju provrta velikih dimenzija jer je znatno brže.

VBO nije egzaktno određena. Ona ovisi o materijalu obratka, ali se mora i promatrati kao zajednički sustav stroja alata i obratka te njihove ovisnosti. Povećanjem brzina rezanja povećava se specifični volumen odvojenih čestica, i povećava se kvaliteta obrađene površine a smanjuje se vijek trajanja alata i sile rezanja. Velik značaj ima SHIP. Suho glodanje ili glodanje uz primjenu SHIP-a je uvijek dilema, ali je nepobitna činjenica da SHIP u nekim uvjetima može osigurati mnoge benefite kod glodanja.

Neki od zahtjeva za strojeve na kojima je moguća visokobrzinska obrada su:

- krutost stroja (osobito temelja)
- uležištenja rotirajućih dijelova koja mogu podnijeti velike učestalosti vrtnje
- alat mora biti koncentričan i obavezno balansiran (do Φ 40)
- motorvreteno s velikim brojem okretaja (10000–180000 1/min)
- odgovarajuće CNC upravljanje
- sigurnost (kod loma alata moguća je havarija pa je potrebno neprobojno staklo)

Materijali pogodni za takav način obrade su:

- zakaljeni čelici
- tankostjeni materijali
- materijali osjetljivi na toplinske dilatacije
- sivi lijev

Prednosti VBO glodanjem:

- bolja kvaliteta (smanjenje vibracija, manja hrapavost)
- smanjeno vrijeme obrade (povećana produktivnost)

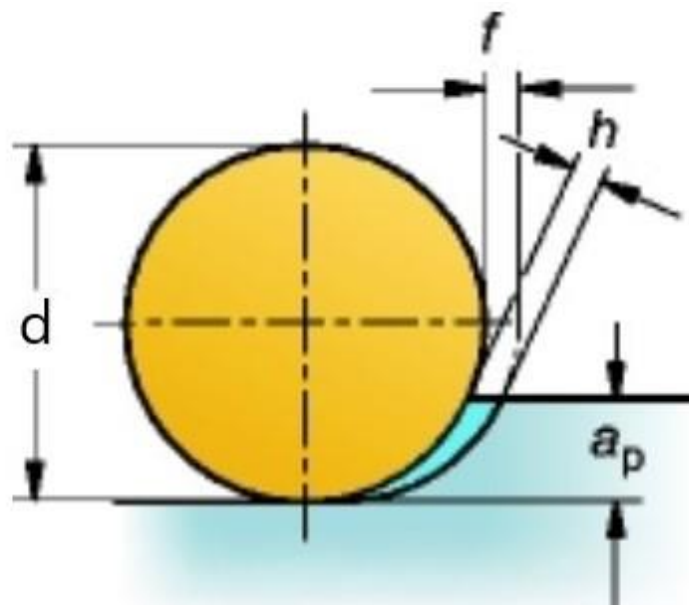
Nedostatci VBO glodanjem:

- troškovi (smanjen vijek trajanja alata i dijelova stroja)
- potrebni bolji alati
- teža kontrola obrade (vizualno praćenje, sustav za hitno zaustavljanje besmislen)

Postupak VBO glodanja treba promatrati kao sustav koji čine alatni stroj, alat, obradak te njihova međusobna sučelja. Isto vrijedi i za ostale VBO obrade.

5.1.1. Glodanje velikim posmacima

Obrada glodanjem velikim posmacima je postupak u kojem se koriste parametri koje karakteriziraju malene dubine rezanja i veliki posmaci s ciljem uklanjanja što je moguće više materijala u što kraćem vremenu. Specifični volumen odvojene čestice je do 3 puta veći nego kod konvencionalnih glodalica uz produženi vijek trajanja alata. Takav postupak pogodan je za alate većeg promjera. Kutovi pločica su veoma bitni, što su manji kutovi, moguće je proizvesti tanju odvojenu česticu, također manji kutovi usmjeravaju sile rezanja u aksijalnom smjeru prema vretenu što je pogodnije za stabilnost. Koriste se trokutaste i kvadratne pločice čim većeg radijusa vrha te okrugle pločice.



Slika 9. Ovisnost veličine odvojene čestice o promjeru pločice [12]

5.2. Razvoj materijala reznih alata za glodanje

Nužni uvjeti VBO su bili alati koji mogu podnijeti takva naprezanja, visoke temperature i imati dobru postojanost pa je upravo VBO u modernijoj povijesti uzrokovala razvoj alata kakvi se danas najčešće susreću..

Neki od materijala reznih alata u upotrebi danas su:

- tvrdi metal tipa P - prevlaka od TiC osigurava visoku otpornost na trošenje stražnje površine alata, dok prevlaka od TiN smanjuje trošenje prednje površine alata te se kombinacijom tih i ostalih prevlaka kombinacijom njihovih svojstava dobiva povoljna postojanost reznih alata
- cermet - je cementirani karbid s tvrdim česticama na bazi titana. U njemu TiC i TiN povećavaju otpornost trošenju, količina kobalta osigurava žilavost te je cermet vrlo otporan na plastične deformacije, može biti prevučen PVD postupcima (poželjna obrada glodanja malim posmacima i izbjegavati SHIP)
- keramika - najpoželjnija za VBO, odlična otpornost na toplinu i trošenje, služe za obradu superlegura, 20-30 puta veće brzine nego kod karbida, ali pri manjim posmacima, pošto je u zahvatu intermitirajuće, puno je manji utjecaj topline nego kod tokarenja te su stoga i brzine povećane, nije poželjan SHIP
- kubični bor nitrid (CBN) - materijal velike tvrdoće, koji je pogodan za VBO, također posjeduje svojstva velike čvrstoće te je otporan na temperaturni šok, primjenjuje se za obradu tvrdih materijala i pogodan je za obradu sivog lijeva
- polikristalni dijamant - je kompozit s česticama dijamanta koji je sinteriran metalnim vezivom, najtvrdi rezni materijal je stoga i najotporniji na abraziju, ima veliku otpornost na trošenje ali smanjenu kemijsku postojanost na visokim temperaturama, primjenjuje se na neželjeznim materijalima te je izrazito pogodan za obradu aluminija većinom kod fine obrade

Pošto su gotovo svi osnovni materijali danas prevučeni prevlakama a materijali reznih alata su slični za obrade tokarenja i glodanja, o prevlakama će biti više govora u daljnjem tekstu.

5.3. Tvrdo glodanje

Postupak tvrdog glodanja veoma je sličan konvencionalnome, no svejedno zahtjeva opremu, znanje o materijalima visoke tvrdoće koji se obrađuju, svjesnost o sposobnostima stroja, alate i držače alata pogodne takvoj obradi. Takav način glodanja može osobito poslužiti za obnavljanje dijelova koji su već bili u upotrebi, a toplinski su obrađeni zbog poboljšanja svojstava- tvrdoće (45-65 HRC) te u alatničarstvu. Strojevi za takvu obradu moraju imati izrazitu statičku i dinamičku krutost. Temeljenje mora biti načinjeno od polimernog betona kako bi dobro upilo vibracije i prigušilo ih. Gotovo uvijek se primjenjuje u kombinaciji s VBO kako bi se dobila zadovoljavajuća kvaliteta površine. Koriste se HSK držači alata te je imperativ imati alat koji nije predugačak zbog povećanja krutosti. Najčešći rezni alat za takvo glodanje su prevučene keramičke pločice. Alat mora biti glodalo s najmanje 4 oštrice kako bi se smanjila odvojena čestica i bili mogući veći posmaci. SHIP nije poželjan jer se prilikom obrade javljaju visoke temperature i onda nije poželjan temperaturni šok, alternativa evakuacije odvojene čestice je komprimirani zrak.

