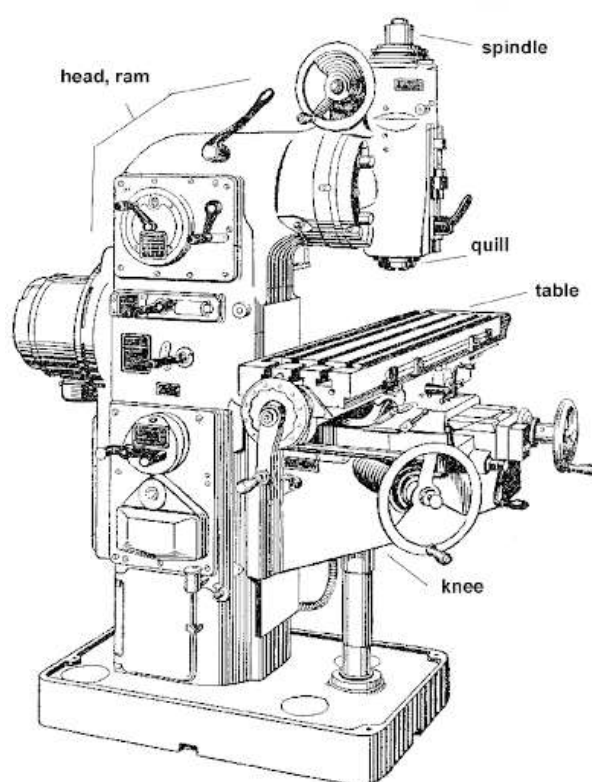




**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

## **ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ**



**ΜΑΡΙΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΗ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ**  
**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα απ' όλους την οικογένεια μου που με στηρίζει όλα τα χρόνια της προσπάθειας μου, καθώς και όλους τους καθηγητές οι οποίοι συνέβαλαν στην προσπάθεια μου τα τελευταία 5 χρόνια. Ευχαριστώ επίσης τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Αριστομένη Αντωνιάδη για την εμπιστοσύνη και τη στήριξη του όλο αυτό το διάστημα.

## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	5
2. Υλικά.....	7
2.1 Υλικά .....	7
2.2 Ευρέως χρησιμοποιούμενα κατεργαζόμενα υλικά .....	7
2.2.1 Χάλυβες.....	8
2.2.2 Ανοξείδωτοι Χάλυβες.....	8
2.2.3 Χυτοσίδηροι.....	9
2.2.4 Μη σιδηρούχα μέταλλα .....	9
2.2.5 Super - Κράματα και Τιτάνιο .....	9
2.2.6 Υπέρσκληρα Υλικά: .....	10
2.2.7 Ο→Άλλο: .....	10
2.3 Ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά κοπτικών εργαλείων .....	10
2.3.2 Επίστρωση – CVD.....	11
2.3.3 Επίστρωση – PVD.....	11
2.3.4 Τσιμεντοειδές Καρβίδιο.....	11
2.3.5 Μη Επικαλυμμένα Τσιμεντοειδή Καρβίδια.....	12
2.3.6 Εργαλείο Κοπής από Κεραμικό Μέταλλο .....	13
2.3.7 Κεραμικό Εργαλείο Κοπής.....	13
2.3.8 Πολυκρυσταλλικό Κυβικό Βοριονιτρίδιο .....	14
2.3.9 Πολυκρυσταλλικό Διαμάντι .....	15
3 Διαδικασία Φραιζαρίσματος .....	16
3.2 Εισαγωγή.....	16
3.2 Φραιζάρισμα (milling) .....	16
3.3 Είδη Φραιζαρίσματος .....	17
3.4 Η Φραιζα .....	18
3.5 Κοπτικά Εργαλεία Φραιζαρίσματος.....	20
4 Κατεργασιμότητα Μεταλλικών Υλικών.....	21
4.1 Ορισμός .....	21
4.2 Κατεργασιμότητα των διαφόρων κατηγοριών των υλικών .....	22
4.2.1 Χάλυβες.....	22
4.2.2 Ανοξείδωτοι Χάλυβες.....	22
4.2.3 Χυτοσίδηρος.....	22
4.2.4 Μη σιδηρούχα μέταλλα .....	22
4.2.5 Super-Κράματα και Τιτάνιο .....	22
4.3 Φορτίο ‘δοντιών’ κοπτικού εργαλείου .....	23
4.4 Τύπος μηχανικής κατεργασίας.....	25

4.5	Κατεργασιμότητα Κατεργαζόμενων Υλικών.....	28
4.5.1	Κράμα Τιτανίου (TC4).....	28
4.5.2	Κράμα Αλουμινίου .....	29
4.5.3	Ανοξείδωτος Χάλυβας .....	31
4.5.4	Duplex Stainless Steels (DSS) .....	32
4.5.5	Μη σιδηρούφα μέταλλα .....	34
4.5.6	Super-Alloys .....	36
4.5.7	Mold Steel .....	37
4.5.8	Monel Alloys .....	39
4.5.9	Συνθετικά τεμάχια ενισχυμένα με ίνες γυαλιού και ίνες άνθρακα .....	40
4.5.10	Κράμα Ορείφαλκου C26130: .....	42
4.5.11	Κράμα Inconel 718 .....	43
4.5.12	Κράματα με βάση το τιτάνιο και το νικέλιο .....	44
4.5.13	Προτάσεις για δεδομένα κοπής Ti6Al4V χρησιμοποιώντας εργαλεία κοπής από την σειρά CoroMill της εταιρείας Sandvik Coromant .....	47
4.6	Κοπτική Δυνατότητα Κοπτικών Εργαλείων .....	52
4.6.1	Sialon Κεραμικά εργαλεία κοπής .....	52
4.6.2	Τσιμεντοειδές Καρβίδιο .....	53
4.6.3	Κεραμικό Εργαλείο Κοπής .....	55
4.6.4	Πολυκρυσταλλικό Διαμάντι (PCD).....	56
4.6.5	Πολυκρυσταλλικό Κυβικό Βοριονιτρίδιο (pcBN) .....	57
4.6.6	PVD .....	57
4.6.7	High-Speed Steel (HSS) .....	58
4.6.8	Ανθρακούφος Χάλυβας .....	59
5	Επίλογος .....	61
	Βιβλιογραφία.....	62

## 1. Εισαγωγή

Το αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα εργασία αφορά στην διερεύνηση των συνθηκών κοπής για τα διάφορα υλικά των τεμαχίων, σε συνδυασμό με τα εργαλεία κοπής κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φραιζαρίσματος. Τα υλικά των τεμαχίων που αναλύονται είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά στην διαδικασία φραιζαρίσματος. Οι βασικές παράμετροι κοπής που αναλύονται για κάθε ζεύγος τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου, είναι η ταχύτητα κοπής, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού και το βάθος κοπής. Η ανάλυση αυτή παρατίθεται σε συνδυασμό με τις ιδιότητες των τεμαχίων και των κοπτικών εργαλείων. Σκοπός, είναι η δημιουργία μίας τεχνικής έκθεσης για την κατεργασιμότητα των υλικών, δηλαδή καταγραφή και τεκμηρίωση των κατάλληλων παραμέτρων κοπής για κάθε συνδυασμό κοπτικού εργαλείου και υλικού του τεμαχίου, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των τεμαχίων και των κοπτικών εργαλείων.

Η κατεργασία είναι εξ ορισμού η διαδικασία κατά την οποία τα ακατέργαστα υλικά μετατρέπονται σε τελικά προϊόντα. Η έννοια της κατεργασίας εμφανίστηκε αρχικά το 5.000 π.Χ. με την δημιουργία υλικών από ξύλο ή πέτρα και αργότερα από μέταλλο.

Η κοπή αποτελεί μία από τις αρχαιότερες μεθόδους κατεργασίας και διαμόρφωσης υλικών. Ταυτόχρονα χρησιμοποιείται από όλους καθημερινά, ενώ είναι η βασική μηχανουργική κατεργασία. Η ποιότητα της κοπής εξαρτάται από το υλικό και το κοπτικό εργαλείο. Με τις συμβατικές μεθόδους κοπής ενδέχεται να υπάρξει καταστροφή είτε του κοπτικού εργαλείου είτε του τεμαχίου λόγω θερμικών φαινομένων. Αντίθετα στην κοπή με χρήση λείζερ που απορροφάται ενέργεια από τις εξωτερικές στοιβάδες του υλικού, δεν υπάρχει διάδοση θερμότητας στο υλικό και προλαμβάνεται η ζημιά.

Η συνεχής αύξηση των αναγκών του ανθρώπου καθώς και η προσπάθεια κάλυψης αυτών, επιβάλλει την ανάπτυξη της τεχνολογίας, αναφορικά με τις μεθόδους παραγωγής και τις γνώσεις πάνω στα υλικά. Οι μέθοδοι και οι κατεργασίες παραγωγής χωρίζονται στις παρακάτω βασικές κατηγορίες:

- Χύτευση
- Μορφοποίηση με Πλαστική Παραμόρφωση
- Αποβολή Υλικού
- Σύνδεση – Συναρμολόγηση

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται κυρίως από τη σχεδίαση αλλά και από το υλικό και την χρήση του τελικού προϊόντος.

Για την επιλογή των υλικών λαμβάνονται υπόψη οι μηχανικές, φυσικές, χημικές και κατασκευαστικές ιδιότητες καθώς και η δυνατότητα ανακύκλωσής τους. Οι συνήθεις κατηγορίες υλικών στην μοντέρνα βιομηχανία είναι:

- Σιδηρούχα Μέταλλα
- Μη Σιδηρούχα Μέταλλα και Κράματα
- Πλαστικά
- Κεραμικά
- Συνθετικά

Στόχος των σύγχρονων μεθόδων παραγωγής είναι η μείωση του κόστους παραγωγής, η διασφάλιση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων και η άμεση ανταπόκριση στην

ζήτηση με χρήση ευέλικτου εξοπλισμού. Ένας ακόμα σημαντικός στόχος είναι η μείωση του κόστους παραγωγής χωρίς αυτό να επηρεάζει την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων . /2/.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η κατεργασία αποβολής του υλικού. Στις διαδικασίες αποβολής υλικού συμπεριλαμβάνονται όλες εκείνες οι κατεργασίες κατά τις οποίες για να δημιουργηθεί το τελικό τεμάχιο αφαιρείται υλικό από το αρχικό σε μορφή αποβλίπτου.

Ως κατεργασιμότητα ενός υλικού ορίζεται ο βαθμός δυσκολίας μορφοποίησής του, σε συνάρτηση με την ταχύτητα παραμόρφωσης, τη θερμοκρασία κατά την κατεργασία και την μικροδομή του υλικού. Στην παρούσα εργασία θα γίνει ανάλυση της κατεργασιμότητας των ευρέως χρησιμοποιούμενων κατεργαζόμενων μεταλλικών υλικών, υπό βέλτιστες συνθήκες ανά γεωμετρία και υλικό κοπτικών εργαλείων. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά θα γίνει παρουσίαση των ευρέως χρησιμοποιούμενων κατεργαζόμενων υλικών και κοπτικών εργαλείων, και στη συνέχεια συνδυάζοντας τα κατεργαζόμενα υλικά και τα κοπτικά εργαλεία, θα μελετηθούν οι βέλτιστες συνθήκες κοπής για κατεργασία φραιζαρίσματος. Οι βέλτιστες συνθήκες θα αποδεικνύονται από πειράματα που έχουν γίνει και είναι καταγεγραμμένα στη διεθνή βιβλιογραφία. Για κάθε συνδυασμό κοπτικού/υλικού θα παρατεθούν σχετικά παραδείγματα. Πρακτικά αυτή η εργασία θα είναι μία τεχνική έκθεση για την κατεργασιμότητα των υλικών, δηλαδή θα δίνει οδηγίες για το σωστό συνδυασμό συνθηκών κοπής με το υλικό του τεμαχίου και το εργαλείο κοπής /1/.

## 2. Υλικά

### 2.1 Υλικά

Κάθε φορά που επιλέγεται ένα υλικό ελέγχονται οι μηχανικές, φυσικές, χημικές και κατασκευαστικές του ιδιότητες. Οι μηχανικές ιδιότητες όπως η σκληρότητα, η αντοχή σε κόπωση κ.λπ, κάθε υλικού καθορίζουν αν τα προϊόντα του είναι κατάλληλα για τις συνθήκες φόρτισης οι οποίες πρόκειται να εφαρμοστούν. Αντίστοιχα οι φυσικές (π.χ. πυκνότητα τήξη κ.λπ) και οι χημικές ιδιότητες (οξειδωση, τοξικότητα κ.λπ) είναι υπεύθυνες για τη συμπεριφορά του υλικού σε κανονικές και ακραίες συνθήκες λειτουργίας. Τέλος οι κατασκευαστικές ιδιότητες καθορίζουν την κατεργασιμότητα κάθε υλικού, δηλαδή την ευκολία με την οποία κάθε υλικό μπορεί να υποστεί κατεργασίες. Ένας από τους πλέον βασικούς παράγοντες επιλογής υλικών είναι το κόστος και η διαθεσιμότητα τους. Για παράδειγμα ένα υλικό του οποίου οι εμπορικές διαστάσεις δεν εξυπηρετούν τις ανάγκες της εκάστοτε κατασκευής δεν επιλέγεται. Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει την επιλογή των υλικών είναι η δυνατότητα ανακύκλωσης τους, διότι με αυτόν τον τρόπο μεταθέεται η χρόνος αχρήστευσης ενός υλικού /2/.



Σχήμα 2.1 Κύκλος εργασιών σε μία σύγχρονη κυκλική οικονομία (Πηγή: <https://www.energyregister.gr/perivallon/anakyklosi/>)

### 2.2 Ευρέως χρησιμοποιούμενα κατεργαζόμενα υλικά

Για τη βιομηχανία επεξεργασίας και κοπής μετάλλων, υπάρχει διαθέσιμη μία μεγάλη ποικιλία εξαρτημάτων από διάφορα υλικά. Κάθε υλικό έχει τα δικά του μοναδικά χαρακτηριστικά. Τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί να είναι η παρουσία ή όχι διαφόρων στοιχείων κραμάτωσης, η συμπεριφορά του υλικού απέναντι στη θερμική επεξεργασία, η σκληρότητα του υλικού κ.α.. Αυτά τα χαρακτηριστικά επηρεάζουν την επιλογή του κοπτικού εργαλείου ως προς τη γεωμετρία του, και τις συνθήκες κοπής (π.χ. ταχύτητα κοπής, πρόωση, κ.λπ.). Για να γίνει πιο εύκολος ο συνδυασμός του κοπτικού εργαλείου με το κατεργαζόμενο τεμάχιο ώστε να επιτυγχάνεται το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα με το μικρότερο δυνατό κόστος, τα υλικά τεμαχίων χωρίστηκαν σε έξι μεγάλες κατηγορίες

σύμφωνα με τα πρότυπα ISO. Κάθε ομάδα έχει τις δικές της ιδιότητες σχετικά με την κατεργασιμότητα.



Σχήμα 2.1 Ευρέως χρησιμοποιούμενα κατεργαζόμενα υλικά (Πηγή: Sandvik Coromant)

### 2.2.1 Χάλυβες

Οι χάλυβες είναι η μεγαλύτερη κατηγορία υλικών. Περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα υλικών το οποίο κινείται από μη κραματωμένα υλικά έως υλικά με υψηλό ποσοστό κραμάτωσης. Η κατεργασιμότητα αυτών των υλικών είναι συνήθως αρκετά καλή, αλλά διαφέρει από υλικό σε υλικό ανάλογα με τη σκληρότητά του, την περιεκτικότητα σε άνθρακα κ.λπ.. Οι χάλυβες είναι η μεγαλύτερη ομάδα υλικών τεμαχίων στον τομέα της κοπής μετάλλων. Έχουν την ιδιότητα να δέχονται κατεργασίες σκλήρυνσης. Μία μέση τιμή για τη σκληρότητα των χαλύβων είναι περίπου 400 HB. Οι χάλυβες με σκληρότητα πάνω από περίπου 48 HRC και έως 62-65 HRC ανήκουν στην κατηγορία ISO H.

Συνοπτικά:

- Ο χάλυβας είναι ένα κράμα με κύριο συστατικό των σίδηρο Fe.
- Οι μη κραματοποιημένοι χάλυβες έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη από 0,8% και αποτελούνται αποκλειστικά από σίδηρο (Fe), χωρίς άλλα στοιχεία κράματος.
- Οι κραματοποιημένοι χάλυβες έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα χαμηλότερη από 1,7% και περιέχουν στοιχεία κράματος όπως Ni, Cr, Mo, V και W.
- Οι χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε κράματα περιέχουν στοιχεία κραμάτωσης λιγότερο από 5%.
- Οι χάλυβες υψηλής κραμάτωσης έχουν περιεκτικότητα περισσότερο από 5% σε στοιχεία κραμάτωσης /3/.

### 2.2.2 Ανοξείδωτοι Χάλυβες

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες είναι κράματα χαλύβων οι οποίοι διαθέτουν συνήθως τουλάχιστον 12% χρώμιο (Cr). Άλλα κράματα μπορεί να περιλαμβάνουν νεκέλιο (Ni) ή μολυβδαίνιο (Mo). Ένα κοινό στοιχείο μεταξύ όλων των ανοξείδωτων χαλύβων είναι ότι η επιφάνεια κοπής μπορεί να εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες χωρίς τον κίνδυνο οξείδωσης. Είναι κράματα με κύριο συστατικό τους το σίδηρο.