5.4. Mikro glodanje

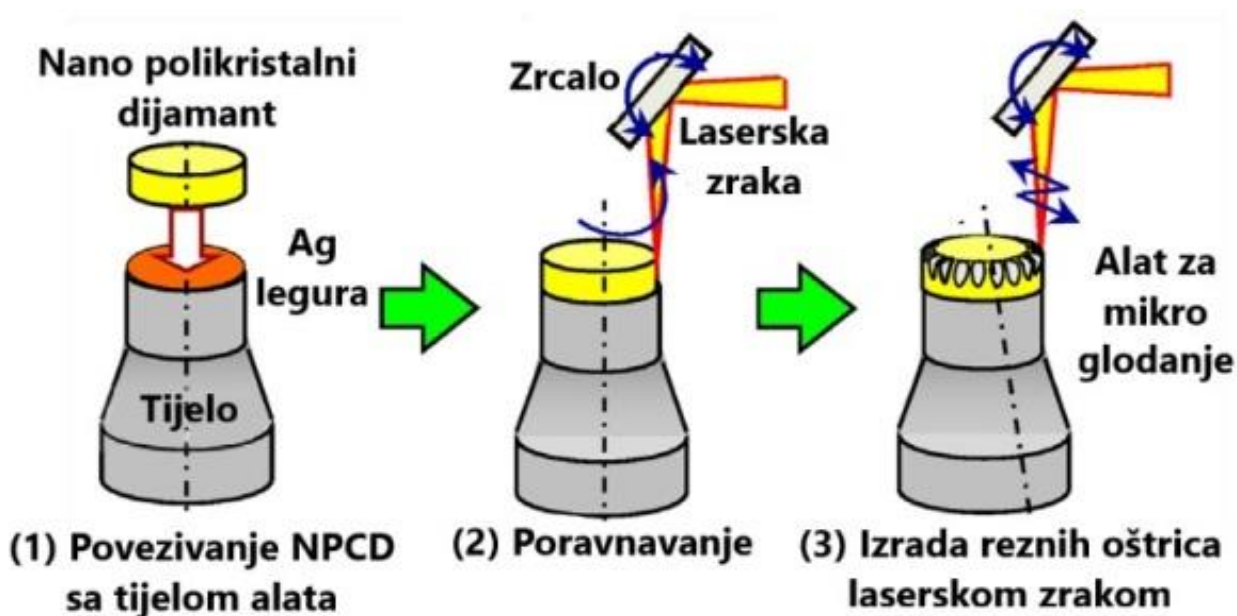
Prilagodba tehnologije glodanja trendovima često je za firme izlazak iz zone komfora. Ali u današnjem društvu promjene su nužne za opstanak. Jedna takva tehnologija nastala po uzoru na švicarski način proizvodnje (precizna industrija) je mikro glodanje. Obrada na takvom stroju je "jaka" koliko i najslabiji njegov dio. Ako samo jedan dio stroja nije 100% ispravan dolazi do škarta. Slično kao i kod tvrdog tokarenja u obzir je potrebno uzeti krutost, preciznost, termalnu stabilnost i vibracije stroja. C izvedba konstrukcije glodalica pokazala se najbolja u pogledu krutosti, jer krutost izravno utječe na točnost obrade. Bez pravilnog temeljenja od polimernog betona nema mikro glodanja. Jedino takva vrsta može osigurati mikro obradu. Za složena gibanja treba uzeti u obzir i ležajeve i trenje u njima. Za mikro obradu nisu rijetka vretena koja pružaju učestalost vrtnje od 50 000 1/min. HSK držači alata su neophodni jer kod velikih centrifugalnih sila pružaju dovoljno snažno stezanje. Mikro obrada može biti frustrirajuća. Kod konvencionalnih glodala moguće je mjeriti alate i obradak te dobiti povratnu informaciju o istrošenosti i točnosti dok kod mikro glodanja to nije slučaj.

Često se primjenjuju laserske mjerne tehnologije. Stezanje i otpuštanje također predstavlja velik problem.

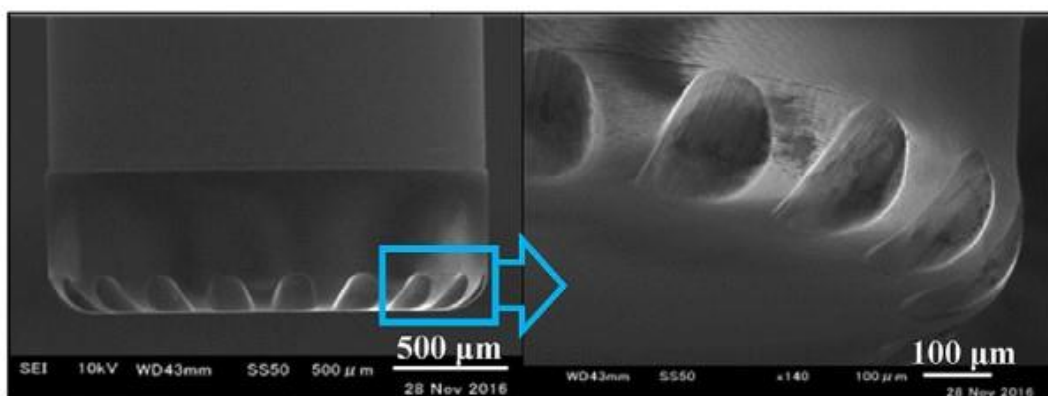
5.4.1. Razvoj alata za mikro glodanje

Kada se govori o unapređivanja, bitno je spomenuti nedavni rad japanskih znanstvenika [13], koji su razvili alat za mikro glodanje od nano polikristalnog dijamanta (NPCD) koji je proizveden pomoću lasera.

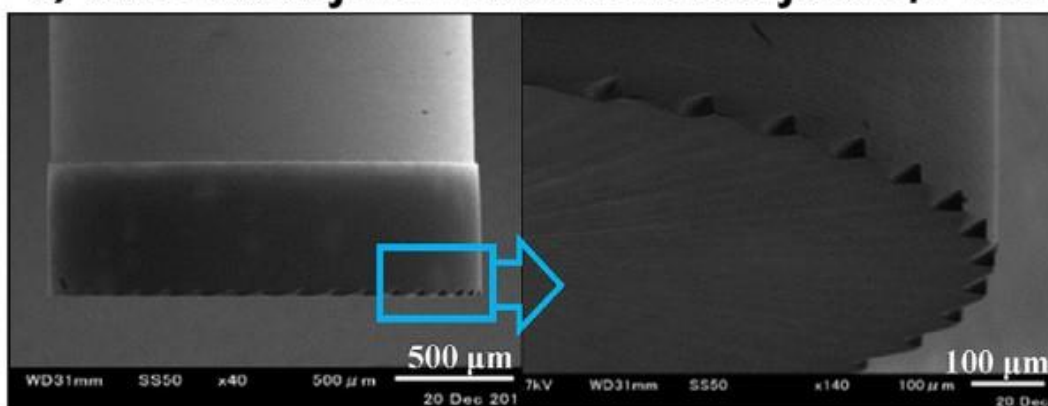
Komad načinjen od NPCD-a su uz pomoć visokofrekventnog sustava za zagrijavanje spojili pomoću srebrne legure za tijelo alata. Pomoću lasera su obradili vanjsku površinu komada od NPCD-a te su u konačnici proizveli rubove (rezne oštrice) glodala.



Slika 10. Postupak izrade mikro glodala laserom [13]



a) alat s zaobljenim rubovima radijusa 0,2 mm



b) alat s oštrim rubovima

Slika 11. Usporedba mikro glodala prije i nakon obrade laserom [13]

Glodalo je bilo potrebno proizvesti zbog obrade mikro kalupa od volframova karbida (WC) i silicijeva karbida (SiC). Svojstva NPCD-a su ogromna tvrdoća i termalna stabilnost.

Tablica 1. Obrada SiC mikro glodalom od NPCD-a [13]

Pregled materijala i režima obrade NPCD mikro glodalom	
Materijal alata:	NPCD
Broj okretaja:	50 000 1/min
Obradak:	Monokristalni SiC
Tvrdoća obratka:	3623 HV
Dubina rezanja:	2 μm
Posmak:	0,04 mm/min
SHIP:	na bazi vode

6. TOKARENJE

Tokarenje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) pretežno rotacijskih (simetričnih i nesimetričnih, okruglih i neokruglih) površina. Izvodi se na različitim vrstama alatnih strojeva, ali pretežito na tokarilicama. Glavno (režno) gibanje je kružno kontinuirano gibanje i najčešće je pridruženo obratku. Posmično gibanje pridruženo je alatu, u osnovi je pravolinijsko kontinuirano, u pravcu paralelnom osi rotacije obratka (os "z") ili u pravcu okomitom na os rotacije (os "x"). Kada su, u određenom omjeru, uključena posmična gibanja u obje osi, nastaje posmično gibanje krivoljnog oblika. Alat za tokarenje je tokarski nož definirane geometrije reznog dijela, s (jednom) glavnom reznom oštricom. Prilikom obrade odvajanjem nastaje odsječeni dio koji se naziva odvojena čestica. Postoje tri osnovna oblika odvojene čestice: lomljena, nasječena i trakasta. Neki oblici su povoljni, a neki oštećuju alat i obradak. Nisu rijetkost pločice s reljefnim prednjim površinama koje pomažu otkidanju odvojene čestice.

PODJELA POSTUPKA

Tokarenje se može podijeliti na osnovi više kriterija podjele:

Prema proizvedenoj kvaliteti obrađene površine:

- grubo, završno (čisto) i fino tokarenje

Prema kinematici postupka:

- uzdužno i poprečno

Prema položaju obrađene površine:

- vanjsko i unutarnje.

Prema obliku obrađene površine

- okruglo, plansko (poprečno), konusno, profilno, oblikovno (kopirno), tokarenje navoja i neokruglo.

6.1. Moderni materijali reznih oštrica za tokarenje

Napredni postupci tokarenja zahtijevaju i materijale koji su pogodni takvim obradama. Prema konstrukciji alati za tokarenje se dijele na:

- monolitne alate gdje je cijeli rezni alata (oštrica i držač) izrađen od istog materijala te se oštrica kada se potroši naoštri
- rezne alate s mehanički pričvršćenim reznim pločicama (pločice imaju više oštrica te se nakon istrošenja jedne, zakrene na drugu), rezne pločice se ne oštire već se bacaju i na istom držaču zamjenjuju

Kada alatni čelici, tvrdi metal i brzorezni čelici svojim svojstvima više nisu bili dostatni modernim režimima obrada i trendovima tokarenja oni su za ozbiljnije upotrebe (VBO) zamijenjeni pločicama od sljedećih materijala (pošto su slični u postupcima tokarenja i glodanja u ovom dijelu rada bit će opisane njihove prednosti u postupku tokarenja, svojstva su navedena u postupku glodanja):

- CBN (kubni bor nitrid)- svoj maksimum daju kod tokarenja neprekidnim ali i isprekidanim rezom tvrdih čelika, mogu se koristiti u završnoj obradi superlegura na bazi nikla, obradi sivog lijeva, obradi veoma abrazivnih čelika
- Keramika- pogodna za tokarenje vatrootpornih superlegura u polu isprekidanom rezu
- PCD- otpornost na abraziju, za tokarenje legura aluminija i kompozitnih materijala

6.1.1 Prevlake

Postupci prevlačenja su od ključne važnosti za današnje rezne alate. Takve prevlake donose benefite poput stabilnosti na vrlo visokim temperaturama (suha obrada), otporne su na plastičnu deformaciju i temperaturni šok. Prva prekretnica je bila u prevlačenju tvrdih metala i brzoreznih čelika a onda se postupak prevlačenja proširio i na gore navedene materijale. Kombinirajući njihova svojstva dobivene su pločice beskompromisnih obilježja.