Συνοπτικά:

- Έχουν περιεκτικότητα σε χρώμιο υψηλότερη από 12%.
- Διαθέτουν γενικά χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα ( $C \leq 0,05\%$ ).
- Διάφορες προσθήκες όπως αυτές των νικελίου (Ni), χρωμίου (Cr), μολυβδαινίου (Mo), νιοβίου (Nb) και τιτανίου (Ti) παρέχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως αντίσταση στη διάβρωση και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.



- Το χρώμιο (Cr) συνδυάζεται με οξυγόνο (O) για να δημιουργήσει ένα στρώμα Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> στην επιφάνεια του χάλυβα, το οποίο παρέχει μια αντιδιαβρωτική ιδιότητα στο υλικό /3/.

### 2.2.3 Χυτοσίδηροι

Οι χυτοσίδηροι σε αντίθεση με τους χάλυβες είναι πιο εύκολοι ως προς την κατεργασία τους. Ο γκρι χυτοσίδηρος (Gray cast irons-GCI) και ο ελαστικός χυτοσίδηρος (Malleable cast irons-MCI) είναι πιο εύκολα κατεργάσιμα υλικά, σε αντίθεση με τον οζώδη χυτοσίδηρο (Nodular cast irons-NCI), τον συμπαγή χυτοσίδηρο (Compact cast irons-CGI) και τον όλκιμο χυτοσίδηρο (Austempered cast irons-ADI) τα οποία κατεργάζονται δυσκολότερα. Όλα τα χυτά σίδηρα περιέχουν SiC, το οποίο κάνει την κατεργασιμότητά τους πιο εύκολη. Υπάρχουν 5 είδη χυτοσιδήρων:

- Γκρι χυτοσίδηρος (GCI)
- Ελαστικός χυτοσίδηρος (MCI)
- Οζώδης χυτοσίδηρος (NCI)
- Συμπαγής σίδηρος γραφίτη (CGI)
- Όλκιμος σίδηρος (ADI)

Οι χυτοσίδηροι αποτελούνται από ένα συνδυασμό σιδήρου και άνθρακα Fe-C με υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο (Si 1-3%). Η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι πάνω από 2%, και η οποία είναι η μέγιστη διαλυτότητα του C στην ωστενιτική φάση. Επιπλέον τα Cr (χρώμιο), Mo (μολυβδαίνιο) και V (βανάδιο) σχηματίζουν καρβίδια, τα οποία αυξάνουν την αντοχή και τη σκληρότητα θυσιάζοντας όμως την κατεργασιμότητα /3/.

### 2.2.4 Μη σιδηρούχα μέταλλα

Μη σιδηρούχα μέταλλα είναι τα μέταλλα τα οποία θεωρούνται σχετικά μαλακά. Τέτοια μέταλλα είναι το αλουμίνιο, ο χαλκός, ο ορείχαλκος κ.λπ. Το αλουμίνιο συγκεκριμένα με περιεκτικότητα σε πυρίτιο (Si) 13% είναι ένα αρκετά εύκολα κατεργάσιμο υλικό. Γενικά στην κοπή μη σιδηρούχων μετάλλων εφαρμόζονται υψηλές ταχύτητες κοπής και το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την κοπή τους δεν καταπονείται ιδιαίτερα. Ως εκ τούτου αναμένεται να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής. Σε αυτή την ομάδα υλικών ανήκουν :

- Μαλακά μη σιδηρούχα μέταλλα με σκληρότητα κάτω από 130 HB, με εξαίρεση τα χάλκινα υψηλής αντοχής (> 225 HB).
- Κράματα με βάση το μαγνήσιο.
- Ηλεκτρολυτικός χαλκός με 99,95% Cu.
- Χαλκός με κασσίτερο (Sn) (10–14%) ή / και αλουμίνιο (3–10%).
- χαλκός (60–85%) με ψευδάργυρο (Zn) (40–15%) /3/.

### 2.2.5 Super - Κράματα και Τιτάνιο

Τα super – κράματα και το τιτάνιο είναι κράματα ανθεκτικά στην θερμότητα με βάση το σίδηρο, το νικέλιο, το κοβάλτιο και το τιτάνιο. Είναι παρόμοια με τα υλικά ISO M, αλλά είναι πολύ πιο δύσκολο να κατεργαστούν και να κοπούν, με αποτέλεσμα τα κοπτικά εργαλεία να καταπονούνται ιδιαίτερα και έτσι να μειώνεται η διάρκεια ζωής τους. Η ομάδα ISO S μπορεί να χωριστεί σε σουπέρ κράματα ανθεκτικά στη θερμότητα (HRSA) και τιτάνιο. Τα υλικά HRSA μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες: κράματα με βάση το νικέλιο, το σίδηρο και το κοβάλτιο. Διαθέτουν αυξημένη περιεκτικότητα σε κράματα (Co

περισσότερο από Ni), με αποτέλεσμα καλύτερη αντοχή στη θερμότητα, αυξημένη αντοχή σε εφελκυσμό και υψηλότερη αντοχή στη διάβρωση /3/.

#### 2.2.6 Υπέρσκληρα Υλικά:

Στα υπέρσκληρα υλικά περιλαμβάνονται χάλυβες υψηλής σκληρότητας (45–65 HRC) και ο ψυχρός χυτοσίδηρος περίπου 400–600 HB. Η σκληρότητα αυτών των υλικών τα καθιστά δύσκολα στην κατεργασία με αποτέλεσμα να παράγουν μεγάλη θερμότητα κατά την κοπή. Αυτή η ομάδα υλικών περιέχει σκληρυμένους χάλυβες με σκληρότητα > 45–68 HRC /3/.

#### 2.2.7 Ο→Άλλο:

Σε αυτή την κατηγορία κατατάσσονται υλικά τα οποία είναι κυρίως συνθετικά (τα διάφορα θερμοπλαστικά, τα συνθετικά ανθρακονήματα, τα ενισχυμένα πλαστικά, το σκληρό καουτσούκ, ο τεχνικός γραφίτης κ.λπ.). Αρκετοί πλέον κλάδοι χρησιμοποιούν συνθετικά υλικά, ειδικά στην αεροδιαστημική βιομηχανία, στην αυτοκινητοβιομηχανία ιδιαίτερα στη Φόρμουλα 1 /3/.

### 2.3 Ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά κοπτικών εργαλείων

Η επιλογή κοπτικού εργαλείου είναι μία σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον προγραμματισμό μίας επιτυχούς κοπής. Η γνώση των κοπτικών εργαλείων και των ιδιοτήτων τους, καθώς και ο αναμενόμενος χρόνος ζωής του κάθε εργαλείου, είναι σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή του κατεργαζόμενου τεμαχίου, τις συνθήκες κοπής και το επίπεδο της ποιότητας επιφανείας που απαιτείται για κάθε κατεργασία /3/.

Τα υλικά των εργαλείων κοπής έχουν διαφορετικούς συνδυασμούς σκληρότητας, ανθεκτικότητας και αντοχής στη φθορά, για αυτό χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες με βάση τις συγκεκριμένες ιδιότητές τους. Ένα εργαλείο κοπής για να λειτουργήσει σωστά θα πρέπει να είναι:

- Ανθεκτικό στη φθορά και την παραμόρφωση
- Σκληρό ώστε να αντιστέκεται στην θραύση
- Μη δραστικό με το υλικό του τεμαχίου
- Χημικά σταθερό, ώστε να αντιστέκεται στην οξείδωση
- Ανθεκτικό στις απότομες θερμικές αλλαγές

Εργαλεία κοπής με επίστρωση καρβιδίων:

- Επίστρωση - CVD
- Επίστρωση - PVD
- Τσιμεντοειδές καρβίδιο

Τα επικαλυμμένα τσιμεντοειδή καρβίδια αντιπροσωπεύουν το 80-90% όλων των ένθετων εργαλείων κοπής. Η επιτυχία του υλικού οφείλεται στον συνδυασμό της υψηλής αντίστασης στην φθορά, στη σκληρότητα, καθώς και στη δυνατότητα να διαμορφώνεται σε διάφορα πολύπλοκα σχήματα. Αντίστοιχα τα επικαλυμμένα τσιμεντοειδή καρβίδια είναι τσιμεντένια καρβίδια με κάποια επίστρωση. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα είδη των επιστρώσεων των τσιμεντένιων καρβιδίων καθώς και τα χαρακτηριστικά τους /3/.

### 2.3.2 Επίστρωση – CVD



Σχήμα 2.2 Κοπτικό εργαλείο με επίστρωση CVD (Πηγή: Sandvik Coromant)

CVD - Chemical Vapor Deposition: Η επίστρωση CVD δημιουργείται από χημικές αντιδράσεις σε θερμοκρασίες από 700 έως και 1.050 ° C. Οι επιστρώσεις CVD έχουν υψηλή αντοχή στη φθορά και εξαιρετική επαφή με το τιμμεντένιο καρβίδιο. Το πρώτο καρβίδιο με επίστρωση CVD ήταν το καρβίδιο με επίστρωση τιτανίου μονής στιβάδας (TiC). Οι επιστρώσεις αλουμινίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

και νιτριδίου τιτανίου ( $\text{TiN}$ ) χρησιμοποιήθηκαν αργότερα. Οι σύγχρονες επικαλύψεις τιμμεντένιων καρβιδίων είναι οι επιστρώσεις ανθρακονιτριδίου τιτανίου (MT-Ti (C, N)) οι οποίες ανακαλύφθηκαν για τη βελτίωση της επαφής της επικάλυψης με το

καρβίδιο /3/.

Στις εφαρμογές στις οποίες η αντοχή στη φθορά είναι σημαντική, η επικάλυψη CVD είναι η πρώτη επιλογή. Τέτοιες εφαρμογές είναι η τόννευση, η διάτρηση και το φραιζάρισμα σε ISO P, ISO M και ISO K /3/.

### 2.3.3 Επίστρωση – PVD



Σχήμα 2.3 Κοπτικό εργαλείο με επίστρωση PVD (Πηγή: Sandvik Coromant)

PVD - Physical Vapor Deposition: η επίστρωση PVD βρίσκει εφαρμογή σε κατεργασίες με σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (400-600 ° C). Η διαδικασία κοπής περιλαμβάνει την εξάτμιση ενός μετάλλου το οποίο αντιδρά για παράδειγμα με το άζωτο, και σχηματίζει μία επίστρωση σκληρού νιτριδίου στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου. Οι επικαλύψεις PVD προσθέτουν αντοχή στη φθορά του κοπτικού εργαλείου λόγω της σκληρότητάς τους. Οι πολλαπλές πολύ λεπτές επιστρώσεις έχουν ως αποτέλεσμα, η συνολική επίστρωση να είναι ακόμα πιο σκληρή /3/.

Τα κοπτικά εργαλεία με επίστρωση PVD είναι ιδανικά για την δημιουργία αυλακώσεων και σπειρωμάτων, για κοπή σε φραιζα, αλλά και για κατεργασίες φινιρίσματος και διάτρησης.

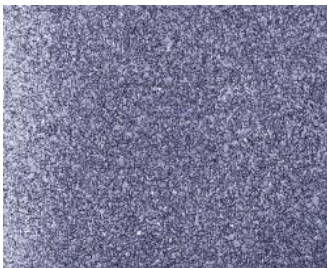
### 2.3.4 Τιμμεντοειδές Καρβίδιο

Τα τιμμεντοειδή καρβίδια είναι αποτέλεσμα κονιομεταλλουργίας από σωματίδια καρβιδίου του βολφραμίου (WC) με συνδετικό υλικό το κοβάλτιο (Co). Σε εφαρμογές κοπής μετάλλων αποτελούνται από 80% WC σκληρής φάσης. Το σώμα του καρβιδίου σχηματίζεται είτε μέσω τεχνικών συμπίεσης κόνεως είτε μέσω τεχνικών έγχυσης. Το μέγεθος κόκκων WC είναι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για τη ρύθμιση της σκληρότητας του καρβιδίου. Λεπτότερο μέγεθος κόκκων σημαίνει μεγαλύτερη σκληρότητα σε μια δεδομένη περιεκτικότητα του συνδετικού υλικού. Η ποσότητα του συνδετικού υλικού είναι υπεύθυνη σε ένα βαθμό, για τη σκληρότητα και την αντοχή του καρβιδίου. Για παράδειγμα σε δύο καρβίδια με ίσο μέγεθος κόκκων WC, η αυξημένη ποσότητα σε Co σε ένα από τα δύο καρβίδια έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη σκληρότητα.



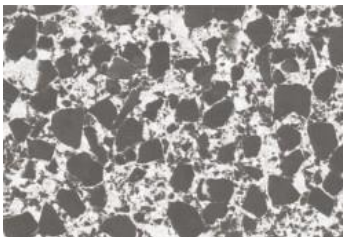
Σχήμα 2.4 Τσιμεντοειδές Καρβίδιο με μεσαίο μέγεθος κόκκων (Πηγή: Sandvik Coromant)

- Τσιμεντοειδές καρβίδιο με μεσαίο έως χονδρό μέγεθος κόκκων: διαθέτουν υψηλή σκληρότητα και χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με επιστρώσεις CVD ή PVD σε ένα πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών /3/.



Σχήμα 2.5 Τσιμεντοειδές Καρβίδιο με μικρό μέγεθος κόκκων (Πηγή: Sandvik Coromant)

- Τσιμεντοειδές καρβίδιο με μικρό μέγεθος κόκκων: χρησιμοποιείται για την δημιουργία καρβιδίου με αιχμηρές κοπτικές ακμές. Επίσης χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με επίστρωση PVD για μεγαλύτερη αντοχή. Τυπικές κατεργασίες εφαρμογής του λεπτόκοκκου τσιμεντοειδούς καρβιδίου είναι το φραιζάρισμα, η κοπή αυλακώσεων, το φινιρίσμα και η διάτρηση.



Σχήμα 2.6 Τσιμεντοειδές Καρβίδιο με κλίση (Πηγή: Sandvik Coromant)

- Τσιμεντοειδές καρβίδιο με κλίση: χρησιμοποιείται σε κατεργασίες τórνευσης και σε κατεργασίες δημιουργίας αυλάκωσης σε χάλυβες και σε ανοξείδωτους χάλυβες /3/.

### 2.3.5 Μη Επικαλυμμένα Τσιμεντοειδή Καρβίδια



Σχήμα 2.7 Μη επικαλυμμένο τσιμεντοειδές Καρβίδιο κόκκων (Πηγή: Sandvik Coromant)

Τα κοπτικά εργαλεία τσιμεντοειδούς καρβιδίου χωρίς επίστρωση αντιπροσωπεύουν ένα πολύ μικρό ποσοστό των κοπτικών εργαλείων. Ο ρυθμός φθοράς τους είναι γρήγορος αλλά ελεγχόμενος, διαθέτοντας επιπλέον την δυνατότητα ακονίσματος /3/.

Τυπικές εφαρμογές αυτού του είδους των κοπτικών εργαλείων είναι η κατεργασία των HRSA (heat resistant super alloys) υλικών, ή κατεργασία κραμάτων τιτανίου και υπέρσκληρων υλικών σε χαμηλές ταχύτητες /3/.

### 2.3.6 Εργαλείο Κοπής από Κεραμικό Μέταλλο



Σχήμα 2.7  
Εργαλείο κοπής  
από κεραμικό  
μέταλλο (Πηγή:  
Sandvik  
Coromant)

Τα εργαλεία κοπής από κεραμικό μέταλλο είναι τσιμεντοειδή καρβίδια με βάση σωματίδια τιτανίου. Αρχικά τα κεραμικά μέταλλα ήταν σύνθετα υλικά από καρβίδιο του τιτανίου και νικέλιο, ενώ πλέον τα σύγχρονα κεραμικά μέταλλα είναι χωρίς νικέλιο και η δομή τους αποτελείται από ανθρακονιτρίδιο του τιτανίου  $Ti(C, N)$  με συνδετικά υλικά το κοβάλτιο και το βολφράμιο. Το ανθρακονιτρίδιο του τιτανίου  $Ti(C, N)$  προσθέτει αντοχή στη φθορά, και αντοχή στην πλαστική παραμόρφωση, ενώ η ποσότητα κοβαλτίου ελέγχει τη σκληρότητα. Επιπλέον τα κεραμικά μέταλλα μπορούν επικαλυφθούν με PVD για βελτιωμένη αντοχή στη φθορά. Κατά την κατεργασία κοπής είναι καλό να χρησιμοποιείται χαμηλός ρυθμός αφαίρεσης υλικού και μικρό βάθος κοπής /3/.

Τυπικές εφαρμογές των εργαλείων κοπής από κεραμικό υλικό είναι το φινίρισμα σε ανοξείδωτο χάλυβα, η κατεργασία σε χάλυβα με χαμηλό ποσοστό άνθρακα και η κατεργασία σε φερίπτικούς χάλυβες /3/.

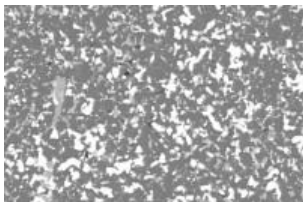
### 2.3.7 Κεραμικό Εργαλείο Κοπής



Σχήμα 2.8 Κεραμικό εργαλείο  
κοπής (Πηγή: Sandvik Coromant)

Τα κεραμικά εργαλεία κοπής έχουν πολύ υψηλή αντοχή σε φθορά ακόμα και σε υψηλές ταχύτητες. Επιπλέον διαθέτουν υψηλή παραγωγικότητα όταν επιτυγχάνεται σωστή χρήση τους. Υπάρχει μία σειρά από διαφορετικές ποιότητες κεραμικών εργαλείων διαθέσιμες για μία ποικιλία εφαρμογών και είναι οι εξής:

- Κεραμικά Οξειδία: βασίζονται σε οξείδια του αργιλίου ( $Al_2O_3$ ), με κάποιες προσθήκες ζirkονίου ( $ZrO_2$ ) για αναστολή ρωγμών. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα χημικά σταθερό υλικό το οποίο όμως διαθέτει μικρότερη αντίσταση στα θερμικά σοκ



Σχήμα 2.9 Μικροδομή  
μικτού κεραμικού  
εργαλείου κοπής (Πηγή:  
Sandvik Coromant)

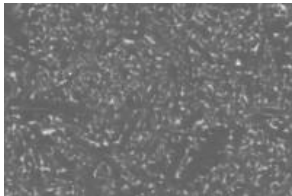
- Μικτά Κεραμικά: είναι ενισχυμένα μέσω της προσθήκης κυβικών καρβιδίων ή ανθρακονιτρίδιων ( $TiC$ ,  $Ti(C, N)$ ), με αποτέλεσμα μεγαλύτερη σκληρότητα και θερμική αγωγιμότητα /3/.