Postupci koji se primjenjuju za prevlačenje su:

- CVD (Chemical vapor deposition - postupak kemijskog nanošenja iz parne faze)
- PVD (Physical vapor deposition - postupak fizikalnog nanošenja u vakuumu)

Tablica 2. Svojstva postupaka prevlačenja [14]

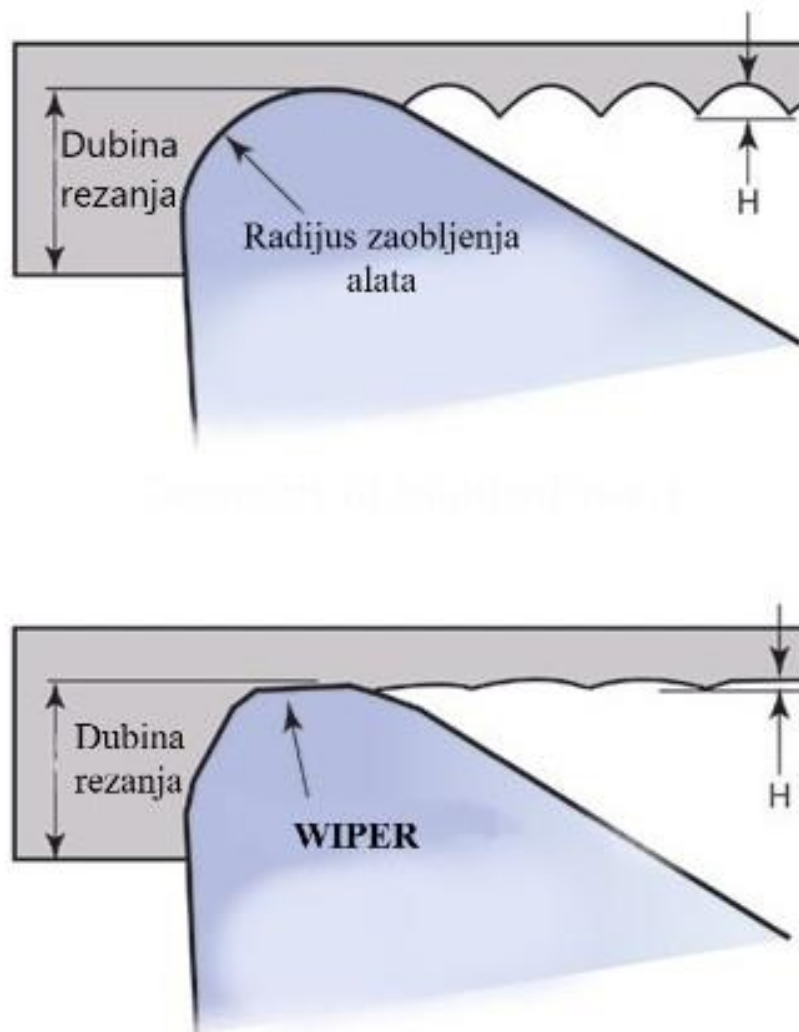
Skraćenica	PVD	CVD
Puni naziv:	Physical vapor deposition	Chemical vapor deposition
Temperatura prevlačenja:	200-500 °C	500-1000°C
Debljina prevlake:	2-7 μm	2-14 μm
Materijali prevlake	TiN, TiCN, TiAlN	TiC, TiCN, TiN, Al ₂ O ₃ , ..
Više slojeva	da	da

Tablica 3. Svojstva prevlaka [14]

Materijal:	Tvrdoća [HV]:	Boja:
Titan karbonitrid - TiCN	4000	srebrna
Titan aluminij nitrid - TiAlN	2600	smeđa
Titan nitrid - TiN	2900	zlatna
Krom nitrid - CrN	2500	srebrna
Cirkonij nitrid	2800	zlatna
Amorfni DLC	1000-5000	crna

6.2. Wiper geometrija reznih oštrica za tokarenje

Wiper geometrija alata krije se u razlici vrha alata. Vrh alata je kombinacija radijusa (zaobljenja) umjesto jednoga. Takve pločice su u stanju tokariti iznimno visokim posmacima što dovodi do velike uštede u vremenu obrade bez bojazni o kvaliteti obrađene površine i sposobnosti otkidanja odvojene čestice. Wiper geometrija je primarno dizajnirana za ravna linijska tokarenja te poravnavanja čela.



Slika 12. Razlika alata sa standardnim radijusom i alata s WIPER geometrijom [15]

Wiper geometrija reznog dijela, u odnosu na obradu klasičnim reznim oštricama s konvencionalnom geometrijom omogućuje istu hrapavost uz dvostruko veći posmak, odnosno dvostruko manju hrapavost uz isti posmak.

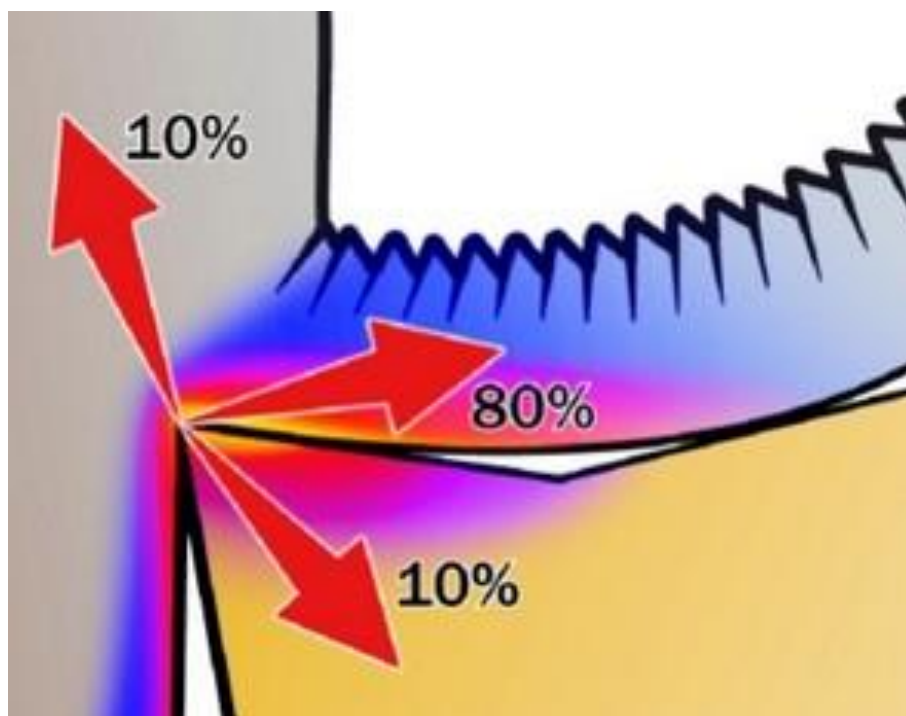
6.3. Tvrdo tokarenje

Tvrdo tokarenje počelo se razvijati devedesetih godina prošloga stoljeća. Razlog tome bio je dostupnost novih materijala alata i razvoj tokarilica koje su bile dovoljno krute, stabilne i precizne za takvu vrstu tokarenja. Za tvrde materijale bila je to odlična alternativa brušenju,

tj završnoj obradi. Kod tvrdog tokarenja radi se o obradi materijala tvrdoće veće od 45 HRC, najčešće 54-70 HRC. Tipični primjeri proizvoda obrađenih tvrdim tokarenjem su: sjedala ventila, klipovi, kućišta spojki. Za tvrdo tokarenje čelika nije se mogao koristiti dijamant jer reagira s ugljikom. Njegovo mjesto u tome zauzeo je CBN (u kombinaciji s keramikom). Za postizanje dovoljne kvalitete tvrdih obradaka potreban je negativan prednji kut alata od CBN-a, ali kod tokarilica slabije konstrukcije takav kut alata može izazvati vibracije što neminovno narušava kvalitetu obrade.