Σχήμα 2.10 Μικροδομή ενισχυμένου κεραμικού εργαλείου κοπής (Πηγή: Sandvik Coromant)

- Ενισχυμένα κεραμικά: τα κεραμικά αυτά εργαλεία κοπής είναι ενισχυμένα με καρβίδιο του πυριτίου ( $\text{SiC}_w$ ) με σκοπό την πολύ μεγάλη αύξηση στη σκληρότητα. Τα συγκεκριμένα κεραμικά εργαλεία κοπής είναι ιδανικά για την κατεργασία κραμάτων με βάση το Ni /3/.



Σχήμα 2.11 Μικροδομή κεραμικού νιτριδίου του πυριτίου εργαλείου κοπής (Πηγή: Sandvik Coromant)

- Κεραμικά Νιτριδίου του Πυριτίου ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ): είναι επιμήκεις κρύσταλλοι οι οποίοι σχηματίζουν ένα ενισχυμένο υλικό με υψηλή αντοχή. Τα κεραμικά αυτά είναι επιτυχημένα στην κοπή γκρι χυτοσιδήρου, αν και η έλλειψη χημικής σταθερότητας περιορίζει τη χρήση τους σε διαφορετικά υλικά /3/.

- Κεραμικά  $\text{SiAlON}$ : συνδυάζουν τη δύναμη ενός δικτύου από νιτρίδιο του πυριτίου με μεγάλη χημική σταθερότητα. Τα κεραμικά  $\text{SiAlON}$  είναι ιδανικά για τη μηχανική κατεργασία ανθεκτικών στη θερμότητα κραμάτων (HRSA).

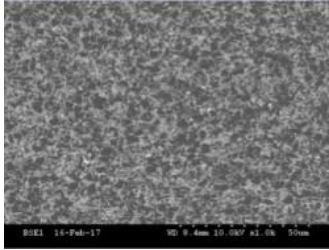
Τα κεραμικά εργαλεία κοπής μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κοπή πολλών διαφορετικών τεμαχίων κατά τη διάρκεια κοπής σε τόρνο, φραιζα, αλλά σε κατεργασίες δημιουργίας αυλάκωσης /3/.

### 2.3.8 Πολυκρυσταλλικό Κυβικό Βοριονιτρίδιο



Σχήμα 2.12 Κεραμικό εργαλείο κοπής από πολυκρυσταλλικό κυβικό βοριονιτρίδιο (Πηγή: Sandvik Coromant)

Το πολυκρυσταλλικό κυβικό βοριονιτρίδιο CBN, είναι ένα υλικό εργαλείου κοπής με εξαιρετική σκληρότητα η οποία διατηρείται και σε υψηλές ταχύτητες κοπής καθώς διαθέτει και υψηλή αντοχή σε θερμικά σοκ. Τα σύγχρονα εργαλεία κοπής CBN αποτελούνται από κεραμικά υλικά, τα οποία λειτουργούν και σαν συνδετικά, με περιεκτικότητα σε CBN 40-65%. Το κεραμικό συνδετικό υλικό προσθέτει στο CBN μεγάλη αντοχή σε φθορά. Μία άλλη ομάδα κοπτικών εργαλείων από CBN, είναι τα CBN υψηλής περιεκτικότητας, τα οποία αποτελούνται από 85% έως και 100% CBN. Αυτού του είδους τα CBN μπορεί να έχουν ως συνδετικό υλικό κάποιο μεταλλικό υλικό ώστε να βελτιώσουν την αντοχή τους. Τα CBN για να σχηματίσουν το ένθετο κοπής συγκολλούνται πάνω σε κάποιο τσιμεντοειδές καρβίδιο /3/.



Σχήμα 2.13 Μικροδομή κεραμικού πυριτίου εργαλείου κοπής από πολυκρυσταλλικό κυβικό βοριονιτρίδιο (Πηγή: Sandvik Coromant)

Τα εργαλεία κοπής CBN βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε κατεργασίες φινιρίσματος (αποπεράτωσης) υπέρσκληρων υλικών με σκληρότητα πάνω από 45 HRC. Σε τεμάχια με σκληρότητα πάνω από 55 HRC, το CBN είναι το μόνο εργαλείο κοπής που μπορεί να αντικαταστήσει τις παραδοσιακά χρησιμοποιούμενες μεθόδους λείανσης. Οι μαλακότεροι χάλυβες, κάτω των 45 HRC, περιέχουν

υψηλότερη ποσότητα φερρίτη, η οποία έχει αρνητική επίδραση στην αντοχή σε φθορά του CBN. Χρησιμοποιείται επίσης, σε κατεργασίες τórνευσης και φραιζαρίσματος με υψηλές ταχύτητες κοπής /3/.

### 2.3.9 Πολυκρυσταλλικό Διαμάντι



Σχήμα 2.12 Κεραμικό εργαλείο κοπής από πολυκρυσταλλικό διαμάντι (Πηγή: Sandvik Coromant)

Τα κοπτικά εργαλεία από πολυκρυσταλλικό διαμάντι PCD αποτελούνται από σωματίδια διαμαντιού τα οποία έχουν τηχθεί μαζί με κάποιο μέταλλο που παίζει τον ρόλο του συνδετικού υλικού. Το διαμάντι είναι το πιο σκληρό και ανθεκτικό στην τριβή υλικό από όλα τα υλικά. Έτσι λοιπόν ενώ

διαθέτει καλή αντοχή στην φθορά, στερείται την χημική σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα εργαλεία PCD περιορίζονται στη χρήση σε μη σιδηρούχα υλικά, όπως αλουμίνιο με υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο, σε σύνθετα μεταλλικά πλέγματα (MMC) και πλαστικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP). Τα PCD με ψυκτικό υγρό μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε κατεργασίες αποπεράτωσης τιτανίου /3/.

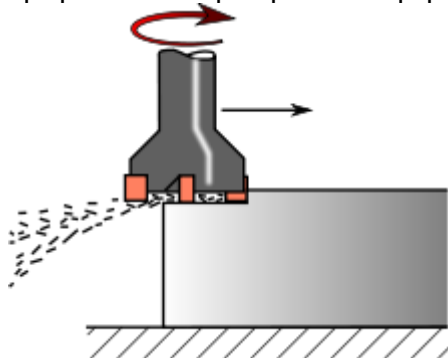
### 3 Διαδικασία Φραιζαρίσματος

#### 3.2 Εισαγωγή

Το φραιζάρισμα είναι μία από τις πιο σημαντικές μεθόδους κατεργασίας τεμαχίων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία. Η κατεργασία του φραιζαρίσματος επηρεάζεται από πολλές διαφορετικές παραμέτρους όπως η ταχύτητα κοπής, το βάθος κοπής, η δύναμη κοπής κ.α.. Παρακάτω παρατίθενται στοιχεία σχετικά με τον εντοπισμό και την καταγραφή των ιδανικών παραμέτρων κατεργασίας για τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά τεμαχίων καθώς και των αντίστοιχων κοπτικών εργαλείων.

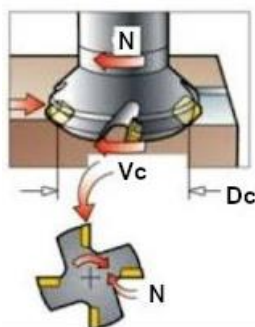
#### 3.2 Φραιζάρισμα (milling)

Το φραιζάρισμα είναι η διαδικασία κοπής, κατά την οποία ένα εργαλείο φραιζαρίσματος αφαιρεί υλικό από την επιφάνεια ενός προς κατεργασία υλικού. Τα εργαλεία φραιζαρίσματος είναι περιστρεφόμενα εργαλεία κοπής, συχνά με πολλαπλά σημεία κοπής. Η διαφορά με τη διάτρηση είναι ότι το εργαλείο κοπής δεν κινείται κατά μήκος του άξονα περιστροφής του, αλλά κάθετα προς τον άξονα του με αποτέλεσμα η κοπή να πραγματοποιείται στην περιφέρεια του κοπτικού εργαλείου. Τα εργαλεία κοπής φραιζαρίσματος διαθέτουν πολλές κοπτικές ακμές διατεταγμένες σε κύκλο. Αυτές οι κοπτικές ακμές έχουν τη μορφή σφήνας (όπως και τα κοπτικά εργαλεία τórνευσης) ώστε να εισέρχονται στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Με την κατεργασία του φραιζαρίσματος αφαιρείται υλικό με αρκετά διαφορετικά περάσματα.



Σχήμα 3.1 Κοπή σε φραίζα

Στο φραιζάρισμα η περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου αποτελεί την κύρια κίνηση κοπής της κατεργασίας. Μία αρκετά σημαντική παράμετρος της ταχύτητας κοπής είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου, η οποία κάθε φορά επιλέγεται σε συνδυασμό με το κατεργαζόμενο υλικό, το υλικό του κοπτικού εργαλείου και το είδος του φραιζαρίσματος. Από την άλλη, το κατεργαζόμενο κομμάτι σταθεροποιείται στο τραπέζι της εργαλειομηχανής και μετατοπίζεται με συγκεκριμένο ρυθμό, ο οποίος εκφράζει την ταχύτητα προώσεως.



$$N = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_c}$$

Vc: Ταχύτητα Κοπής (m/min)  
N: Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)  
Dc: Διάμετρος Εργαλείου (mm)

Σχήμα 3.2 Σχετική γραμμική ταχύτητα στο σημείο επαφής μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου εργασίας



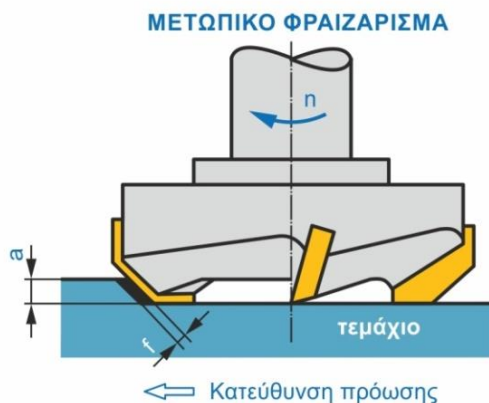
Κατά την κοπή, οι κοπτικές ακμές του κοπτικού εργαλείου εισέρχονται και εξέρχονται σε μικρό διάστημα από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, με αποτέλεσμα την κοπή του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Κατά την επαφή του εργαλείου με το τεμάχιο παράγεται θερμότητα λόγω τριβής, ενώ κατά την διάρκεια που το εργαλείο και το τεμάχιο δεν είναι σε επαφή η θερμότητα που έχει παραχθεί απάγεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κοπτικό εργαλείο να μην καταπονείται θερμικά όπως το κοπτικό εργαλείο του τόννου, το οποίο βρίσκεται συνεχώς σε επαφή με το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Για αυτό το λόγο η κοπή στο φραιζάρισμα ονομάζεται διακοπτόμενη. Αν και αυτό το είδος κοπής ευνοεί το κοπτικό εργαλείο σε σχέση με τη θερμική καταπόνηση, φαίνεται πως η συνεχής απότομη επαφή του εργαλείου με το κατεργαζόμενο τεμάχιο έχει ως αποτέλεσμα την καταπόνηση του κοπτικού εργαλείου με κρουστικά φορτία. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση του κινδύνου αστοχίας του κοπτικού εργαλείου.

### 3.3 Είδη Φραιζαρίσματος

Το φραιζάρισμα μπορεί να διακριθεί ανάλογα με την κατεύθυνση του άξονα του κοπτικού εργαλείου ως προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια, σε περιφερικό και μετωπικό. Όταν ο άξονας του κοπτικού εργαλείου είναι παράλληλος με την επιφάνεια την οποία κατεργάζεται, τότε έχουμε περιφερικό φρεζάρισμα. Σε αυτή την περίπτωση, το κοπτικό εργαλείο έχει κυλινδρική μορφή και έχει την δυνατότητα να αφαιρεί τα απόβλητα από το τεμάχιο με την βοήθεια των περιφερικά διατεταγμένων κοπτικών ακμών. Στο μετωπικό φραιζάρισμα ο άξονας του κοπτικού εργαλείου είναι κάθετος στην κατεργαζόμενη επιφάνεια, ενώ το κοπτικό εργαλείο έχει εκτός από τις περιφερειακές κοπτικές ακμές και ακμές στο μπροστά και πίσω πρόσωπό του.

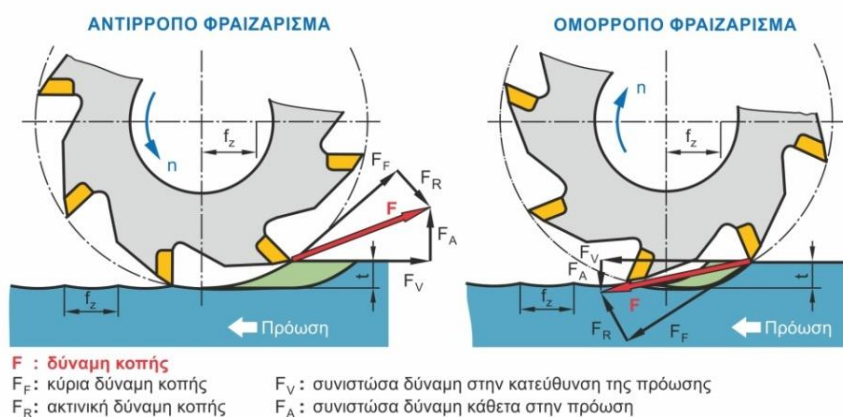


Σχήμα 3.3 Περιφερικό Φραιζάρισμα

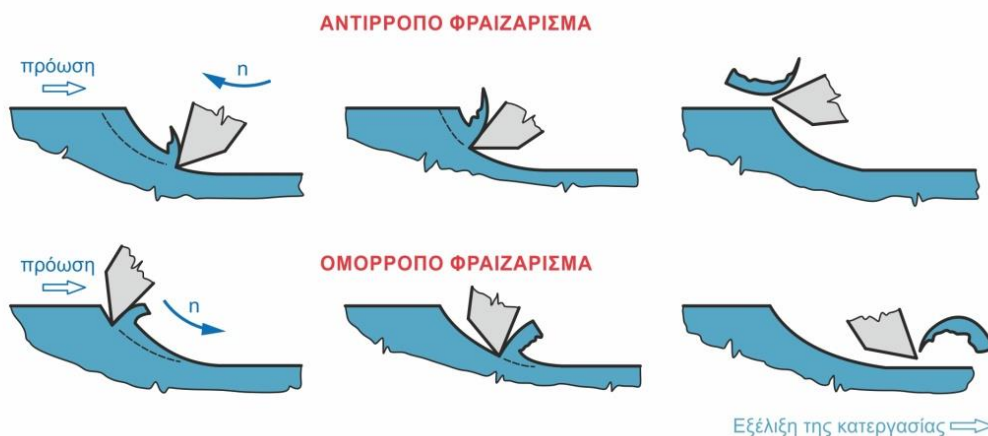


Σχήμα 3.4 Μετωπικό Φραιζάρισμα

Επίσης το περιφερικό φραιζάρισμα διακρίνεται σε δύο επιμέρους κατηγορίες με βάση την πρόωση του τεμαχίου, σε ομόρροπο και αντίρροπο. Στο αντίρροπο φραιζάρισμα το απόβλιπτο ξεκινά από λεπτό και καταλήγει σε πιο χοντρό, πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει στο ομόρροπο. Συνέπεια αυτού, είναι στο ομόρροπο φραιζάρισμα το κοπτικό εργαλείο να προσλαμβάνει ισχυρότερες καταπονήσεις κατά τη διάρκεια της εισόδου του στο τεμάχιο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο κίνδυνος αστοχίας του ή ακόμα και θραύσης του. Παρόλα αυτά στο ομόρροπο φραιζάρισμα η κοπή είναι πιο σταθερή, διότι από την κινηματική παρατηρείται ότι το κοπτικό εργαλείο ασκεί πίεση στο τεμάχιο πάνω στο τραπέζι της φραιζας. Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί και από την κατεύθυνση των δυνάμεων κοπής /4/.



Σχήμα 3.5 Ομόρροπο και Αντίρροπο Φραιζάρισμα



Σχήμα 3.6 Μορφή αποβλίπτου στο ομόρροπο και αντίρροπο φραιζάρισμα

### 3.4 Η Φραιζα

Λόγω των διαφορετικών κατεργασιών στη φραιζα, είναι απαραίτητη η ύπαρξη διαφορετικών τύπων φραιζας ώστε να επιτυγχάνεται οικονομικότερη και καλύτερη κατεργασία. Για αυτό έχουμε τα εξής είδη φραιζας:

- Οριζόντια Φραιζομηχανή
- Κάθετη Φραιζομηχανή
- Κέντρο Κατεργασίας



Σχήμα 3.7 Οριζόντια φραιζομηχανή

Στην οριζόντια φραιζομηχανή ο κύριος άξονας που μεταδίδει την περιστροφική κίνηση στο κοπτικό εργαλείο είναι οριζόντιος. Τα κύρια μέρη της οριζόντιας φραιζομηχανής είναι:

1. Η βάση
2. Ο κορμός
3. Η κύρια άτρακτος
4. Το συγκρότημα τραπεζιού



Σχήμα 3.8 Κάθετη φραιζομηχανή

Το κύριο χαρακτηριστικό της κάθετης φραιζομηχανής είναι ότι ο κύριος άξονας που μεταδίδει την κίνηση στο εργαλείο είναι κάθετος. Τα κύρια μέρη μία κάθετης φραιζομηχανής δεν διαφέρουν από τα αντίστοιχα της οριζόντιας εκτός από τη διαμόρφωση της κεφαλής.



Σχήμα 3.9 Κέντρο κατεργασίας

Κέντρα κατεργασίας ονομάζονται οι σύγχρονες μηχανές φραιζαρίσματος με ψηφιακή καθοδήγηση, οι οποίες διαθέτουν τη δυνατότητα αυτόματης αλλαγής κοπτικού εργαλείου. Το κάθε κέντρο κατεργασίας διαθέτει ένα συγκεκριμένο αριθμό κατευθύνσεων και κινήσεων, οι οποίες ελέγχονται από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή και ένα πρόγραμμα καθοδήγησης. Ο αριθμός των κατευθύνσεων και των κινήσεων που διαθέτει ένα κέντρο κατεργασίας είναι που το χαρακτηρίζουν σε φραιζα 2 αξόνων ή 2 ½ αξόνων ή 3, 4, 5 ή 6 αξόνων. Με την αύξηση των αξόνων σε μία φραιζα αυξάνονται ταυτόχρονα οι δυνατότητές της αλλά και

το κόστος της /4/.

### 3.5 Κοπτικά Εργαλεία Φραιζαρίσματος



Σχήμα 3.10 Κοπτικά εργαλεία φραιζαρίσματος (Φραιζες)

Κάθε διαφορετικό είδος φραιζαρίσματος απαιτεί διαφορετικό κοπτικό εργαλείο. Συχνά τα εργαλεία στις φραιζομηχανές είναι κατασκευασμένα από χυτοχάλυβα, διότι επιτρέπει την κοπή σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής σε σχέση με τους κοινούς χάλυβες. Αρκετά συχνά χρησιμοποιούνται ως κοπτικά εργαλεία και τα πλακίδια σκληρομετάλλων. Οι συνηθέστερες

μορφές κοπτικών εργαλείων φραιζας είναι τα κυλινδρικά, τα δισκοειδή, τα πριονοειδή, οι κοπτήρες μορφής, τα κοχλιωτά και τα κονδύλια.

Επιπλέον τα κοπτικά εργαλεία διακρίνονται με βάση τον αριθμό των κοπτικών ακμών σε κοπτήρες μίας κόψης, δίκοποι και τρίκοποι, καθώς και με βάση την κατεργασία σε ελαφρού ή βαρέως τύπου.

Είδος Φραιζαρίσματος	Είδος Κοπτήρα (Φραιζας)	Μορφή Κοπτήρα
<b>Περιφερικό</b>	Περιφερικός ή Κυλινδρικός	
	Κονδυλοειδής	
	Αυλάκων (Τριπλής κοπής ή Τρίκοπος)	
	Δισκοειδής	
	Σχίσματος (Πριονόδισκος)	
	Μορφής (Μορφοκοπτήρας)	
<b>Μετωπικό</b>	Μετωπικός	
	Πρισματικός (Οξείας Γωνίας)	
	Μετωπικός (Ενθετων Δοντιών)	
<b>Περιφερικό-Μετωπικό</b>	Περιφερικός (Κυλινδρικός)-Μετωπικός	

Πίνακας 3.1 Διάκριση κοπτικών εργαλείων φραιζας με βάση το είδος φραιζαρίσματος

Τα κονδυλοειδή εργαλεία είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα εργαλεία στις κατεργασίες φραιζαρίσματος και πολλές φορές χρησιμοποιούνται στο στάδιο της αποπεράτωσης. Αποτελούνται από ένα κυλινδρικό σώμα, όπου κατά μήκος του υπάρχουν μία ή περισσότερες κοπτικές ακμές με τυπικές γωνίες ελίκωσης μεταξύ 15° και 30° /5/.

## 4 Κατεργασιμότητα Μεταλλικών Υλικών

### 4.1 Ορισμός

Ορισμός: οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την κατεργασιμότητα είναι τρεις και είναι οι εξής:

1. Η κατηγορία υλικών στην οποία ανήκει το προς κατεργασία τεμάχιο με βάση τις μηχανικές και μεταλλουργικές του ιδιότητες
2. Η γεωμετρική μορφή, της προς κατεργασία επιφάνειας του τεμαχίου
3. Το υλικό του εργαλείου κοπής, σε συνδυασμό με τις επιπλέον προσθήκες που μπορεί να έχει.



Σχήμα 4.1  
Απόβλιπτο  
τεμαχίου μετά από  
κατεργασία  
φραιζαρίσματος  
Πηγή: Sandvik  
Coromant

Οι παραπάνω τρεις παράγοντες έχουν τον πιο σημαντικό ρόλο στην κατεργασιμότητα του τεμαχίου αλλά υπάρχουν και κάποιοι επιπλέον παράγοντες που την επηρεάζουν. Τέτοιοι παράγοντες είναι οι δυνάμεις κοπής, τα δεδομένα κοπής, οι γενικές συνθήκες κατεργασίας κ.α..

Η κατεργασιμότητα σαν όρος δεν έχει άμεσο ορισμό. Με μία πιο ευρεία έννοια δείχνει την ικανότητα επεξεργασίας του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου και τη φθορά την οποία μπορεί να δημιουργήσει στην κοπτική ακμή του κοπτικού εργαλείου. Για παράδειγμα ένας χάλυβας με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα έχει μεγαλύτερη κατεργασιμότητα σε σχέση με τους απαιτητικούς ανοξείδωτους χάλυβες. Οι περισσότερες αξιολογήσεις για την κατεργασιμότητα των υλικών βασίζονται σε πρακτικές δοκιμές των διαφόρων υλικών στις ίδιες συνθήκες κατεργασίας και στη συνέχεια τα αποτελέσματα των υλικών συγκρίνονται μεταξύ τους /3/.

Η ταχύτητα κοπής ( $V_c$ ) καθώς και ο ρυθμός αφάιρεσης υλικού ( $f_z$ ) είναι οι πρώτες βασικές παράμετροι που επιλέγονται για μία επιτυχημένη κοπή. Η επιλογή αυτών των παραμέτρων εξαρτάται από διαφορετικούς παράγοντες. Ο πρώτος παράγοντας είναι το είδος του καρβιδίου κοπής. Ένα σκληρότερο καρβίδιο έχει μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά και έτσι έχει δυνατότητα κοπής σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής. Αντίθετα ένα καρβίδιο με υψηλή σκληρότητα αλλά ταυτόχρονα καλή αντοχή πρόσκρουσης, περιορίζεται σε μικρότερες ταχύτητες κοπής αλλά έχει τη δυνατότητα κοπής με μεγαλύτερο ρυθμό αφάιρεσης υλικού. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την επιλογή των παραμέτρων κοπής είναι η επεξεργασία στην οποία έχουν υποβληθεί το κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο. Για παράδειγμα, η κατεργασιμότητα δύο ίδιων υλικών μπορεί να είναι διαφορετική για κάθε ένα από αυτά αν έχουν υποβληθεί σε κάποιο διαφορετικό είδος κατεργασίας όπως είναι η ανόπτηση ή η βαφή. Επιπλέον η γεωμετρία του ένθετου πλακιδίου είναι σημαντική για την επιλογή των παραμέτρων κοπής. Για παράδειγμα μία αιχμηρή ακμή είναι αρκετά εύθραστη, οπότε δεν αντέχει μεγάλους ρυθμούς αφάιρεσης κοπής, διότι δε μπορεί να αντισταθεί σε μεγάλες δυνάμεις κοπής. Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει τις συνθήκες κοπής είναι το σώμα του κοπτικού εργαλείου και η αξιόπιστη στερέωση του ένθετου πλακιδίου, τα οποία μπορούν να εξασφαλίσουν μηχανική κατεργασία με υψηλά δεδομένα κοπής. Επίσης το στάδιο της κατεργασίας παίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή των παραμέτρων. Για παράδειγμα όταν βρισκόμαστε στο στάδιο της εκχόνδρισης επιλέγουμε μεγάλο ρυθμό αφάιρεσης υλικού σε συνδυασμό με μέτρια ταχύτητα κοπής. Στο στάδιο της αποπεράτωσης επιλέγουμε μέγιστες ταχύτητες κοπής και μικρό έως μεσαίο ρυθμό αφάιρεσης υλικού. Περιορισμοί, όπως μεγάλες προεξοχές ή κοιλότητες οδηγούν σε

χαμηλότερες συνθήκες κοπής ή σε χαμηλότερους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού ή σε μείωση και των δύο /6/.

## 4.2 Κατεργασιμότητα των διαφόρων κατηγοριών των υλικών

### 4.2.1 Χάλυβες

Η κατεργασιμότητα των χαλύβδινων τεμαχίων διαφέρει ανάλογα με τα στοιχεία του κράματος, τη θερμική επεξεργασία και τη διαδικασία κατασκευής (έλαση, σφυρηλάτηση, χύτευση κ.λπ.). Γενικά, τα τεμάχια από χάλυβα με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα απαιτούν πιο αιχμηρή ακμή κοπής στο κοπτικό εργαλείο και δυνάμεις κοπής από 1.400-3.100 N/mm<sup>2</sup>. Αφού οι δυνάμεις κοπής διατηρούνται σε ένα σταθερό εύρος, το ίδιο θα ισχύει και για τη δύναμη που απαιτείται ώστε να μπορέσει το τεμάχιο να κατεργαστεί.

### 4.2.2 Ανοξείδωτοι Χάλυβες

Η κατεργασιμότητα των ανοξείδωτων χαλύβων διαφέρει ανάλογα με τα στοιχεία κράματος, τη θερμική επεξεργασία και τη διαδικασία κατασκευής (έλαση, σφυρηλάτηση, χύτευση κ.λπ.), όπως και στους χάλυβες. Η κατεργασιμότητα των ανοξείδωτων χαλύβων μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κράματα. Τα διάφορα εξελιγμένα κοπτικά εργαλεία είναι διαθέσιμα για την κατεργασία των τεμαχίων από ανοξείδωτο χάλυβα. Το εύρος της δύναμης κοπής για τους ανοξείδωτους χάλυβες είναι από 1.800-2.850 N/mm<sup>2</sup>. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο (N) διαθέτουν αυξημένη αντοχή και αυξημένη αντίσταση στην διάβρωση, αλλά έχουν μειωμένη δυνατότητα κατεργασίας.

### 4.2.3 Χυτοσίδηρος

Τα τεμάχια από χυτοσίδηρο συχνά κατασκευάζονται με ένθετα αρνητικού τύπου, καθώς διαθέτουν ισχυρές κοπτικές ακμές και ασφαλείς εφαρμογές. Η δύναμη κοπής κυμαίνεται από 790-1.350 N/mm<sup>2</sup>. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας του χυτοσιδήρου σε υψηλές ταχύτητες, συχνά δημιουργείται φθορά στο κοπτικό εργαλείο αλλά και τραχεία επιφάνεια στο τελικό τεμάχιο. Για το λόγο αυτό συνήθως αποφεύγεται.

### 4.2.4 Μη σιδηρούχα μέταλλα

Τα μη σιδηρούχα κράματα όπως το αλουμίνιο είναι μαλακά μέταλλα, οπότε λόγω του ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά την κοπή λιώνουν και αποκτούν μία πιο “κολλώδη” μορφή, απαιτείται κοπτικό εργαλείο με μία αρκετά αιχμηρή κοπτική ακμή και υψηλή ταχύτητα κοπής. Η δύναμη κοπής για την κοπή μη σιδηρούχων μετάλλων κυμαίνεται από 350-700 N/mm<sup>2</sup>. Όπως προκύπτει από το εύρος τιμών της δύναμης κοπής, κατά την επεξεργασία μη σιδηρούχων μετάλλων οι ανάγκες σε ισχύ είναι σχετικά χαμηλές.

### 4.2.5 Super-Κράματα και Τιτάνιο

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 4 η ανόπτηση και η γήρανση επηρεάζουν τις συνθήκες κατεργασίας σε μεγάλο βαθμό, διότι αλλάζει η σκληρότητα του υλικού. Το εύρος της δύναμης κοπής κυμαίνεται από 2.400–3.100 N / mm<sup>2</sup> για HRSA (Heat Resistant Super Alloys) και 1.300–1.400 N / mm<sup>2</sup> για το τιτάνιο. Όπως φαίνεται, οι δυνάμεις κοπής καθώς



και η ισχύς που απαιτείται για την κοπή αυτών των υλικών, κυμαίνονται σε αρκετά υψηλά επίπεδα.

#### 4.3 Φορτίο 'δοντιών' κοπτικού εργαλείου

Το φορτίο 'δοντιών' έχει την έννοια της αντίστασης που δέχεται το κοπτικό εργαλείο κατά τη διαδικασία της κοπής.

Το μέγεθος της αντίστασης των 'δοντιών' του κοπτικού εργαλείου είναι συνάρτηση του:

- Βάθους κοπής  $h$
- Πλάτους κοπής  $b$

Η αντίσταση των 'δοντιών' αντικατοπτρίζεται από ένα κλάσμα που περιλαμβάνει, την κοπτική ακμή που εμπλέκεται στην κοπή και τη διαδρομή του 'δοντιού' στο τεμάχιο από την είσοδό του μέχρι την εξοδό του από το τεμάχιο. Όσο περισσότερο το 'δόντι' του κοπτικού εργαλείου παραμένει στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, τόσο πιο έντονα θερμικά φορτία αντιμετωπίζει, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η διάρκεια ζωής του/6/.

Στον πίνακα 4.2 περιλαμβάνονται δεδομένα για την ποσότητα αφαιρούμενου υλικού από το τεμάχιο ανά "δόντι". Οι μικρότερες τιμές ποσότητας αφαιρούμενου υλικού αναφέρονται στην φάση της αποπεράτωσης ενώ οι μεγαλύτερες τιμές συνήθως χαρακτηρίζουν τη φάση της εκχόνδρισης. Ένα τεχνολογικά αστεθές σύστημα κοπής χαρακτηρίζεται από 20-30% μείωση στην ποσότητα αφαιρούμενου υλικού από το τεμάχιο κατά τη διάρκεια της κοπής.

Ταχύτητα εκκίνησης:  $V_c = V_o \times K_s \times K_t$

Όπου:

- $V_c$  - αρχική ταχύτητα κοπής
- $V_o$  - βασική ταχύτητα κοπής
- $K_s$  - συντελεστής σταθερότητας
- $K_t$  - συντελεστής ζωής εργαλείου

Η βασική ταχύτητα κοπής  $V_o$ : Ο πίνακας 4.1 καθορίζει την βασική ταχύτητα κοπής ανάλογα με το είδος του καρβιδίου, το υλικό του τεμαχίου και τον τύπο της κατεργασίας. Η ταχύτητα κοπής σχετίζεται με μία περίοδο ζωής του εργαλείου περίπου 20 λεπτών. Για να προσδιοριστεί η δυσκολία της κατεργασίας σε ελαφριά, μέτρια, και βαριά κατεργασία θα πρέπει να ελεγχθούν δύο επιμέρους παράμετροι, το φορτίο των 'δοντιών' και ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού ανά 'δόντι' /6/.

ISO Class DIN/ISO 513	Υλικό Κατεργαζόμενου Τεμαχίου				Ταχύτητα Κοπής V <sub>o</sub> (m/min), για τα είδη των κοπτικών και των διαφορετικών κατεργασιών																	
	Είδος	Ομάδα Υλικών	σ <sub>T</sub> , N/mm	Σκληρότητα	IC808			IC5100			IC810			DT7150			IC830			IC330		
					L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
P	Χάλυβας Άνθρακα	1	<850	<250	300	240	220				260	230	200				200	170	150	185	160	135
		2-4	<850	<250	280	220	200				240	200	180				180	150	135	170	140	125
		5	>850 <1000	>250 <300	240	200	180				215	190	170				150	135	120	135	120	115
	Κράματα Χάλυμα	6, 7	<1000	<300	230	200	170				200	180	160				170	140	125	150	135	120
		8, 9	>1000 <1200	>300 <350	215	185	165				180	150	125				150	135	120	140	125	115
		10	<850	<250	210	190	170				165	135	110				140	125	115	130	120	110
		11	>1100 <1450	>325	165	135	115				150	125	105				135	120	115	125	110	100
M	Μαρτενσπικός Ανοξείδωτος Χάλυβας	12, 13	<850	<250	200	170	140										170	140	125	150	130	120
K	Γκρι Χυτοσίδηρος	15-16	<1000	<300	260	220	200	300	250	220	300	250	220	300	250	220	260	220				
	Οξώδες Χυτοσίδηρος	17-18	<1000	<300	240	200	180	250	220	200	250	220	200	250	220	200	200	185				
H	Σκληρυμένοι Χάλυβες	38.1	>1480 <1700	HRC 45-49	120	100	80										100	80	70			
		38.2	>1700 <2000	HRC 50-55	75	55																
		39	>2000 <2500	HRC 56-63	65	45																

Πίνακας 4.1 Ταχύτητα κοπής ανάλογα με το είδος του καρβιδίου (Πηγή: ISCAR's Quick Reference Guide for Die and Mold Making)



#### 4.4 Τύπος μηχανικής κατεργασίας

Το φορτίο των 'δοντιών' σε συνδυασμό με τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού ανά 'δόντι'  $f_z$  καθορίζει τον τύπο της μηχανικής κατεργασίας, σε ελαφριά, μέτρια και βαριά κοπή (Πίνακας 7). Το διάστημα μεταξύ του ελάχιστου  $f_z \min$  ρυθμού αφαίρεσης υλικού και του μέγιστου  $f_z \max$  σχετίζεται με ένα αρχικό πεδίο εκτιμώμενων τιμών.