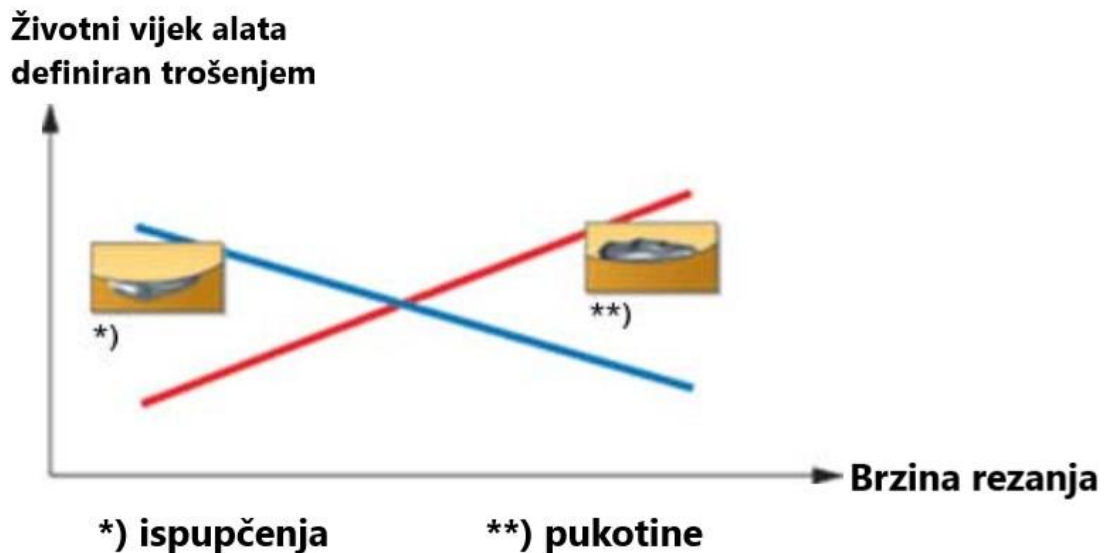
U pogledu sila, za razliku od konvencionalnog tokarenja gdje je najveća glavna sila rezanja F_c , kod tvrdog tokarenja najveća je natražna sila F_p . Razlog tome se krije u formiranju odvojene čestice na vrhu alata kod negativnog prednjeg kuta.

Za komade stegnute samo u steznoj glavi, preporučuje se omjer duljine i promjera do 2:1. Tvrdo tokarenje bez SHIP-a je preporučljivo, osobito alatom od CBN jer je otporan na temperaturu jer se velika količina topline odvodi pomoću odvojene čestice. Prednosti takvog tokarenja su eliminacija svih problema vezanih uz SHIP uz možda najvažniju ekonomičnost. Iz slike 13. vidi se važnost uklanjanja odvojene čestice iz zone obrade.



Slika 13. Približna raspodjela topline kod tokarenja tvrdih materijala [16]

Pukotine na obratku, uzrokuju postupno trošenje alata, ali ne utječu na kvalitetu obrade, dok ispučenja postepeno utječu na kvalitetu obrade.



Slika 14. Ovisnost brzine rezanja i životnoga vijeka alata [17]

6.4. Mikro tokarenje

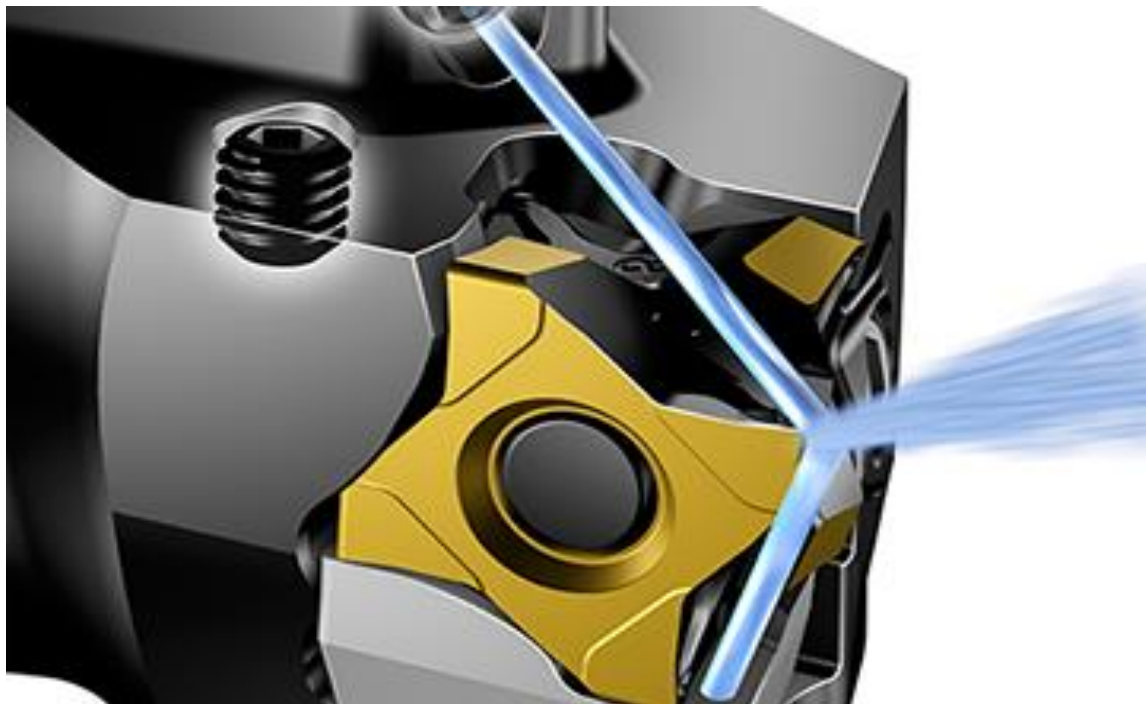
Mikro tokarenje je kao i tvrdo tokarenje obrada veoma slična konvencionalnome tokarenju. Nedavan razvoj mikro i nano tehnologije doveo je do većih zahtjeva za proizvodima koji su reduciranih dimenzija. Gornja granica koja je usvojena između mikro i makro obrada je 500 μm . Najznačajniji element koji razdvaja mikro tokarenje od konvencionalnog su sile koje se javljaju prilikom obrade. One su te koje utječu na točnost obrade i limitiraju veličine obradaka. Smanjivanjem promjera obratka, smanjuje se i njegova krutost. Vrijednost glavne sile rezanja mora biti manja od vrijednosti sile koja može plastično deformirati obradak kako bi se spriječilo izvijanje. K. M. Rezaur Rahman [18] istraživao je razne utjecaje parametara obrade mikro tokarenja niklanog materijala. Zaključio je da se sile rezanja povećavaju s povećanjem brzine rezanja i posmaka ali da nemaju utjecaja na kvalitetu obrađene površine i trošenje alata. Kai Liu and Shreyes N. Melkote zapazili su da se kod mikro tokarenja aluminijskih legura hrapavost površine povezana s posmakom, smanjuje do određene točke, a kasnije se povećava sa smanjivanjem posmaka [18]. Teško je definirati

mikro tokarenje parametrima koji ga obilježavaju. Osim neophodnih uvjeta za točnost, krutost, preciznost i upravljanje stroja bitno je i poznavanje materijala koji se obrađuje i njegove mikrostrukture (oblik i raspored kristalnih zrna). Kada se radi o trošenju alata, ono se očituje u mikropukotinama i mikro zarezima koji nastaju pri različitim parametrima na različitim materijalima.

Kako je to veoma delikatan proces, za određeni materijal postoje strogo određeni parametri koji se vežu uz njih i pojave koje nisu karakteristične konvencionalnom tokarenju pa se ne može govoriti o jasno definiranim silama, gibanjima i parametrima te uvjetima na kojima se postižu najbolje obrade.

6.5. Suho tokarenje i tokarenje s minimalnom količinom SHIP-a

Obradak i alat su prilikom tokarenja bez upotrebe SHIP-a izloženi velikom termalnom opterećenju zbog povećanog trenja i nedostatka odvođenja topline pomoću istog. Takva termalna naprezanja mogu izazvati deformacije obradaka i alata. Iz ekonomskog, zdravstvenog i aspekta zbrinjavanja SHIP-a, suho tokarenje je veoma poželjno. Nezaobilazan alat koji pogoduje takvoj obradi je rezna oštrica od CBN-a jer je otporna na visoke temperature ali cjenovno odskače od jeftinije keramike. Kao alternativa postupcima tokarenja koje je teško izvesti "na suho", te kako bi se eliminirali svi negativni utjecaji SHIP-a razvijene su obrade s minimalnom količinom SHIP-a (MQL). Kao alternativa konvencionalnom načinu dovođenja SHIP-a u kojem se velika količina dovodi konstantno i koji je neučinkovit u MQL obradama se ekstremno mala količina ubrizgava u zonu obrade u obliku finih raspršenih kapljica u mješavini sa zrakom s velikim tlakom (HPC) i vrlo velikom brzinom od čak 100 m/s. Za takav način obrade koriste se atomizeri koji na principu Venturijeve cijevi dovode malu količinu SHIP-a u struju zraka. Naravno da je za to potreban adekvatan držač alata te pripadajući sustav za postizanje tlaka zraka. Kao novi utjecajni parametar javlja se smještaj mlaznica u zoni obrade koji može uz minimalan protok postići maksimalan učinak poboljšanja. Odgovor na to javio se apliciranjem minimalne količine SHIP-a kroz alat a ne kroz mlaznicu. Takav smještaj aplikacije SHIP-a je strogo preporučeno za fine obrade,



Slika 15. Dovod SHIP-a na alatu CoroTurn 300 [19]

SHIP pod tlakom, pomaže otkidanju odvojene čestice a impuls sile za otkidanje ovisi o promjeru mlaznice i gustoći SHIP-a. SHIP se može dovoditi s gornje i donje strane pločice kod tokarenja (slika 15.). Postavlja se pitanje kada je najbolje koristiti koju opciju dovođenja. Dovođenje SHIP-a s gornje strane pločice koristi se kada postoje problemi s kontrolom odvojene čestice, ako je loša kvaliteta površine uzrokovana otkidanjem odvojene čestice. Dovođenje SHIP-a s obje strane koristi se kod problema povišene temperature, pretjeranog trošenja alata, lošeg odvođenja odvojenih čestica[20]. Mjesto za poboljšanje i napredak takvih obrada nalazi se u poboljšanjima kvalitete površine, trošenja alata i smanjenju sila rezanja te u manjem utrošku energije (dobra strana konvencionalne primjene SHIP-a).

7. PRIME TOKARENJE

Prime tokarenje je inovacija u tokarenju koju je nedavno plasirala tvrtka SANDVIK kako i oni sami kažu „otkad tokarenje postoji“ [4]. S potrebom za smanjivanjem vremena obrade, povećanja efektivnosti i produktivnosti proizašla je ideja o prime tokarenju. Povećanjem specifičnog volumena odvojene čestice u jedinici vremena, boljom iskoristivosti stroja i manjom cijenom koštanja, obrada prime tokarenjem zvuči kao odlično rješenje. Jednostavnim rječnikom prime tokarenje predstavlja tokarenje u svim smjerovima što donosi sve navedene prednosti. Konvencionalnim tokarenjem kod naglije promjene konture s jednog promjera na drugi do sada su trebale i do tri vrste alata (lijevi, desni i neutralni nož) a sada je to zamijenjeno sa samo jednim. S malim kutom namještanja glavne oštrice, u „suprotnom“ smjeru tokarenja, stvarala se duga zakrivljena odvojena čestica. Tokarenje od stezne glave prema kraju obratka do sada nije bilo moguće zbog malog kuta namještanja glavne oštrice jer je upravo mali kut namještanja glavne oštrice u „suprotnom“ smjeru obrade definirao jako lošu kontrolu odvojene čestice i lošu kvalitetu površine. Ova nova metoda i pripadajući alati elegantno rješavaju lom odvojene čestice u svim smjerovima. Novost je u tome da u kojem god smjeru se obrađuje uvijek se dobiva dojam da su vrh alata, oštrica i površine alata na pravom mjestu. S obzirom na to da je postignuta sloboda u gibanju, sada se lako prelazi s npr. grube na finu obradu bez vraćanja alata na početnu točku obrade u dostavnom gibanju koje je neproduktivno, već samo s izmjenom parametara obrade može se krenuti u nastavak obrade. Do sada tokarenje s manjeg promjera prema naglom prijelazu na veći moglo je uzrokovati zaglavljivanje odvojene čestice u kutu, ali tokarenjem od većeg promjera prema manjemu bolja je evakuacija odvojene čestice gdje se povezano s time smanjuje temperatura i trošenje alata. Ključni faktori ovakve obrade su sile rezanja pri ulasku u materijal i debljina odvojene čestice. Novi način razmišljanja kod programiranja stroja je dio u kojem je potrebno svijest prilagoditi tako da je alat u konstantnom zahvatu. Sada, sa samo jednim alatom su moguća gibanja po z osi u oba smjera, poravnavanje čela i profilno tokarenje. Ušteda u vremenu u samo jednoj zamjeni alata je ogromna.

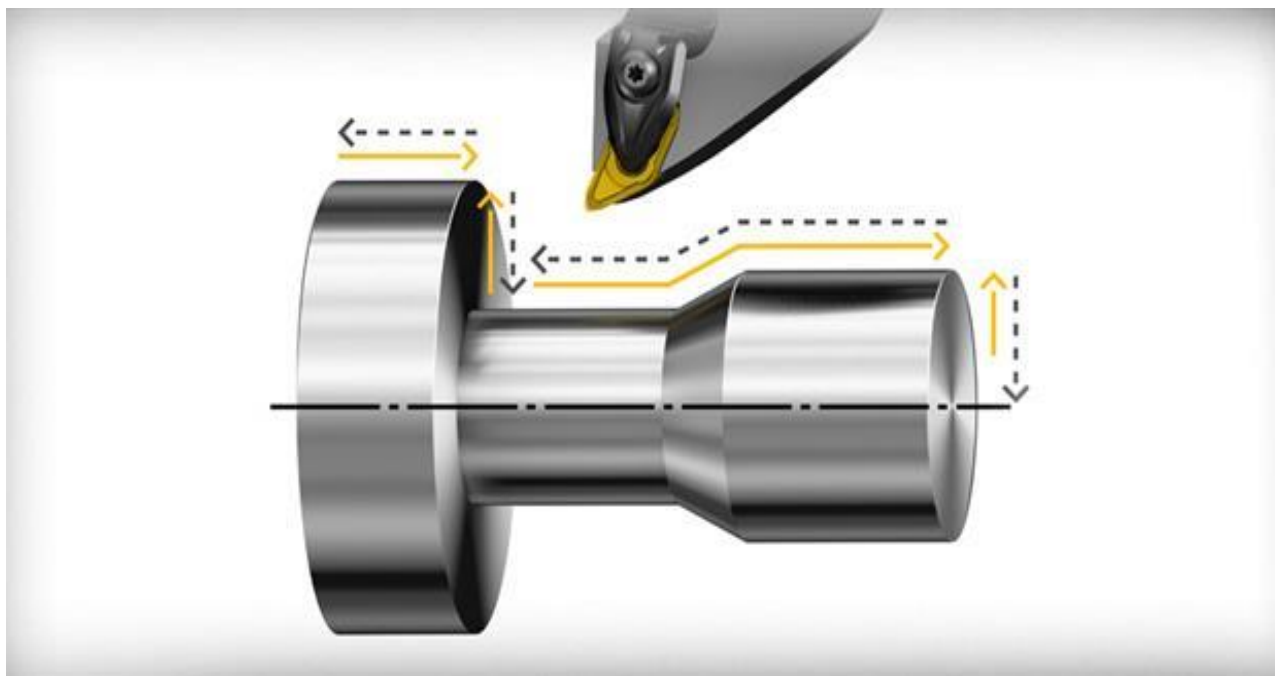
7.1. Gibanja kod prime tokarenja

Glavno gibanje u prime tokarenju jednako je onome kod konvencionalnog, izvodi ga obradak i ono je kružno kontinuirano.

Kinematika posmičnog gibanja kod prime tokarenja u uzdužnom i poprečnom smjeru dobiva novi značaj jer je ono pravolinijsko, translacijsko i kontinuirano u ravnini koja je okomita na pravac brzine glavnog gibanja ali se giba u oba smjera ("lijevo, desno") kod uzdužnog tokarenja i ("gore dolje") kod poprečnog tokarenja (slika 16.). Time se izbjegava "prazan hod" koji do sada nije bio moguć zbog geometrije alata i odvođenja odvojene čestice.

S obzirom na to da je povećano posmično gibanje, smanjena su dostavna gibanja.

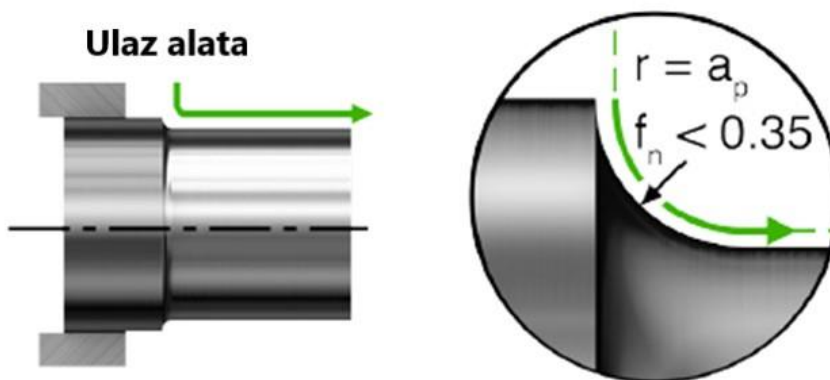
Naravno da dostavna gibanja postoje kod zauzimanja dubine rezanja, prilaska i odlaska alata od obratka, ali više nema dostavnog gibanja koje je kod konvencionalnih tokarilica bilo potrebno kako bi se svaki puta iznova zauzeo položaj za tokarenje koji odgovara geometriji noža (lijevi, desni). Time se značajno povećava produktivnost.



Slika 16. Mogući smjerovi gibanja alata u zahvatu [21]

7.1.1 Ispravan ulaz za dulji vijek alata

Novom geometrijom alata u prime tokarenju smanjena je krutost pločica. Kako bi se izbjeglo njezino oštećivanje, tlačna naprezanja ili pucanje potrebno je izvesti ispravan ulaz alata u materijal. Ulaz mora biti izveden na radijalan način. Alat se sa smanjenim posmakom približava obratku, prvo radijalno pa zatim kružnim gibanjem gdje je polumjer jednak dubini rezanja. Preporuka je da se prilikom ulaska koristi maksimalan posmak od 0,35 mm/okr .