Φορτίο Δοντιών	Είδος κατεργασίας με βάση τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού ανά 'δόντι' $f_z$		
	$f_z \min$	$f_z \text{ moderate}$	$f_z \max$
<b>Ελαφριά</b>	Ελαφριά	Ελαφριά	Μέτρια
<b>Μέτρια</b>	Ελαφριά	Μέτρια	Βαριά
<b>Βαριά</b>	Μέτρια	Βαριά	Βαριά

Πίνακας 4.2 Φορτίο 'Δοντιών' (Πηγή: ISCAR's Quick Reference Guide for Die and Mold Making)

a. Συντελεστής σταθερότητας  $K_s$

Ο συντελεστής  $K_s$  καθορίζεται σύμφωνα με τη σταθερότητα της κοπής κατά τη διάρκεια του φραιζαρίσματος:

- για κανονική σταθερότητα  $K_s=1$
- για ασταθείς κοπές  $K_s=0,7$

b. Συντελεστής ζωής εργαλείου  $K_t$

Ο συντελεστής  $K_t$  βασίζεται στη σχέση μεταξύ της ταχύτητας κοπής και της ζωής του εργαλείου και παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα 4.3.

Ζωή Εργαλείου (min)	10	20	40	60
$K_t$	1.15	1	0.85	0.8

Πίνακας 2.3 Συντελεστής Ζωής Εργαλείου  $K_t$  (Πηγή: ISCAR's Quick Reference Guide for Die and Mold Making)

Παράδειγμα: το τεμάχιο κατεργασίας από χάλυβα AISI P20 με σκληρότητα HRC 32 είναι κατεργασμένο με το κοπτικό εργαλείο ISCAR endmill H490 E90AX D25-4-C25-09. Το κοπτικό εργαλείο διαθέτει ένθετα πλακίδια κοπής τύπου H490 ANKX 090408PNTR IC830. Επιπλέον για φραιζάρισμα αποπαιράτωσης χρησιμοποιήθηκε βάθος 4 mm και πλάτος 16 mm. Το κομμάτι έχει δεθεί σωστά πάνω στη μηχανή και η σταθερότητα του συστήματος εκτιμάται ως επαρκής. Το κατεργασμένο υλικό ανήκει στην ένατη ομάδα υλικών (No. 9). Ο αρχικός ρυθμός αφαίρεσης υλικού είναι  $f_z = 0,2 \text{ mm/δόντι}$  (Πίνακας 4.6). Το μήκος της αιχμής για το παραπάνω ένθετο είναι  $ap=8 \text{ mm}$  (Πίνακας 4.5). Ως εκ τούτου,  $h / ap = 4/8 = 0,5$ . Από τον Πίνακα 4.4 φαίνεται πως το φορτίο των 'δοντιών' είναι μέτριο. Το  $K_s$  γίνεται αποδεκτό ως 1. Επομένως, σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1, η κοπή για 20 λεπτά με ταχύτητα κοπής  $V_c = 135 \text{ m / min}$ . Επιπλέον ο συντελεστής ζωής του εργαλείου είναι  $K_t = 0,8 / 6/$ .

b/D	h/ap			
	1/4	1/2	3/4	1
1/4	Ελαφριά	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
1/2	Μέτρια	Μέτριο	Μέτρια	Βαριά
3/4	Μέτρια	Βαριά	Βαριά	Βαριά
1	Μέτρια	Βαριά	Βαριά	Βαριά

Πίνακας 4.4 Φορτίο 'Δοντιών' (Πηγή: ISCAR's Quick Reference Guide for Die and Mold Making)

	T290 ELN -05	HP E90AN	T490 ELN -08 T490 E90LN - 08	H490 E90AX - 09	HM90 E90A	T290 ELN -10	H490 E90AX - 12	T490 ELN -13	HM90 E90AD	T490 ELN - 16	H490 E90AX - 17
ap	5	7.7	8	9	10	10	12	12.5	14.3	16	16
Διάμετρος Εργαλείου	Αριθμός 'Δοντιών' Εργαλείου										
8	1										
10	2	1			1						
12	2; 3	2			1						
14	3				1						
16	4; 5	3; 4	2	2	2						
17					2						
18					2						
20		4; 5	2; 3	3	2; 3	2; 3			1		
21					3						
22					3						
25		5; 7	3; 4	4	2; 3; 4	3; 4	2		2		
28					4						
30					4						
32		6; 8	3; 5	5	3; 5; 5	4; 5	3	3	2; 3	2	2
40		8; 10	4; 6		3; 5; 6	6	4	3; 4	2; 3; 4	3	3
50					7		5	4; 5	5	4	4
Ένθετα	T290 LNMT 05	HP ANKT	T409 LN.. T08	H490 ANKX 09	HM90 AP...10 AP...10	AP290 LMNT 10	H490 AN..X 12	T490 LN.. T13	HM90 AD..15 AD..15	T490 LN..T 16	H490 AN..X17

Πίνακας 4.5 Πίνακας Επιλογής για 90° Indexable Endmills (Πηγή: ISCAR's Quick Reference Guide for Die and Mold Making)

ISO CLASS DIN/ISO 513	Υλικό Κατεργαζόμενου Τεμαχίου				Harder $\longleftrightarrow$ Tougher Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού fz, mm/tooth					
	Είδος	Ομάδα Υλικών	$\sigma_T$ , N/mm	Σκληρότητα	IC808	IC5100	IC810	DT7150	IC830	IC330
P	Χάλυβας Ανθρακα	1-4	<850	<250	0.1-0.25	0.1-0.25	0.1-0.25		0.1-0.35	0.1-0.4
		5	>850 <1000	>280 <300	0.1-0.25	0.1-0.25	0.1-0.25		0.1-0.3	0.1-0.4
	Κράματα Χάλυβα	6, 7	<1000	<300	0.1-0.25	0.1-0.2	0.1-0.25		0.1-0.3	0.1-0.4
		8, 9	>1000 <1200	>300 <350	0.1-0.2	0.1-0.18	0.1-0.2		0.1-0.25	0.1-0.3
		10	<850	<250	0.08- 0.18	0.08-0.15	0.08- 0.18		0.1-0.25	0.1-0.25
		11	>1100 <1450	>325	0.08- 0.15	0.08-0.12	0.08- 0.15		0.08-0.2	0.08- 0.25
M	Μαρτενσιτικός Ανοξείδωτος Χάλυβας	12, 13	<850	<250	0.08- 0.12				0.08- 0.15	0.08-0.2
K	Γκρι Χυτοσίδηρος	15-16	<1000	<300		0.2-0.35	0.2-0.4	0.2-0.4	0.2-0.3	
	Οζώδες Χυτοσίδηρος	17-18	<1000	<300		0.2-0.35	0.2-0.4	0.2-0.4	0.2-0.3	
H	Σκληρυμένοι Χάλυβες	38.1	>1480 <1700	HRC 45-49	0.07- 0.12				0.07-0.1	
		38.2	>1700 <2000	HRC 50-55	0.06- 0.09					
		39	>2000 <2500	HRC 56-63	0.05- 0.08					

Πίνακας 4.6 Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (Πηγή: ISCAR's Quick Reference Guide for Die and Mold Making)

## 4.5 Κατεργασιμότητα Κατεργαζόμενων Υλικών

### 4.5.1 Κράμα Τιτανίου (TC4)

Σε αυτό το σημείο θα γίνει μία ανάλυση για την κοπή κραμάτων τιτανίου.

- Εφαρμογές του κράματος τιτανίου TC4:

Το κράμα τιτανίου TC4 χρησιμοποιείται κυρίως στα τμήματα των αεροπλάνων, στα οποία ασκείται η περισσότερη δύναμη. Αυτό το κράμα τιτανίου σε σχέση με τον χάλυβα, διαθέτει υψηλότερη αναλογία αντοχής προς βάρος, καθώς και υψηλότερη αντοχή σε κόπωση. Σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών όπου τα κράματα αλουμινίου δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν, τα κράματα τιτανίου είναι αποδοτικά. Όσον αφορά την κόπωση, τα κράματα αλουμινίου είναι τα πιο ανθεκτικά από όλα τα υλικά. Η χρήση ενός κράματος τιτανίου σε ένα αεροπλάνο, αντί για τη χρήση κάποιου κράματος αλουμινίου ή κάποιου χάλυβα, όχι μόνο ελαφραίνει το βάρος του αλλά αυξάνει και τη διάρκεια ζωής του /7/.

- Δυσκολίες στην κοπή των κραμάτων τιτανίου TC4:

Υπάρχουν δύο παράγοντες που περιορίζουν τη χρήση κραμάτων τιτανίου TC4. Πρώτον η τιμή τους είναι υψηλή και το κόστος επεξεργασίας τους υψηλότερο. Τα προβλήματα στην κοπή των κραμάτων τιτανίου είναι τα εξής: Λόγω του ότι η θερμοκρασία κοπής που αναπτύσσεται κατά τη διαδικασία της κοπής είναι υψηλή, δημιουργείται σοβαρή φθορά στο εργαλείο κοπής και η σκλήρυνση της επιφάνειας του τεμαχίου είναι αρκετά μεγάλη. Επιπλέον η ενέργεια που απαιτείται για την παραμόρφωση του τεμαχίου είναι πολύ υψηλή. Η δύναμη της κοπής συγκεντρώνεται στο άκρο κοπής του εργαλείου με αποτέλεσμα η άκρη κοπής να καταστρέφεται εύκολα /7/.

- Δυσκολίες στην κοπή των κραμάτων τιτανίου TC4:

Υπάρχουν δύο παράγοντες που περιορίζουν τη χρήση κραμάτων τιτανίου TC4. Πρώτον η τιμή τους είναι υψηλή και το κόστος επεξεργασίας τους υψηλότερο. Τα προβλήματα στην κοπή των κραμάτων τιτανίου είναι τα εξής: Λόγω του ότι η θερμοκρασία κοπής που αναπτύσσεται κατά τη διαδικασία της κοπής είναι υψηλή, δημιουργείται σοβαρή φθορά στο εργαλείο κοπής και η σκλήρυνση της επιφάνειας του τεμαχίου είναι αρκετά μεγάλη. Επιπλέον η ενέργεια που απαιτείται για την παραμόρφωση του τεμαχίου είναι πολύ υψηλή. Η δύναμη της κοπής συγκεντρώνεται στο άκρο κοπής του εργαλείου με αποτέλεσμα η άκρη κοπής να καταστρέφεται εύκολα. Τα πειράματα απέδειξαν ότι ο κοινός χάλυβας δεν είναι κατάλληλος για την κοπή κραμάτων τιτανίου /7/.

- Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι κοπής για κοπή κραμάτων τιτανίου TC4:

	Ταχύτητα κοπή (rpm)	Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (mm/z)	Ακτινικό Βάθος Κοπής (mm)	Αξονικό Βάθος Κοπής (mm)
1	190	0,10	40	4,0
2	190	0,08	40	4,0
3	235	0,08	40	3,0
4	235	0,07	40	3,0
5	300	0,08	30	2,0
6	300	0,05	30	2,0
7	375	0,04	30	2,0

8	375	0,03	30	2,0
9	475	0,03	40	1,0
10	475	0,03	40	1,0
11	600	0,02	40	0,5
12	600	0,03	40	0,5
13	750	0,02	30	0,3
14	750	0,03	30	0,3

Πίνακας 4.7 παράμετροι κοπής για κοπή κραμάτων τιτανίου TC4 (Πηγή: Experimental study on the milling of thin parts oftitanium alloy, Zhang Guimu, Yu Chao, Shi Rong Chen, An Libao, China, 2003)

#### 4.5.2 Κράμα Αλουμινίου

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζεται μία προσέγγιση των βέλτιστων παραμέτρων κατά την μηχανική κατεργασία φραιζαρίσματος στη φάση της αποπεράτωσης, σε δείγμα δοκιμής κράματος αλουμινίου BS L168-T6511 με εργαλείο κοπής από μη επικαλυμμένο καρβίδιο. Οι παράμετροι κοπής οι οποίες εξετάστηκαν είναι οι εξής: η ταχύτητα κοπής (S), ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού (F) και το βάθος κοπής (D). Η βελτίωση της διαδικασίας φραιζαρίσματος είναι μία συνδυαστική εργασία λόγω του μεγάλου αριθμού των εμπλεκόμενων παραμέτρων. Κατά τη διαδικασία επιλογής των καλύτερων παραμέτρων κοπής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Taguchi η οποία εφαρμόζεται σε μεγάλο αριθμό πειραμάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει παραμετρική βελτιστοποίηση με λιγότερο κόστος και χρόνο πειραματισμού σε σχέση με άλλες μεθόδους. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι προβλέπει το βέλτιστο συνδυασμό των παραμέτρων μίας διεργασίας μέσα ένα διακριτό διάστημα τιμών. Παρόλα αυτά, όταν εμφανίζεται ένα πρόβλημα πολλαπλών λύσεων αποτυγχάνει /8/. Στον πίνακα 4.8 παρουσιάζεται η χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου BS L168-T6511:

	Cu	Mn	Si	Mg	Fe	Zn
min	3.9	0.4	0.5	0.2	0	0
max	5	1.2	0.9	0.8	0.5	0.25

	Ti + Zr	Ti	Cr	Ni	Al	Others
min	0	0	0	0	Balance	0
max	0.2	0.15	0.1	0.1		0.15

Πίνακας 4.8 Χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου BS L168-T6511 (Πηγή: Multi-response optimization of machining parameters for end millingprocess on BSL168-T6511 aluminium alloy using Taguchi based greylrelational analysis, B. Srinivasa Rao, Ch. Kanna Babu, H. Shivananda Nayaka, 2021)

Κατά τη διαδικασία της μηχανικής κατεργασίας φραιζαρίσματος χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά επίπεδα τιμών, των μεταβλητών της ταχύτητας κοπής, του ρυθμού αφαίρεσης υλικού και του βάθους κοπής.

	Μονάδες Μέτρησης	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 3
Ταχύτητα Κοπής (S)	rpm	2000	3000	4000
Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (F)	mm/min	200	400	600
Βάθος Κοπής (D)	mm	0.75	1.5	2.25

Πίνακας 4.9 Επίπεδα τιμών των μεταβλητών κοπής (Πηγή: Multi-response optimization of machining parameters for end millingprocess on BSL168-T6511 aluminium alloy using Taguchi based greylrelational analysis, B. Srinivasa Rao, Ch. Kanna Babu, H. Shivananda Nayaka, 2021)

Στον πίνακα 4.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, έχοντας ως τιμές των παραμέτρων κοπής αυτές που παρουσιάστηκαν στον παραπάνω πίνακα.

	S rpm	F mm/min	D mm	Τραχύτητα επιφανείας (Ra μm)	Μέγιστη θερμοκρασία εργαλείου κοπής (T°C)	Ποσοστό αφαίρεσης υλικού (MRR mm <sup>3</sup> /sec)
1	2000	200	0.75	0.64	42.6	47.486
2	2000	400	1.5	0.76	58.7	193.126
3	2000	600	2.25	0.90	81.2	441.210
4	3000	200	1.5	0.52	53.5	95.414
5	3000	400	2.25	0.60	75.6	289.752
6	3000	600	0.75	0.92	59.2	147.404
7	4000	200	2.25	0.34	69.8	135.246
8	4000	400	0.75	0.67	52.7	96.773
9	4000	600	1.5	0.76	69.1	294.524

Πίνακας 4.10 παραμέτρων κοπής του κράματος αλουμινίου BS L168-T6511(Πηγή: Multi-response optimization of machining parameters for end milling process on BSL168-T6511 aluminium alloy using Taguchi based grey relational analysis, B. Srinivasa Rao, Ch. Kanna Babu, H. Shivananda Nayaka, 2021)

Μετά τις πειραματικές δοκιμές βρέθηκε ότι για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας φραιζαρίσματος του κράματος αλουμινίου BS L168-T6511 οι ιδανικές παράμετροι κοπής είναι: ταχύτητα κοπής S =2000rpm, ρυθμός αφαίρεσης υλικού F =200mm/min και βάθος κοπής D =2.25mm. Παρατηρήθηκε ότι σε αυτές τις συνθήκες υπάρχει 215.61% αύξηση στο ποσοστό αφαίρεσης υλικού (MRR mm<sup>3</sup>/sec), 31.25% βελτίωση της τραχύτητας επιφανείας, και 5.663% μείωση στην άνοδο της θερμοκρασίας του εργαλείου κοπής ταυτόχρονα /8/.

#### Προτάσεις για δεδομένα κοπής Χυτοσίδηρου

Ο χυτοσίδηρος χωρίζεται σε πέντε κατηγορίες:

- Gray cast iron (GCI – Γκρι Χυτοσίδηρος)
- Nodular cast iron (NCI – Κονδυλώδης Χυτοσίδηρος)
- Malleable cast iron (MCI – Ελαστικός Χυτοσίδηρος)
- Compacted graphite iron (CGI – Συμπαγής Σίδηρος Γραφίτη)
- Austempered ductile iron (ADI – Μπαινιτικός Χυτοσίδηρος)

Παράμετροι κοπής σε φραιζάρισμα χυτοσίδηρου από ένθετο πλακίδιο κοπής TPKN 1603PPER, PVD επικαλυμμένο με TiAlN.