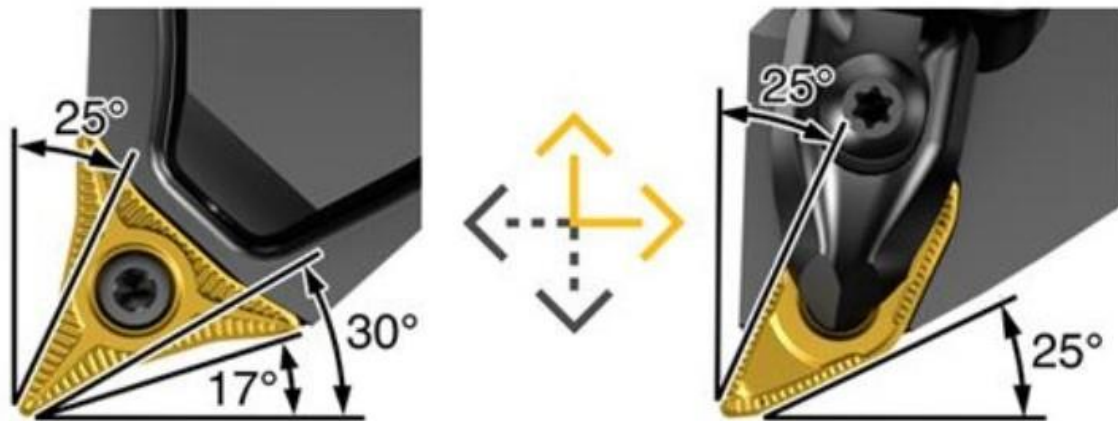


Slika 17. Ulaz alata u materijal [29]

7.2. Alati za prime tokarenje

S obzirom na to da je prime tokarenje nova metoda koja se još razvija, sa sada dostupnim alatima na tržištu moguće je obrađivati materijale koji se često koriste. Pogodni materijali za obradu prime tokarenjem su:

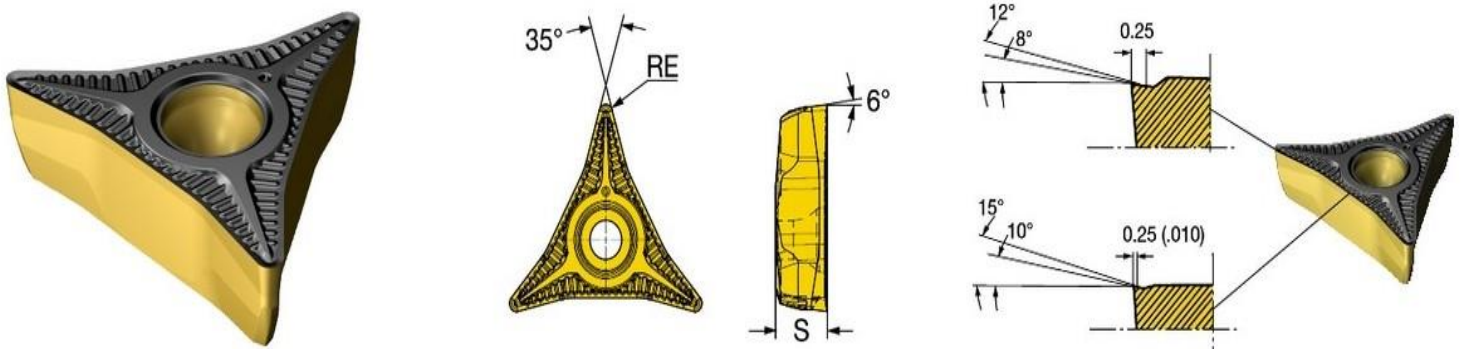
- čelik
- nehrđajući čelik
- ljevovi
- vatrootporne superlegure



Slika 18. A i B tipovi alata za prime tokarenje [22]

7.2.1. Usporedba A i B- tipa reznog alata za prime tokarenje

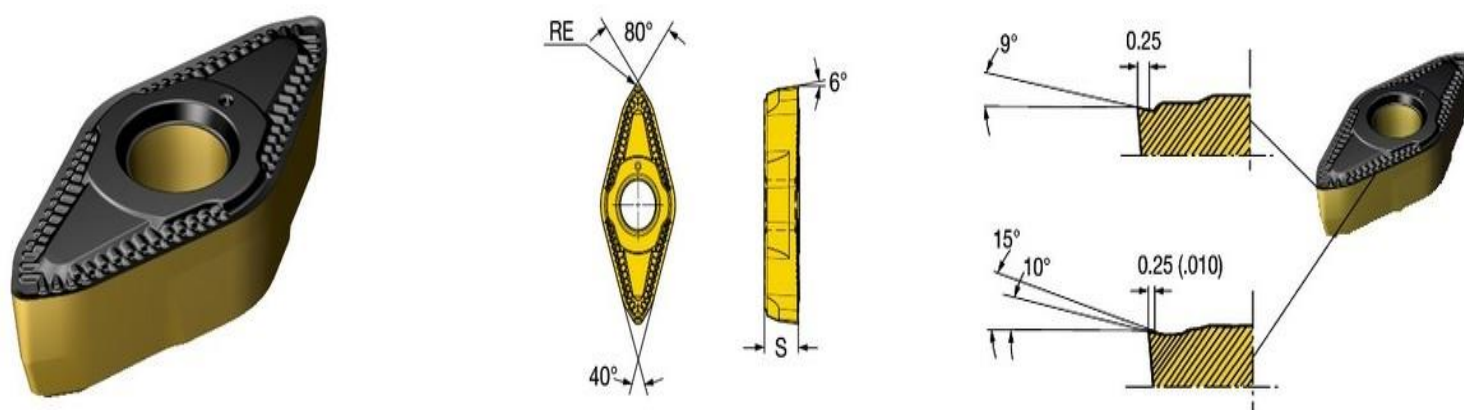
Za sada se u ponudi nalaze dva tipa alata. Tip A je pogodniji za finije obrade, a tip B za srednje i grublje obrade. Alati kao i njihovi držači ne podliježu ISO standardima.



Slika 19. Rezna pločica A- tipa [23]

Tablica 4. Specifikacije reznog alata A- tipa [23]

Naziv:	CoroTurn PRIME CP-A11
Za obradu:	Čelika i ljevova
Radijus zaobljenja vrha:	0,397 mm
Debljina:	6 mm
Masa:	0,012 kg
Za vrstu obrade:	finu
Prevlaka:	CVD Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN



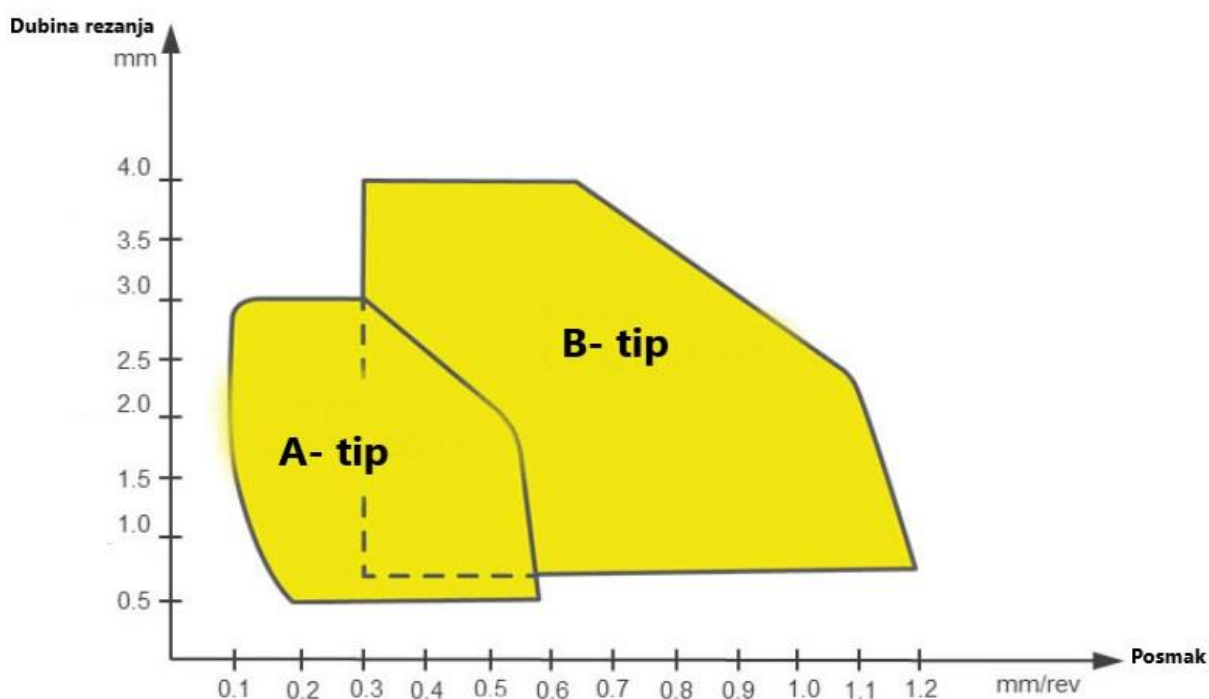
Slika 20. Rezna pločica B- tipa [23]

Tablica 5. Specifikacije reznog alata B- tipa [23]

Naziv:	CoroTurn PRIME CP-B11
Za obradu:	Čelika i ljevova
Radijus zaobljenja vrha:	0,794 mm
Debljina:	5 mm
Masa:	0,01 kg
Za vrstu obrade:	srednju
Prevlaka:	CVD Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN

Prednji kut (γ_0) alata na slikama 19. i 20. kod oba tipa sugerira da je izveden tako da se ostvari povoljnije odvođenje odvojene čestice. Manji radijus zaobljenja kod A- tipa govori da je riječ o alatu koji je pogodniji za obradu složenijih kontura i manje dubine rezanja ali je tako oslabljena oštrica za razliku od B- tipa koji ima gotovo dvostruko veći radijus zaobljenja gdje se mogu postići veći posmaci (srednja a ne fina obrada kao kod A-tipa), te su reducirane sile rezanja i manji je utjecaj vibracija.