Παράμετροι	Τιμές
Διάμετρος Εργαλείου (mm)	50
Αξονικό Βάθος Κοπής, Ap (mm)	1, 2, 3
Ακτινικό Βάθος κοπής, Ae (%)	60, 100
Ταχύτητα Κοπής (m/min)	200
Ρυθμός Τροφοδοσίας Αποβλήτου (mm/tooth)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4

Πίνακας 4.11 Παράμετροι κοπής χυτοσίδηρου (Πηγή: A mechanistic model for the prediction of cutting forces in the face-milling of ductile spheroidal cast iron components for wind industry application, Technical University of Denmark DTU, Department of Mechanical Engineering)

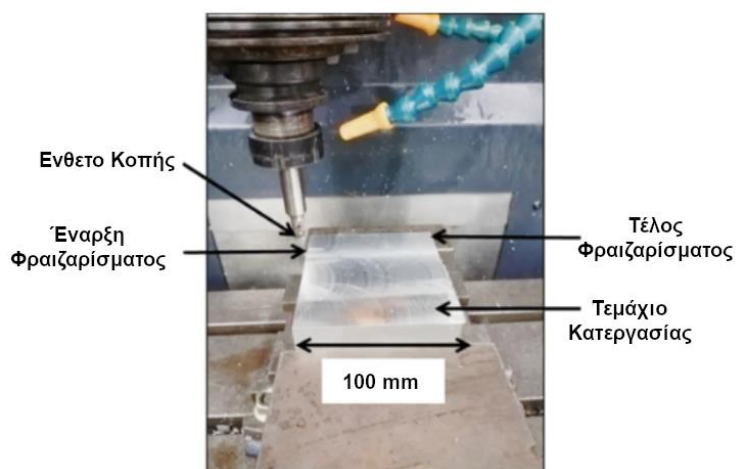
### 4.5.3 Ανοξείδωτος Χάλυβας

• Ανοξείδωτος Χάλυβας 316: η κατεργασία ενός δύσκολου ως προς την κοπή υλικού, όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας 316 είναι ζωτικής σημασίας για τη βιομηχανία. Αυτό οφείλεται στις μηχανικές του ιδιότητες, όπως η υψηλή σκληρότητα η οποία οδηγεί στην υψηλή τάση θραύσης του εργαλείου κοπής. Είναι λοιπόν απαραίτητη η κατανόηση της εξέλιξης της φθοράς του κοπτικού εργαλείου ώστε να επιλεγθούν οι καταλληλότερες συνθήκες κοπής για την κατεργασία του τεμαχίου από ανοξείδωτο χάλυβα. Κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά του ανοξείδωτου χάλυβα 316 είναι η υψηλή αντοχή του σε διάβρωση καθώς και σε υψηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη σε διάφορα μεγέθη, όπως σε μικρά ιατρικά εμφυτεύματα, σε ναυτιλιακές εγκαταστάσεις, σε μηχανήματα κατεργασίας τροφίμων καθώς και σε άλλες εγκαταστάσεις. Ωστόσο όπως ήδη αναφέρθηκε είναι ένα υλικό δύσκολο στην κατεργασία λόγω της μεγάλης αντοχής του και της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας κατά τη διαδικασία επεξεργασίας του. Στον πίνακα 4.12 παρουσιάζεται η χημική σύνθεση του ανοξείδωτου χάλυβα 316 (wt%) /10/.

S	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	N	P	Fe
0.02	0.02	0.5	1.71	16.2	11	2.18	0.35	0.07	0.03	68.06

Πίνακας 4.12 Χημική σύνθεση του ανοξείδωτου χάλυβα 316 (wt%) (Πηγή: Tool deterioration of 316 stainless steel in dry down-milling using carbide insert, N.F. Husein, N.H. Razak, 2021)

Στον πίνακα 4.13 φαίνονται οι συνθήκες κοπής ενός τεμαχίου ανοξείδωτου χάλυβα 316 σε μία φράιζα MAKINO KE5 όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το στήριγμα του ένθετου πλακιδίου έχει διάμετρο 16mm.



Σχήμα 4.2 Φράιζα MAKINO KE5

Παράμετροι Κοπής	Τιμές
Ταχύτητα Κοπής, $V_c$ (m/min)	100
Ρυθμός αφαίρεσης υλικού, $F$ (mm/min)	400
Βάθος Κοπής, $a_e$ (mm)	9.0

Πίνακας 4.13 Συνθήκες κοπής ανοξείδωτου χάλυβα 316 (Πηγή: Tool deterioration of 316 stainless steel in dry down-milling using carbide insert, N.F. Husein, N.H. Razak, 2021)

- Ανοξείδωτος Χάλυβας GX6CrNiN26-7: Το τεμάχιο που χρησιμοποιήθηκε για την εξέταση της κατεργασιμότητας των ανοξείδωτων χαλύβων είναι ένας διπλός ανοξείδωτος χάλυβας GX6CrNiN26-7 με διαστάσεις 300mm × 300mm × 85mm (μήκος × πλάτος × ύψος) σε μία μηχανή φρεζαρίσματος CNC. Χρησιμοποιήθηκε ένα εργαλείο κοπής end mill με διάμετρο κοπής (Dc) 32 mm και μέγιστο βάθος κοπής 9mm. Τα ένθετα κοπής που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατασκευασμένα από καρβίδιο του βολφραμίου με επικάλυψη AlTiN /10/. Στον πίνακα 4.14 φαίνονται οι παράμετροι κοπής (ταχύτητα κοπής, ρυθμός αφαίρεσης υλικού)

	Ταχύτητα κοπής (m/min)	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (mm/κοπτική ακμή)	Βάθος κοπής (mm)
1	90	0,1	2,5
2	120	0,1	2,5
3	120	0,15	7,5
4	240	0,15	7,5
5	240	0,20	7,5
6	300	0,15	7,5

Πίνακας 4.14 Παράμετροι κοπής ανοξείδωτου χάλυβα GX6CrNiN26-7(Πηγή: Tool deterioration of 316 stainless steel in dry down-milling using carbide insert, N.F. Husein, N.H. Razak, 2021)

#### 4.5.4 Duplex Stainless Steels (DSS)

Οι διπλοί ανοξείδωτοι χάλυβες (DSS) λόγω του ότι περιέχουν υψηλή περιεκτικότητα σε χρώμιο θεωρούνται δύσκολα προς κατεργασία υλικά, διότι διαθέτουν υψηλή αντοχή και άλλες εξαιρετικές φυσικές ιδιότητες. Οι DSS χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανίες τροφίμων, στις μεταφορές, σε εξοπλισμούς ελέγχου της ρύπανσης σε εργοστάσια επεξεργασίας θαλασσινού νερού κλπ. Παρακάτω μέσω πειραμάτων αξιολογήθηκε η επίδραση των παραμέτρων κοπής στη δύναμη κοπής κατά τη διάρκεια φρεζαρίσματος σε τεμάχιο 2205 Duplex Stainless Steel (2205 DSS). Τα πειράματα διεξήχθησαν για πολλές διαφορετικές ταχύτητες κοπής και ρυθμούς αφαίρεσης υλικού, ώστε να βρεθούν οι κατάλληλες συνθήκες που θα παρέχουν την ελάχιστη δύναμη κοπής /11/. Στον πίνακα 4.15 φαίνεται η χημική σύσταση του 2205 DSS:

Cr	Ni	Mo	C	N	Mn	Si	P	S	Fe
22,45	5,265	3,081	0,028	0,137	1,632	0,451	0,026	0,006	Balance

Πίνακας 4.15 Χημική σύσταση του 2205 DSS (Πηγή: Effect of machining parameters on cutting force during dry milling of 2205 DSS and 2507 SDSS materials, Pradeep George, K. Leo Dev Wins, D.S. Ebenezer Jacob Dhas, Pramod George, B. Anuja Beatrice, India, 2021)

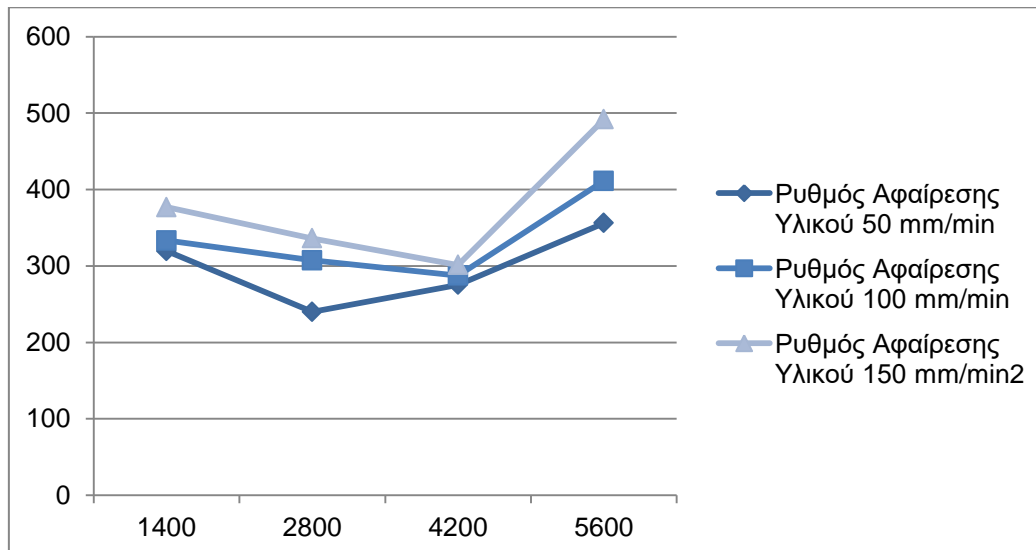
	Ταχύτητα Κοπής (rpm)	Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (mm/min)	Δύναμη Κοπής (N)
1	1400	50	319,53
2	2800	50	239,95
3	4200	50	275,30
4	5600	50	356,21
5	1400	100	333,42
6	2800	100	307,42
7	4200	100	287,45



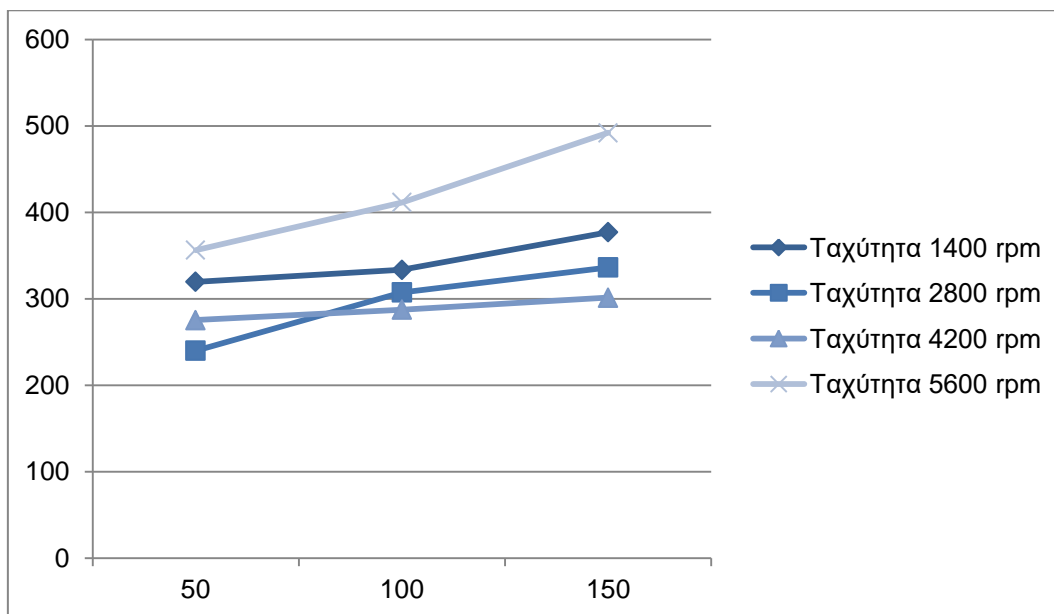
<b>8</b>	5600	100	411,35
<b>9</b>	1400	150	376,91
<b>10</b>	2800	150	336,16
<b>11</b>	4200	150	301,33
<b>12</b>	5600	150	491,97

Πίνακας 4.16 Παράμετροι Κοπής του 2205 DSS (Πηγή: Effect of machining parameters on cutting force during dry milling of 2205 DSS and 2507 SDSS materials, Pradeep George, K. Leo Dev Wins, D.S. Ebenezer Jacob Dhas, Pramod George, B. Anuja Beatrice, India, 2021)

Στον πίνακα 4.16 παρουσιάζονται οι πειραματικές συνθήκες καθώς και η δύναμη κοπής που επιλέχθηκαν κατά τη διάρκεια δοκιμών φραιζαρίσματος. Όπως διαπιστώθηκε από τα αποτελέσματα η δύναμη κοπής μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής έως τις 4200rpm. Μετά από αυτή την τιμή η δύναμη κοπής ξεκίνησε να αυξάνεται. Επιπλέον όσο αυξάνεται ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού αυξάνεται και η δύναμη κοπής. Στη χαμηλότερη τιμή της ταχύτητας κοπής, η τριβή μεταξύ του αποβλίπτου και του εργαλείου ήταν υψηλή, με αποτέλεσμα να υπάρχει και υψηλή δύναμη κοπής. Καθώς λοιπόν η ταχύτητα κοπής αυξάνεται έως τις 4200rpm, αυξάνεται και η παραγωγή θερμότητας με αποτέλεσμα τα υλικά να γίνονται πιο μαλακά και η δύναμη κοπής να ελαττώνεται. Η πλειοψηφία βέβαια της θερμότητας απάγεται κατά τη διάρκεια της κοπής μέσω του αποβλίπτου. Όταν όμως η ταχύτητα κοπής αυξήθηκε πέρα από τις 4200rpm, αυξήθηκε και ο ρυθμός φθοράς του εργαλείου με αποτέλεσμα και την αύξηση της δύναμης κοπής /11/. Το σχήμα 4.3 δείχνει την επίδραση της ταχύτητας κοπής στη δύναμη κοπής, κατά τη διάρκεια φραιζαρίσματος ενός τεμαχίου 2205 DSS. Ενώ στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η επίδραση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού στη δύναμη κοπής.



Σχήμα 4.3 Επίδραση της ταχύτητας κοπής στην δύναμη κοπής σε τεμάχιο 2205 DSS (Πηγή: Effect of machining parameters on cutting force during dry milling of 2205 DSS and 2507 SDSS materials, Pradeep George, K. Leo Dev Wins, D.S. Ebenezer Jacob Dhas, Pramod George, B. Anuja Beatrice, India, 2021)



Σχήμα 3.4 Επίδραση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού στη δύναμη κοπής (Πηγή: Effect of machining parameters on cutting force during dry milling of 2205 DSS and 2507 SDSS materials, Pradeep George, K. Leo Dev Wins, D.S. Ebenezer Jacob Dhas, Pramod George, B. Anuja Beatrice, India, 2021)

#### 4.5.5 Μη σιδηρούχα μέταλλα

Τα μη σιδηρούχα μέταλλα είναι κράματα ή μέταλλα που δεν περιέχουν αξιόλογες ποσότητες σιδήρου. Όλα τα καθαρά μέταλλα είναι η σιδηρούχα στοιχεία εκτός από τον σίδηρο (Fe), οποίος ονομάζεται και φερρίτης από το λατινικό «ferrum», που σημαίνει «σίδηρος». Τα μη σιδηρούχα μέταλλα τείνουν να είναι πιο ακριβά από τα σιδηρούχα λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων τους όπως το χαμηλό βάρος (π.χ. αλουμίνιο), η υψηλή αγωγιμότητα (π.χ. χαλκός) και η αντοχή τους στη διάβρωση (π.χ. ψευδάργυρος). Ωστόσο, πολλά μη σιδηρούχα μέταλλα διαθέτουν χαμηλό σημείο τήξης, καθιστώντας τα ακατάλληλα για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες. Όπως είναι προφανές η διαφορά μεταξύ σιδηρούχων και μη σιδηρούχων μετάλλων είναι ότι τα σιδηρούχα μέταλλα περιέχουν σίδηρο. Σιδηρούχα μέταλλα όπως ο χυτοσίδηρος ή ο χάλυβας τα οποία έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι ευάλωτα στη σκουριά όταν εκτίθενται σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία. Παρόλα αυτά, αυτό δεν ισχύει για το σφυρήλατο σίδηρο, ο οποίος αντιστέκεται στη σκουριά λόγω της μεγάλης του καθαρότητας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατεργασιμότητα κάποιων μη σιδηρούχων μετάλλων /39/.

- Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε αλουμίνιο IS 733 Gr 63400, με μήκος τεμαχίου 600mm και εργαλείο κοπής καρβίδιο K10.