Način smještaja i stezanja alata B- tipa izveden je zbog povećanja radijalnih sila kod takve pločice. S povećanjem kuta namještanja glavnih oštrica B-tipa pločice dobila se bolja raspodjela opterećenja i topline po većoj površini pločice.



Slika 21. Područja primjene A i B tipa alata u ovisnosti o dubini rezanja i posmaku [24]

A- tip alata (općenito) za laganu i umjerenu obradu

- dubina rezanja 0,25-3 mm
- posmak 0,2-0,5 mm/okr

B- tip alata (općenito) za teže obrade

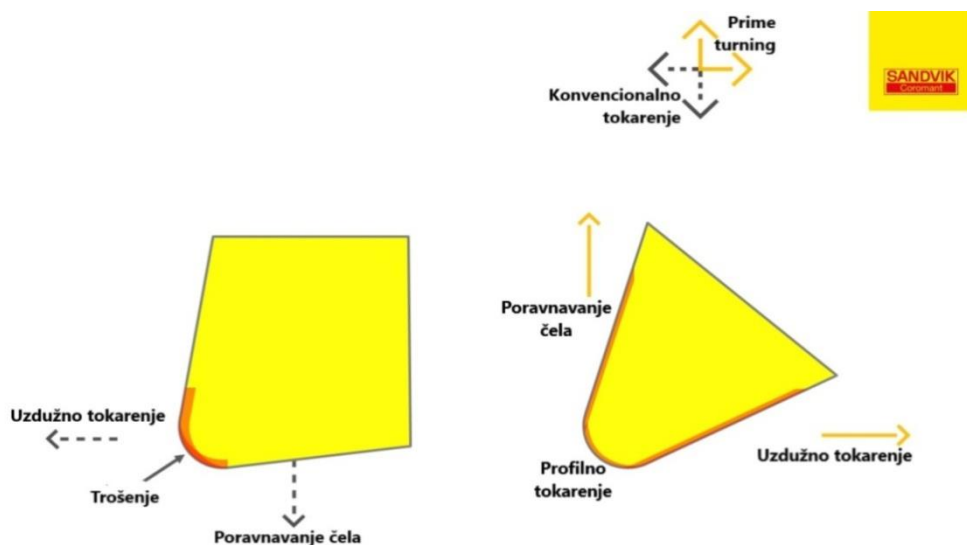
- dubina rezanja 0,5-4 mm
- posmak 0,3-1,2 mm/okr

Tablica 6. Brzine rezanja v_c u prime tokarenju [25]

Čelik	250-350 m/min
Nehrđajući čelik	100-250 m/min
Vatrootporne legure	40-120 m/min
Ljevovi	250-350 m/min

7.2.2 Rezna oštrica (oštrice)

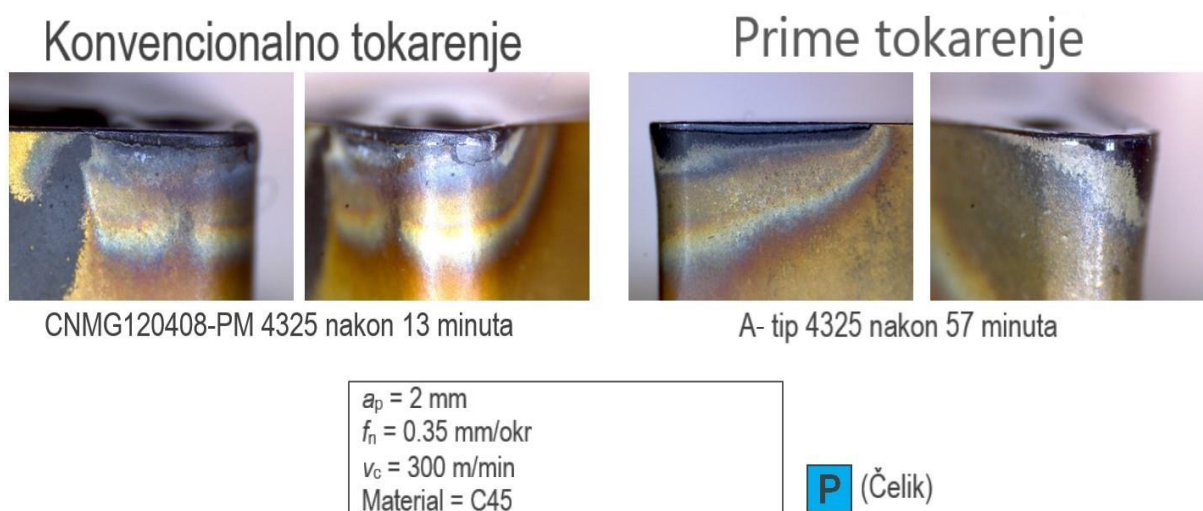
Kod konvencionalnog tokarenja uobičajeni su rezni alat s jednom glavnom reznom oštricom i jednom pomoćnom reznom oštricom. Upravo revolucija u prime tokarenju dovela je do većeg iskorištavanja tokarenja u više smjerova. Koristeći oštricu po svim smjerovima znači da imamo „tri oštrice“. Jedna oštrica može se koristiti za uzdužno tokarenje, druga za poprečno, a treća za profilno tokarenje. Jasno je da je to samo pretpostavka jer se u većini obrada koriste oštrice i vrh zajedno. Sada je geometrijom pločice omogućena tanja i šira odvojena čestica pa maksimalno opterećenje i utjecaj topline (velik dio topline odvodi upravo odvojena čestica) odmaknut s vrha oštrice alata duž cijele pločice. Kako je opterećenje oštrice ovisno o smjeru obrade tako se i mijenjaju smjerovi sila u obradi. Različitim dijelovima oštrica obavljaju se operacije tokarenja u različitim smjerovima. To znači da je sada trošenje oštrice raspodijeljeno na dio oboda pločice a ne kao do sada većinom na vrh alata.



Slika 22. Usporedba iskoristivosti reznih oštrica [29]

Konvencionalne obrade tokarenja uvijek koriste radijus zaobljenja vrha alata kod tokarenja što dovodi do koncentriranja topline u zoni vrha oštrice. Također, kod takvog tokarenja moguće je stvaranje naljepaka pa rezna oštrica može biti neupotrebljiva narušavanjem geometrije. Toplina se kod prime tokarenja stvara na većoj površini pa je bolje njeno odvođenje iz zone obrade. Odvojena čestica je „ravnija“ i lakše se oblikuje jer ju ne savija vrh nego se stvara na ravnijem dijelu oštrice.

Na slici ispod je prikazana usporedba trošenja oštrice alata kod konvencionalnog tokarenja i prime tokarenja. Može se vidjeti utjecaj topline koji je kod konvencionalnog tokarenja osobito izražen na vrhu alata te se raspoznaje trošenje stražnje površine. Valja obratiti pozornost na brzinu rezanja koja je jednaka kod oba načina tokarenja a poznato je da je brzina rezanja najutjecajniji faktor kod trošenja alata.



Slika 23. Usporedba istrošenosti rezne oštrice konvencionalnog tokarenja i prime tokarenja [29]

Istim parametrima obrade i obradom istog materijala pokazano je ovim ispitivanjem da oštrica prime tokarenja može izdržati više od četiri puta duže vrijeme obrade u odnosu na konvencionalnu rezu oštricu.

Naravno da se trošenje alata kod prime tokarenja kao i kod konvencionalnih obrada mora pratiti i nadzirati, a faktor koji daje povratnu informaciju o stanju oštrice svakako je i kvaliteta obrađene površine.

7.3. Geometrija alata za prime tokarenje

Rezni dio alata kod konvencionalnog tokarenja određen je s tri površine:

- a) $A\gamma$ - prednja površina; površina koja je u kontaktu s odlazećom česticom (površina po kojoj klizi odvojena čestica)
- b) $A\alpha$ - stražnja (slobodna) površina; površina koja je u nepoželjnom kontaktu s površinom obrade
- c) $A'\alpha$ - pomoćna stražnja površina

Površine reznog dijela alata kod prime tokarenja

- a) $A\gamma$ - prednja površina; površina koja je u kontaktu s odlazećom česticom (površina po kojoj klizi odvojena čestica)
- b) $A\alpha$ - stražnja (slobodna) površina; - s obzirom na to da se radi o tokarenju u oba smjera, imamo i „dvije glavne oštrice“.

Kako je glavna oštrica presjek prednje ($A\gamma$) i stražnje površine, zaključak je da sada postoje dvije stražnje površine ($A\alpha_1$ i $A\alpha_2$) jednake po važnosti

- kod alata za prime tokarenje vršni kut alata (ϵ_r) je veoma malen jer to zahtijeva geometrija

S obzirom na kinematske kutove u prime tokarenju za razliku od konvencionalnog tokarenja smanjivanjem kuta vrha alata (ϵ_r) sada postoje dva kuta namještanja glavnih oštrica u ovisnosti o smjeru gibanja i o tipu alata. Bitno je i za napomenuti da je kut klina jednak s obje strane pločice (simetrija)

Kod A-tipa alata kutovi namještanja oštrica (κ_r) su 17° i 25° dok je vršni kut alata 35° .

Kod B- tipa alata kutovi namještanja oštrica su 25° , a vršni kut alata 40° .