	Ταχύτητα Κοπής (Rpm)	Βάθος Κοπής
1	233	0,5
2	233	1,5
3	233	2,5
4	340	0,5
5	340	1,5
6	340	2,5
7	530	0,5

<b>8</b>	530	1,5
<b>9</b>	530	2,5

Πίνακας 4.17 Παράμετροι κοπής αλουμινίου IS 733 Gr 63400 (Πηγή: Investigation of Chip-Tool Interface Temperature: Effect of Machining Parameters and Tool Material on Ferrous and Non-Ferrous Metal, ICMPC 2017, Surabhi Lata Ramakant Rana Hitesh)

Το αλουμίνιο λόγω της χαμηλής του αντοχής σε διάβρωση, του χαμηλού κόστους συντήρησης και του χαμηλού κόστους απόκτησης καθίσταται ιδανικό για μία σειρά εμπορικών εφαρμογών. Χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία, στο βιομηχανικό εξοπλισμό, στα χειρουργικά εργαλεία, στις δεξαμενές αποθήκευσης κ.λπ.. Το αλουμίνιο επιπλέον, είναι ένα υλικό με χαμηλό ειδικό βάρος, μόλις 1/3 του σιδήρου, πράγμα που το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές με χαμηλό βάρος κατασκευής όπως στη βιομηχανία των μεταφορικών μέσων (αυτοκίνητα, τραίνα, αεροπλάνα). Για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία φραιζαρίσματος αποτελεσματικά θα πρέπει πρώτα να έχουν προσδιοριστεί οι παράμετροι κοπής. Η μοντελοποίηση και η προσομοίωση των κατεργασιών πραγματοποιείται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η οποία προσελκύει συνεχώς ερευνητές με σκοπό να κατανοήσουν τους μηχανισμούς δημιουργίας αποβλήτου και παραγωγής θερμότητας στην ζώνη κοπής. Επίσης οι προβλέψεις των φυσικών παραμέτρων του τελικού τεμαχίου όπως είναι η τραχύτητα επιφανείας και η σκληρότητα επιφανείας παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή των παραμέτρων κοπής /13/. Για την κοπή με τη διαδικασία φραιζαρίσματος του αλουμινίου με καρβίδιο (15% κοβάλτιο) οι κατάλληλες συνθήκες κοπής είναι οι εξής:

	<b>Ταχύτητα Κοπής (Rpm)</b>	<b>Βάθος Κοπής</b>
<b>1</b>	240	0.5
<b>2</b>	240	0.6
<b>3</b>	240	0.7
<b>4</b>	300	0.5
<b>5</b>	330	0.5
<b>6</b>	350	0.5

Πίνακας 4.18 Παράμετροι κοπής αλουμινίου (Πηγή: 3D Finite Element Analysis of milling process for non-ferrous metal using deform-3D, Premnarayan Vishwakarma)

- Το πείραμα για την κατεργασιμότητα τεμαχίου από συμπαγή γραφίτη σιδήρου RuT400 (CGI) και το μέγεθος του 50x50x80mm. Το πείραμα διεξήχθη σε ένα κέντρο κατεργασίας CNC (VDL-600A) με μέγιστη ταχύτητα ατράκτου 8000 rpm, και η διαδρομή των τριών αξόνων είναι 620, 420 και 520 mm. Το CGI είναι ένα δύσκολο προς επεξεργασία υλικό. Με βάση λοιπόν την έρευνα για το κατάλληλο εργαλείο επεξεργασίας του τεμαχίου από CGI, φάνηκε πως τα επικαλυμμένα καρβίδια έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τα κεραμικά εργαλεία φραιζαρίσματος ενός CGI τεμαχίου /25/.

Στον πίνακα 4.19 φαίνονται οι παράμετροι κοπής, τους οποίους εισάγουμε στη μηχανή ώστε να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα στη ποιότητα της επεξεργασμένης επιφάνειας (Ra).

	Ταχύτητα κοπής (m/min)	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (mm/min)	Βάθος κοπής (mm)
1	226	180	0,5
2	425	360	0,8
3	678	540	1

Πίνακας 4.19 Παράμετροι κοπής για κοπτικό εργαλείο χυτοσιδήρου (Πηγή: Effect of machining parameters on surface roughness for compacted graphite cast iron by analyzing covariance function of Gaussian process regression, Juan Lu, Zhenkun Zhang, Xuepeng Yuan, Junyan Ma, Shanshan Hu, Bin Xue, Xiaoping Liao, 2020)

#### 4.5.6 Super-Alloys

Τα Super-Alloys είναι μία ομάδα κραμάτων νικελίου, σιδήρου-νικελίου και κοβαλτίου, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στις βιομηχανίες αεροπορίας και αεροδιαστημικής ως βασικά δομικά υλικά. Τα υπερκράματα διαθέτουν εξαιρετικές ιδιότητες αντοχής στη θερμότητα καθώς διατηρούν την αντοχή και τη σταθερότητα της μικροδομής τους σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές που αντέχουν άλλα μέταλλα και κράματα. Ως η παλαιότερη και πιο ανεπτυγμένη οικογένεια υπερκραμάτων, τα Super-Alloys με βάση το νικέλιο εξαρτώνται από μία διαφασική μικροδομή με κυβική μήτρα  $\gamma$  και συνεκτικό ίζημα L12  $\gamma'$ . Αν και στα συγκεκριμένα υπερκράματα το νικέλιο είναι το πρωταρχικό συστατικό, περιέχουν επιπλέον περισσότερους από δέκα τύπους στοιχείων όπως κοβάλτιο (Co), χρώμιο (Cr), τιτάνιο (Ti), ρήνιο (Re), άφνιο (Hf) και άλλα. Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί πως τα υπερκράματα με βάση το νικέλιο αντιπροσωπεύουν περίπου το 40% - 50% του συνολικού βάρους ενός κινητήρα αεροσκάφους. Στη συνέχεια παρουσιάζεται παράδειγμα κοπής ενός "υπερκράματος" σε μία φραιζα, ώστε να καταδειχθούν οι παράμετροι κοπής, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για το συγκεκριμένο τεμάχιο κατεργασίας /15/. Η κοπή πραγματοποιήθηκε σε κράμα με διαστάσεις 50mm x 50mm x 100 m, με σύνθετο καρβίδιο βολφραμίου με κεραμική επίστρωση.

Χημική Σύσταση Τεμαχίου		
	Στοιχεία	%
1	Άνθρακας	0,1
2	Μαγγάνιο	0,5
3	Πυρίτιο	0,5
4	Χρώμιο	23
5	Νικέλιο	58
6	Μολυβδαίνιο	10
7	Τιτάνιο	0,4
8	Σίδηρος	5

Πίνακας 4.20 Χημική σύσταση τεμαχίου (Πηγή: Machinability study and process optimization in face milling of some super alloys with indexable copy face mill inserts, Chandra Nath, Zachary Brooks, Thomas R. Kurfess, 2015)

Ο ρυθμός απομάκρυνσης υλικού (MRR) είναι η ποσότητα του υλικού που αφαιρείται ανά μονάδα χρόνου (συνήθως ανά λεπτό) κατά την εκτέλεση εργασιών κατεργασίας όπως η τόννευση ή το φραιζάρισμα. Όσο περισσότερο υλικό αφαιρείται ανά λεπτό, τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού. Είναι ένας άμεσος δείκτης για το πόσο αποτελεσματική είναι η κατεργασία και πόσο κερδοφόρα είναι. Το MRR είναι ο όγκος του υλικού που αφαιρείται ανά λεπτό. Όσο υψηλότερες είναι οι παράμετροι κοπής, τόσο

υψηλότερο είναι το MRR /16/. Στον πίνακα 4.21 παρουσιάζεται ο δείκτης MRR για κάθε μία από τις επιλογές παραμέτρων.

	Παράμετροι Κατεργασίας			Απόκριση Εξόδου
	Ταχύτητα Κοπής (rpm)	Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (m/min)	Βάθος Κοπής (mm)	MRR
1	357	0.0848	0.5	0.512
2	357	0.1012	1	0.836
3	357	0.1111	1.5	0.931
4	520	0.0848	1	0.867
5	520	0.1012	1.5	0.983
6	520	0.1111	0.5	0.774
7	<b>727</b>	<b>0.0848</b>	<b>1.5</b>	<b>1.835</b>
8	727	0.1012	0.5	1.193
9	727	0.1111	1	1.089

Πίνακας 4.21 Δείκτης MRR για κάθε συνδυασμό παραμέτρων (Πηγή: Productivity and quality improvement by optimization of milling parameters of super alloy, A. Maria Jackson, N. Baskar, R. Sabarish, S. Mohan Raj, A. Annis Ahmed, India, 2020)

Επομένως φαίνεται ότι η πιο συμφέρουσα κοπή πραγματοποιείται για:

- ταχύτητα κοπής = 727rpm,
- ρυθμό αφαίρεσης υλικού = 0.0848m/min και
- βάθος κοπής = 1.5mm.

#### 4.5.7 Mold Steel

Τα καλούπια παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της τεχνολογίας κατασκευών, ιδίως για την κατασκευή μηχανημάτων και ηλεκτρικών συσκευών. Η τραχύτητα της επιφανείας του χυτού εξαρτάται από την ποιότητα του καλουπιού. Με την έννοια της τραχύτητας εννοείται η απόσταση από μία μικρό-κορυφή και μία μικρό-κοιλιάδα. Για τη δοκιμή φραιζαρίσματος ενός χάλυβα που έχει προέλθει από χύτευση, με σκοπό την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων κοπής, χρησιμοποιήθηκε ένα τεμάχιο χαλύβδινου χάλυβα Cr12MoV. Η εργαλειομηχανή που χρησιμοποιήθηκε είναι μία VDL-1000E τριαξονική μηχανή φραιζας CNC, με τη μέγιστη ταχύτητα άξονα να είναι 8000r/min /17/. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την επιλογή των παραμέτρων κοπής παρουσιάζονται στους πίνακες 4.22, 4.23:

	Ταχύτητα Κοπής (rpm)	Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (f <sub>z</sub> /mm)	Αξονικό Βάθος Κοπής (a <sub>p</sub> /mm)	Ακτινικό Βάθος Κοπής (a <sub>e</sub> /mm)	Δύναμη (F/N)	Τραχύτητα Επιφανείας (Ra/μm)
1	3500	0,021	0,04	1	22,813	0,2732
2	3500	0,024	0,08	2	26,419	0,3190
3	3500	0,026	0,12	3	60,574	0,1738
4	3500	0,028	0,16	4	79,425	0,2697
5	3900	0,019	0,08	3	36,086	0,1451
6	3900	0,021	0,04	4	27,816	0,1295

7	3900	0,023	0,16	1	34,101	0,2369
8	3900	0,028	0,12	2	39,905	0,1318
9	4300	0,017	0,12	4	94,347	0,1834
10	4300	0,019	0,16	3	63,933	0,1934
11	4300	0,023	0,04	2	22,499	0,2929
12	4300	0,021	0,08	1	16,582	0,1998
13	4700	0,016	0,16	2	50,855	0,1073
14	4700	0,018	0,12	1	25,280	0,1077
15	4700	0,019	0,08	4	64,609	0,2016
16	4700	0,020	0,04	3	27,686	0,1900

Πίνακας 3.22 Αποτελέσματα Plane Milling (Πηγή: Surface Roughness Analysis and Parameter Optimization of Mold Steel Milling, Xuefeng Wua,\*, Xuefeng Yin, 2018)

	Ταχύτητα Κοπής (rpm)	Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού ( $f_z/mm$ )	Αξονικό Βάθος Κοπής ( $a_p/mm$ )	Ακτινικό Βάθος Κοπής ( $a_e/mm$ )	Δύναμη (F/N)	Τραχύτητα Επιφανείας ( $Ra/\mu m$ )
1	2500	0,020	0,20	0,20	27,463	0,2816
2	2500	0,040	0,25	0,25	40,147	0,2877
3	2500	0,060	0,30	0,30	51,746	0,2261
4	2500	0,080	0,35	0,35	62,901	0,2121
5	3000	0,020	0,25	0,30	34,973	0,2792
6	3000	0,040	0,20	0,35	46,240	0,2955
7	3000	0,060	0,35	0,20	44,996	0,2616
8	3000	0,080	0,30	0,25	53,827	0,2641
9	3500	0,020	0,30	0,35	39,318	0,2348
10	3500	0,040	0,35	0,30	47,856	0,2052
11	3500	0,060	0,20	0,25	46,560	0,2304
12	3500	0,080	0,25	0,20	48,138	0,2125
13	4000	0,020	0,35	0,25	35,079	0,2422
14	4000	0,040	0,30	0,20	39,449	0,2127
15	4000	0,060	0,25	0,35	57,114	0,1926
16	4000	0,080	0,20	0,30	56,888	0,2190

Πίνακας 4.23 Αποτελέσματα για Ball-end Milling (Πηγή: Surface Roughness Analysis and Parameter Optimization of Mold Steel Milling, Xuefeng Wua,\*, Xuefeng Yin, 2018)

Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει από τους πίνακες στην περίπτωση του Plane Milling όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα κοπής, τόσο μικρότερη είναι η τραχύτητα επιφανείας. Επιπλέον το αξονικό βάθος αλλά και το ακτινικό παίρνουν ελάχιστες τιμές. Αν λοιπόν έμπαιναν όλες οι παράμετροι σε φθίνουσα σειρά με βάση το μέτρο επιρροής στην κοπή, αυτή θα ήταν: ρυθμός αφαίρεσης υλικού > ταχύτητα κοπής > αξονικό βάθος κοπής > ακτινικό βάθος κοπής.

Ομοίως για την περίπτωση του Ball-end Milling, ισχύει επίσης ότι όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα κοπής, τόσο μικρότερη η τραχύτητα επιφανείας. Επιπλέον, όσο πιο μικρός είναι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού, τόσο μικρότερη είναι τραχύτητα επιφανείας. Ακόμα φαίνεται ότι όπως και στην περίπτωση του Plane Milling το αξονικό βάθος αλλά και το ακτινικό παίρνουν ελάχιστες τιμές. Οι παράμετροι λοιπόν σε φθίνουσα σειρά με βάση το μέτρο επιρροής στην κοπή θα είναι: ταχύτητα κοπής > ρυθμός αφαίρεσης υλικού > αξονικό βάθος κοπής > ακτινικό βάθος κοπής /17/.

#### 4.5.8 Monel Alloys

Monel είναι μία ομάδα κραμάτων νικελίου, και αποτελείται από νικέλιο (52-70%) και χαλκό, με μικρές ποσότητες σιδήρου, μαγγανίου, άνθρακα και πυριτίου. Τα κράματα Monel είναι ισχυρότερα από το καθαρό νικέλιο και πολύ ανθεκτικά στη διάβρωση ακόμα και από το θαλασσινό νερό. Πραγματοποιήθηκε κοπή κράματος Monel K-400, με μήκος 75mm, πλάτος 50mm και πάχος 12mm με σκληρότητα 45HRC σε τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες ατράκτου (1400, 2100, 2800 και 3500rpm) από κοπτικό εργαλείο τύπου CBN.

Ni	Cu	Al	Ti	C	Mn	Fe	Si
70	24	2.0	0.8	0.25	1.04	2.05	0.5

Πίνακας 4.24 Χημική Σύσταση Κράματος Monel K-400 (Πηγή: Machining feasibility and sustainability study on end milling process of Monel alloy, Muhammed Shihan, J. Chandradass , T.T.M. Kannan, S.M. Sivagami, India, 2020)

	Ταχύτητα Κοπής (rpm)	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (mm/κοπτική ακμή)	Βάθος κοπής
1	1400	0,03	0,75
2	2100	0,06	1,00
3	2800	0,09	1,25
4	3500	0,12	1,50

Πίνακας 4.25 Παράμετροι κοπής Κράματος Monel K-400 (Πηγή: Machining feasibility and sustainability study on end milling process of Monel alloy, Muhammed Shihan, J. Chandradass , T.T.M. Kannan, S.M. Sivagami, India, 2020)

Κατά την κατεργασία φραιζαρίσματος, στη φάση της αποπεράτωσης, σε μία μηχανή κάθετου φραιζαρίσματος, θα επεξεργαστεί ένα τεμάχιο υλικού Monel (K-400) κράματος, για διαφόρους συνδυασμούς παραμέτρων κοπής. Οι παράμετροι κοπής είναι: η ταχύτητα κοπής, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού και το βάθος κοπής. Επιπλέον θα χρησιμοποιηθεί δυναμόμετρο για την καταγραφή των διαφόρων κραδασμών στη μηχανή και στο εργαλείο κοπής για τις διάφορες ταχύτητες κοπής. Στον πίνακα 4.26 φαίνονται οι παράμετροι κοπής που επιλέχθηκαν σε κάθε ένα από τα πειράματα που δημιουργήθηκαν:

	Ταχύτητα Κοπής (rpm)	Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (mm/rev)	Βάθος Κοπής (mm)	Επιτάχυνση Ρυθμού Αφαίρεσης Υλικού (mm/sec <sup>2</sup> )	Φθορά Κοπτικού (mm)
1	900	0,020	0,1	14,67	0,22
2	900	0,025	0,2	44,92	0,60
3	900	0,030	0,3	15,94	0,28
4	900	0,035	0,4	17,94	0,26
5	1200	0,020	0,1	19,34	0,48
6	1200	0,025	0,2	19,68	0,44
7	1200	0,030	0,3	15,98	0,30
8	1200	0,035	0,4	14,30	0,24
9	1500	0,020	0,1	20,16	0,48
10	1500	0,025	0,2	11,42	0,18
11	1500	0,030	0,3	26,42	0,52



12	1500	0,035	0,4	35,42	0,58
13	1800	0,020	0,1	24,72	0,48
14	1800	0,025	0,2	24,32	0,46
15	1800	0,030	0,3	18,62	0,40
16	1800	0,035	0,4	17,22	0,26

Πίνακας 4.26 Παράμετροι κοπής Κράματος Monel K-400 με επιπλέον καταγραφή δυνάμεων (Πηγή: Investigation of vibration analysis during end milling process of monelalloy, Muhammed shihan, J. Chandradass, TTM. Kannan, 2021)

Παρατηρήθηκε όπως είναι φυσικό ότι, όσο μεγαλύτερες δονήσεις δημιουργούνται γενικά στη μηχανή, τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα αστοχίας του κοπτικού. Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται επίσης ότι οι παράμετροι κοπής παίζουν σημαντικό ρόλο στη φθορά του κοπτικού αλλά και στο μέγεθος των δονήσεων /19/.