7.4. Preporuke kod prime tokarenja

Uvjeti za obradu prime tokarenjem[24]:

- balansiran i krut stroj, bez vibracija
- adekvatni držači alata
- adekvatan alat
- stezanje alata moment ključem
- adekvatan sustav hlađenja (ako se koristi)
- prvenstveno obrada kraćih komada
- točno stezanje i podupiranje obratka (stezna glava, šiljak)
- uvijek koristiti smanjenje posmaka pri ulasku u zahvat
- u zahvat ulaziti gibanjima u obliku luka
- kontrolirati odvojenu česticu promjenom parametara obrade za točno određeni promjer
- pratiti preporuke proizvođača za parametre obrade u različitim smjerovima (nisu isti)
- prilagođeni programi za CAD-CAM

7.5. Usporedba konvencionalnog tokarenja i prime tokarenja

Tablica 7. Povećanje produktivnosti prime tokarenja u odnosu na konvencionalno tokarenje [4]

Konvencionalna metoda tokarenja	Prime tokarenje (CoroTurn Prime B- tip)
Materijal obratka: čelik	
Parametri obrade	
v_c -330 m/min	v_c -350 m/min
f_n -0.35 mm/okr	f_n -1.2 mm/okr
a_p -4 mm	a_p -3 mm
Volumen odvojene čestice:	
462 cm ³ /min	1260 cm ³ /min
Povećanje produktivnosti u odnosu na konvencionalnu metodu:	272%

Usporedba prikazuje grubu obradu čelika konvencionalnom metodom i prime tokarenjem čelika. Iz tablice je vidljivo da su svi parametri obrade povećani kod prime tokarenja, a osobito posmak, preko 300%. Povećanje produktivnosti utemeljeno je na volumenu odvojene čestice u jednoj minuti. Naravno da taj rezultat u ponovnom postupku usporedbe može varirati. Treba uzeti u obzir i trošenje alata, ali uz prije navedeno četiri puta dulje vrijeme koje može izdržati alat za prime tokarenje čelika sigurno će takvo tokarenje naći primjenu u mnogim poduzećima.

Prime tokarenje nije uvijek bolje rješenje. Prime tokarenje dužih komada nije izvedivo bez podupiranja šiljkom, tako da se bez podupiranja mogu obrađivati samo kraći dijelovi. Kod obrade dužih komada bez podupiranja javljaju se sile koje ga izvijaju te postoji mogućnost da dođe do vibracija.

8. ZAKLJUČAK

Razvoj strojeva i obrada na njima je neophodan. Mnogi pokretači tog razvoja nalaze se u svijetu oko nas. S aspekta strojarstva, medicine, građevine i drugih područja znanosti takav napredak može značiti razvoj društva kakvog poznajemo danas. Dosadašnjim napretkom dobiven je uvid u potpuno nova znanstvena područja koja do sada nisu bila moguća. Naravno da takav napredak prati konstantan rad stručnjaka, ljudi koji ulažu svoje vrijeme, trud i novac kako bi postigli svoj maksimum. Često rad na razvoju strojeva, obrada i alata nije lak posao. Mora se surađivati s različitim profesijama ljudi, koristiti eksperimentalna istraživanja, pa ponekad čak i uzrokovati štetu kako bi se utvrdile činjenice. Jednako tako, spajanjem različitih vrsta obrade udareni su temelji novim načinima razmišljanja kako nešto stvoriti, obraditi ili popraviti. Novi materijali kumovali su razvoju naprednih alata i strojeva koji postižu zavidne parametre u pogledima gibanja i brzina. Industrija je ta koja će sve to iskoristiti na masovnoj razini. Proizvodnja je pokretačka snaga organizacija. Nove metode obrade odvajanjem čestica postižu velike promjene u pogledu efikasnosti i produktivnosti. Unatoč maksimalnom iskorištenju trebalo bi se ipak trebalo voditi računa i o radnicima bez kojih kompletan sustav obrada ne bi funkcionirao. Na human način, brzinom kojom se razvija i tehnologija trebao bi se olakšavati i njihov posao ako to njihove sposobnosti opravdavaju. Okoliš je naše nasljeđe i ono moramo čuvati za iduće generacije. Unatoč svemu, kvaliteta života s aspekta kvalitete zraka i vode i ostalih parametara očuvanja okoliša mora biti nediskutabilna.

Točnost, brzina i oblici obrada koje su dostupne na tržištu pojačavaju kvalitetu i konkurenciju. Jedna od takvih je i prethodno prikazano prime tokarenje. Prime tokarenje je način tokarenja koji je na strani uštede, produktivnosti i jednostavnosti.

Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu za potrebe ovog rada pribavio je dvije pločice s pripadajućim držačem alata i moment ključem za stezanje pločice.

Na slici 24. prikazane su pločice A- tipa (za finiju obradu), držač je kvadratnog presjeka 25x25 mm, pločica je stegnuta vijkom, a stezanje se izvodi moment ključem, momentom od 3 Nm.



Slika 24. Držač alata, dvije pločice A- tipa, vijak i moment ključ

Zbog kašnjenja isporuke alata i nedovoljno vremena, u ovom radu je dana teorijska usporedba prime tokarenja s konvencionalnom metodom tokarenja. Nabavkom ovakvog alata zasigurno će se u budućim radovima prikazati razna istraživanja o prime tokarenju poput trošenja alata ili sila koje se javljaju prilikom obrade.

Naravno da je prostor daljnjem napretku otvoren ali korak koji je napravljen prime tokarenjem sigurno znači i korak u ostalim alatima za obradu odvajanjem čestica. Mjesto za poboljšanje je u geometriji i krutosti te će to osigurati još grublje parametre uz prateće benefite.

LITERATURA

- [1] Predavanja prof. Tome Udiljaka (Proizvodnja podržana računalom-CAM), FSB, Zagreb, 2017.
- [2] <https://www.canadianmetalworking.com/article/cuttingtools/cutting-tools-at-cmts-2013> (10.2.2018)
- [3] SANDVIK Coromant, <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/pages/default.aspx> (2.2.2018)
- [4] Prime tokarenje, <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/campaigns/primeturning> (2.2.2018)
- [5] Hybrid manufacturing technologies, <http://www.hybridmanutech.com/resources.html> (2.2.2018)
- [6] Add-On Additive Manufacturing, <https://www.mmsonline.com/articles/add-on-additive-manufacturing> (2.2.2018)
- [7] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S152661251730244X> (3.2.2018)
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic/sonic_driller/corer (3.2.2018)
- [9] https://www.google.hr/search?q=ultrasonic+drilling&client=firefox-b&dcr=0&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjBzvOvqLDZAhUC3qQKHfYFwD0EQ_AUICigB&biw=1280&bih=556#imgrc=2O_zlY65BFegIM: (3.2.2018)
- [10] <https://www.cnccookbook.com/high-speed-machining-trochoidal-milling-hsm-speeds-and-feeds/> (4.2.2018)
- [11] Škorić, S.: Istraživanje pogodnosti obrade ortogonalnim okruglim glodanjem, Doktorska disertacija, FSB, Zagreb, 2002.
- [12] https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/getting_started/milling_different_materials/hrsa_and_titanium_milling/?Country=cy (2.2.2018)
- [13] Micro milling tool made of nano-polycrystalline diamond for precision cutting of SiC, https://ac.els-cdn.com/S0007850617300173/1-s2.0-S0007850617300173-main.pdf?_tid=d7527c6c-14ee-11e8-8c12-00000aacb360&acdnt=1518987848_7e8bb8f2b2f59dde34756daf9977bf06 (5.2.2018)
- [14] Predavanja prof. Tome Udiljaka (Obrada odvajanjem), FSB, Zagreb, 2017.

- [15] <http://artwi.blogspot.hr/2005/04/wiper-inserts-for-turning.html> (5.2.2018)
- [16], [17] https://www.sandvik.coromant.com/fr-fr/knowledge/general_turning/how-to-achieve-good-component-quality/turning-in-different-materials/hard-part-turning (5.2.2018)
- [18] http://www.ijetae.com/files/Volume2Issue2/IJETAE_0212_07.pdf (6.2.2018)
- [19] <http://tverdysplav.ru/universalnyj-instrument-sandvik-coromant-dlya-povysheniya-proizvoditelnosti/> (6.2.2018)
- [20] https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/general_turning/how-to-achieve-good-component-quality/cutting-fluid-and-coolant (2.2.2018)
- [21] https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/mww/Pages/T_PrimeTurning.aspx (2.2.2018)
- [22] https://www.sandvik.coromant.com/th-th/mww/pages/t_primeturning2.aspx (2.2.2018)
- [23] <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/pages/search15products.aspx?tpcleaf=INSTRNG&q=CoroTurn%20PRIME%20inserts> (2.2.2018)
- [24] https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/coroturn_prime/Pages/how-to-use.aspx (2.2.2018)
- [25] <https://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/handlinginstructions/en-gb/CoroTurn-Prime-92045.pdf> (2.2.2018)
- [26] https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/coroturn_prime/pages/default.aspx?internal_camplink=Primeturning&internal_camplink_type=Hyperlink (2.2.2018)
- [27] https://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/corodrill_880/pages/product-details.aspx (2.2.2018)
- [28] https://www.researchgate.net/publication/256442246_Reduction_of_power_and_lubricant_oil_consumption_in_milling_process_using_a_new_SiO2_nanolubrication_system (5.2.2018.)
- [29] Promidžbeni materijal za prime tokarenje

PRILOZI

I. CD-R disc