#### 4.5.9 Συνθετικά τεμάχια ενισχυμένα με ίνες γυαλιού και ίνες άνθρακα

Το φραιζάρισμα συνθετικών υλικών είναι μία πολύπλοκη διαδικασία λόγω της ετερογένειας και των διαφόρων προβλημάτων όπως η επιφανειακή αποκόλληση, η τραχύτητα επιφανείας και άλλα. Η διαδικασία κατεργασίας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού του τεμαχίου καθώς και τις παραμέτρους κοπής. Στην συνέχεια παρουσιάζονται δεδομένα για τη διαδικασία κοπής ελασμάτων από ίνες άνθρακα (CFRP) και ίνες γυαλιού (GFRP). Για την κατεργασία χρησιμοποιήθηκε αριθμητικά ελεγχόμενος κατακόρυφος μηχανικός επεξεργαστής για το φραιζάρισμα και τη δημιουργία σχισμών στα ελάσματα, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς ταχύτητας κοπής και ρυθμού αφαίρεσης υλικού. Κατά τη διαδικασία κοπής χρησιμοποιήθηκε ένα δυναμόμετρο για την καταγραφή των τριών ορθογώνιων συνιστωσών της δύναμης κατεργασίας. Από τις πειραματικές δοκιμές παρατηρήθηκε ότι η δύναμη της κατεργασίας αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας. Επίσης για τον ίδιο ρυθμό αφαίρεσης υλικού, η δύναμη κατεργασίας των ελασμάτων GFRP παρατηρήθηκε ότι ήταν πολύ μικρότερη σε σύγκριση με τη δύναμη των ελασμάτων CFRP. Γενικώς προτείνεται το φραιζάρισμα με χαμηλό ρυθμό αφαίρεσης υλικού και υψηλή ταχύτητα κοπής /20/.

Τα συνθετικά υλικά όπως τα ενισχυμένα πλαστικά με ίνες άνθρακα (CFRP) καθώς και αυτά τα οποία είναι ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP) χαρακτηρίζονται για τις εξαιρετικές ιδιότητες τους, όπως το ελαφρύ βάρος, η υψηλή αναλογία της αντοχής προς το βάρος αλλά και της σκληρότητας ως προς το βάρος. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων τα υλικά αυτά καθίστανται ιδιαίτερα ελκυστικά για εφαρμογές στην αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία. Παρόλα αυτά όμως, η επίτευξη μία αποδεκτής επιφάνειας κατεργασίας με συμβατικές μεθόδους κατεργασίας θεωρείται εξαιρετικά δύσκολη, λόγω της ανισότροπης και μη ομογενούς φύσης του τεμαχίου /20/.

Τα πειράματα διεξήχθησαν σε ελάσματα CFRP και GFRP πάχους 15 mm χρησιμοποιώντας ως εργαλείο τσιμεντοειδές καρβίδιο (K10) με διάμετρο 10 mm. Η αναλογία της καρβιδικής φάσης σε αυτό το εργαλείο είναι περίπου 80% του συνολικού βάρους του κοπτικού. Το καρβίδιο βολφραμίου (WC) καθώς και το κράμα κοβαλτίου σαν συνθετικό υλικό, αποτελούν τη βασική δομή του τσιμεντοειδούς καρβιδίου. Επιπλέον κατά την κατεργασία των τεμαχίων δεν χρησιμοποιήθηκε κανένας εξωτερικός ψυκτικός παράγοντας.





Σχήμα 4.5 Τσιμεντοειδές καρβίδιο (K10) (Πηγή: An experimental investigation on the process parameters influencing machining forces during milling of carbon and glass fiber laminates, N. Rajesh Mathivanan, B.S. Mahesh, H. Anup Shetty, 2016)

Στον πίνακα 4.27 παρουσιάζονται τιμές της δύναμης μηχανικής κατεργασίας ( $F_m$ ) ως συνάρτηση των παραμέτρων κοπής για CFRP:

	Ταχύτητα (mm/rev)	Ταχύτητα (rpm)	Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (mm / rev)	Μηχανική Δύναμη
<b>01</b>	40	2000	0,02	36,70
<b>02</b>	40	2000	0,04	44,95
<b>03</b>	40	2000	0,06	62,81
<b>04</b>	80	4000	0,02	48,05
<b>05</b>	80	4000	0,04	54,95
<b>06</b>	80	4000	0,06	68,67
<b>07</b>	120	6000	0,02	57,20
<b>08</b>	120	6000	0,04	65,60
<b>09</b>	120	6000	0,06	73,20

Πίνακας 4.27 Παράμετροι κοπής CFRP (Πηγή: An experimental investigation on the process parameters influencing machining forces during milling of carbon and glass fiber laminates, N. Rajesh Mathivanan, B.S. Mahesh, H. Anup Shetty, 2016)

Ενώ στον πίνακα 4.28 παρουσιάζονται τιμές της δύναμης μηχανικής κατεργασίας ( $F_m$ ) ως συνάρτηση των παραμέτρων κοπής για GFRP:

	Ταχύτητα (mm/rev)	Ταχύτητα (rpm)	Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (mm / rev)	Μηχανική Δύναμη
<b>01</b>	40	2000	0,02	24,02
<b>02</b>	40	2000	0,04	29,43
<b>03</b>	40	2000	0,06	36,53
<b>04</b>	80	4000	0,02	32,70
<b>05</b>	80	4000	0,04	36,02
<b>06</b>	80	4000	0,06	50,02
<b>07</b>	120	6000	0,02	36,70
<b>08</b>	120	6000	0,04	41,62
<b>09</b>	120	6000	0,06	57,20

Πίνακας 4.28 Παράμετροι κοπής GFRP (Πηγή: An experimental investigation on the process parameters influencing machining forces during milling of carbon and glass fiber laminates, N. Rajesh Mathivanan, B.S. Mahesh, H. Anup Shetty, 2016)

#### 4.5.10 Κράμα Ορείχαλκου C26130:

Για περισσότερο από 5.000 χρόνια ο χαλκός και τα κράματά του έπαιζαν σημαντικό ρόλο στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη της ανθρωπότητας. Ο χαλκός ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως λόγω της υψηλής ηλεκτρικής και θερμικής αγωγιμότητας, παρουσιάζει επιπλέον πλεονεκτήματα όταν συνδυάζεται με στοιχεία κραμάτωσης (π.χ. Zn, Sn ή Pb), τα οποία του προσφέρουν καλή κατεργασιμότητα και υψηλή αντοχή στη διάβρωση. Ένα από τα σημαντικότερα κράματα χαλκού είναι ο ορείχαλκος, ένας συνδυασμός χαλκού και ψευδαργύρου με στόχο μεγαλύτερη αντοχή και σκληρότητα σε σχέση με τον απλό χαλκό /21/.

Στις μέρες μας, η χρήση του ορείχαλκου και των κραμάτων παίζει σημαντικό ρόλο σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές λόγω των ιδιοτήτων του, όπως είναι η υψηλή αντοχή, η σκληρότητα και η υψηλή αντοχή στη διάβρωση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που διεξήχθησαν με σκοπό την ανάλυση της επίδρασης των παραμέτρων κοπής στην κοπή κατά τη διάρκεια κατεργασίας του κράματος ορείχαλκου C26130 /21/.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε τεμάχιο κράματος ορείχαλκου C26130 με διαστάσεις 150mm x 50 mm x 10 mm. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο κράμα διότι διαθέτει σημαντική θέση στις αυτοκινητοβιομηχανίες, και στις πυρηνικές και αεροδιαστημικές βιομηχανίες, καθώς είναι ισχυρότερο και πιο σκληρό από τον χαλκό /21/. Στον πίνακα 4.29 φαίνεται η χημική σύσταση του κράματος ορείχαλκου C26130:

<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Fe</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>
71,5	0,05	0,05	28,64	0,06

Πίνακας 4.29 Χημική σύσταση κράματος ορείχαλκου C26130 (Πηγή: Prediction of surface roughness and tool wear in milling process on brass(C26130) alloy by Taguchi technique, S.V. Alagarsamy, M. Ravichandran, M. Meignanamoorthy, S. Sakthivelu, S. Dineshkuma, India, 2020)

	<b>Ταχύτητα Κοπής (rpm)</b>	<b>Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (mm/rev)</b>	<b>Βάθος κοπής (mm)</b>	<b>Τραχύτητα Επιφανείας (μm)</b>	<b>Φθορά Κοπτικού Εργαλείου (g/min)</b>
<b>1</b>	500	20	0,5	1,165	0,00649
<b>2</b>	500	40	0,75	1,188	0,00666
<b>3</b>	500	60	1,0	1,087	0,00038
<b>4</b>	750	20	0,75	0,594	0,01375
<b>5</b>	750	40	1,0	0,945	0,00517
<b>6</b>	750	60	0,5	0,872	0,00015
<b>7</b>	1000	20	1,0	0,978	0,0305
<b>8</b>	1000	40	0,5	0,913	0,06909
<b>9</b>	1000	60	0,75	0,837	0,00157

Πίνακας 4.30 Παράμετροι κοπής κράματος ορείχαλκου C26130 (Πηγή: Prediction of surface roughness and tool wear in milling process on brass(C26130) alloy by Taguchi technique, S.V. Alagarsamy, M. Ravichandran, M. Meignanamoorthy, S. Sakthivelu, S. Dineshkuma, India, 2020)

Όπως φαίνεται οι βέλτιστες παράμετροι κοπής που πρέπει να λαμβάνονται για βέλτιστη τραχύτητα επιφανείας είναι: 750rpm ταχύτητα κοπής, 20mm/στροφή ρυθμό αφαίρεσης υλικού και 0,75mm βάθος κοπής.

Ενώ οι βέλτιστες παράμετροι κοπής με σκοπό την ελάχιστη φθορά του κοπτικού εργαλείου είναι: 750rpm ταχύτητα κοπής, 60mm/στροφή ρυθμό αφαίρεσης υλικού και 1mm βάθος κοπής.

Από τα πειραματικά δεδομένα διαπιστώθηκε ότι η ταχύτητα κοπής είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την τραχύτητα επιφανείας με επόμενο παράγοντα να είναι αυτός του βάθους κοπής.

#### 4.5.11 Κράμα Inconel 718

Το κράμα Inconel 718 είναι ένας ειδικός τύπος υπερκράματος υψηλής αντοχής με βάση το νικέλιο και το χρώμιο. Είναι ανθεκτικό στη διάβρωση, στην υψηλή πίεση καθώς και στις ακραίες θερμοκρασίες έως και 700°C. Λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων του, το κράμα Inconel 718 βρίσκει εφαρμογή σε κατασκευαστικές επιχειρήσεις, σε στρατιωτικό εξοπλισμό και στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Με σημείο τήξης στους 1430°C επιδεικνύει αποτελεσματικότητα σε μεγάλο φάσμα θερμοκρασιών /46/.

Τα κράματα με βάση το νικέλιο παίζουν σημαντικό ρόλο στις βιομηχανίες των διαστημικών οχημάτων, των πυραυλικών κινητήρων των πυρηνικών αντιδραστήρων καθώς και των υποβρυχίων. Μεταξύ των κραμάτων νικελίου, το κράμα Inconel 718 είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο. Ωστόσο, ιδιότητες του όπως η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, η αντίδραση του τεμαχίου με υλικά των κοπτικών εργαλείων καθώς και η όχι τόσο καλή μικροδομή του, το καθιστούν ως ένα όχι τόσο εύκολο προς κατεργασία υλικό και για αυτό η χρήση του περιορίζεται δραστικά. Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας για την κατεργασία του κράματος Inconel 718 επικεντρώνεται κυρίως στη μελέτη των μηχανισμών φθοράς. Η κακή επιλογή παραμέτρων κοπής προκαλεί μεγάλη φθορά των εργαλείων κοπής, ίσως κάποιες φορές ακόμα και τη γρήγορη θραύση τους, ενώ επιπλέον μπορεί να δημιουργηθεί κακή ποιότητα επιφανείας ή ακόμα και να καταστραφεί το κατεργαζόμενο τεμάχιο /23/. Το κράμα Inconel 718 ανήκει στην κατηγορία των Super-Κραμάτων και χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία αεροσκαφών λόγω των ιδιοτήτων του. Οι μηχανικές και χημικές του ιδιότητες το καθιστούν δύσκολο στην κοπή. Στον πίνακα 4.31 παρουσιάζεται η χημική σύσταση του κράματος:

Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	Co
52,4	18,6	17	5	3	1	0,5	1

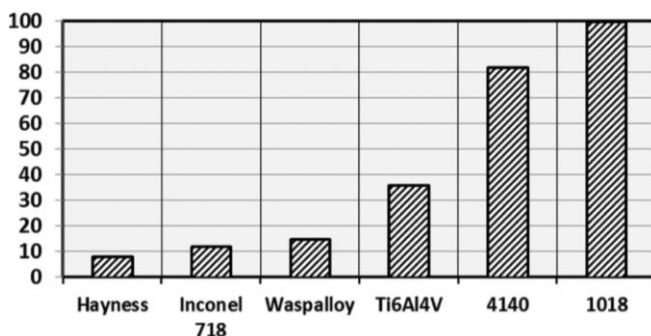
Πίνακας 4.31 Χημική σύσταση κράματος Inconel 718 (wt%) (Πηγή: New mechanistic cutting force model for milling additive manufactured Inconel 718 considering effects of tool wear evolution and actual tool geometry, Edouard Ducroux, Guillaume Fromentin, Fabien Viprey, David Prat, Alain D'Acunto, 2021)

Για τη διαδικασία του φραιζαρίσματος του κράματος Inconel 718 χρησιμοποιήθηκε καρβίδιο με στερεά επίστρωση. Στον πίνακα 4.32 φαίνονται οι παράμετροι κοπής.

	Ταχύτητα Κοπής (m/min)	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (mm/κοπτική ακμή)	Βάθος κοπής (mm)
1	40	0,07	2
2	40	0,11	2,5
3	40	0,15	3
4	55	0,1	0,5

Πίνακας 4.32 Παράμετροι κοπής κράματος Inconel 718 (wt%) (Πηγή: New mechanistic cutting force model for milling additive manufactured Inconel 718 considering effects of tool wear evolution and actual tool geometry, Edouard Ducroux, Guillaume Fromentin, Fabien Viprey, David Prat, Alain D'Acunto, 2021)

Τα κράματα με βάση το τιτάνιο και νικέλιο είναι κράματα υψηλή μηχανικής αντοχής. Αυτά τα κράματα είναι βασικά στην βιομηχανία λόγω της υψηλής αντοχής τους ως προς το βάρος τους, της υψηλής αντοχής σε θράυση και σε κόπωση, της υψηλής τους αντίστασης στη διάβρωση, αλλά και την διατήρηση αυτών ακόμα και σε κατεργασίες υψηλών θερμοκρασιών. Γενικά, τα κράματα τιτανίου και νικελίου παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από τα κράματα αλουμινίου και ταυτόχρονα μικρότερη πυκνότητα από τον χάλυβα, με αποτέλεσμα να καθίστανται κατάλληλα για δομικές εφαρμογές. Διαθέτουν μεγάλο φάσμα εφαρμογής στους αεροδιαστημικούς, στρατιωτικούς, τους βιοϊατρικούς και τους πυρηνικούς τομείς, αλλά και σε τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας. Αν και η ζήτηση αυτών των κραμάτων είναι υψηλή υπάρχουν δυσκολίες στις διαδικασίες εξόρυξης και τήξης τους, ενώ ταυτόχρονα διαθέτουν χαμηλή ικανότητα κατεργασίας. Οι ιδιότητες όπως η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, η υψηλή σκληρότητα ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες και η υψηλή χημική αντιδραστικότητα των κραμάτων τιτανίου και νικελίου είναι υπεύθυνες για την χαμηλή τους κατεργασιμότητα. Παρόλα αυτά η ζήτηση των κραμάτων τιτανίου και νικελίου αυξάνεται μέρα με την ημέρα.



Σχήμα 4.6 Σύγκριση της ικανότητας κατεργασίας υπερκράματων με αναφορά τον συμβατικό χάλυβα 1018 (Πηγή: Machinability performance of nickel alloy X-750 with SiAlON ceramic cutting tool under dry, MQL and hBN mixed nanofluid-MQL, Senol Sirin, Murat Sarikaya, Çagri Vakkas Yildirim, Turgay Kivak, Turkey, 2021)

Για να εφαρμοστούν τα κράματα τιτανίου στους τομείς που ήδη αναφέρθηκαν, αυτά πρέπει να υποστούν κατεργασίες όπως το φραιζάρισμα, η τórνευση, η λείανση καθώς και άλλων μη παραδοσιακών μεθόδων κατεργασίας. Η κατεργασιμότητα όπως είναι γνωστό, είναι η ευκολία με την οποία ένα υλικό μπορεί να υποστεί επεξεργασία υπό καθορισμένες συνθήκες κοπής. Η κατεργασιμότητα είναι ουσιαστικά ένα σχετικό μέγεθος, διότι εξαρτάται από διάφορους δείκτες, όπως η διάρκεια ζωής του εργαλείου, η κατανάλωση ισχύος (ή δύναμη κοπής), η θερμοκρασία κοπής, κλπ.

- Πειραματικές δοκιμές κατεργασίας κράματος νικελίου X-750 με διαστάσεις  $150 \times 100 \times 17,3$  mm

Το κράμα νικελίου X-750 αν και είναι ένα υλικό με όχι τόσο καλή κατεργασιμότητα, χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας, κυρίως στην αεροδιαστημική και την χημική, λόγω των πολύ καλών μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων του. Η τέλεια επιλογή κοπτικού εργαλείου για αυτό το κράμα είναι τα κεραμικά εργαλεία κοπής τα οποία διακρίνονται για την εξαιρετική του σκληρότητα, την αντοχή στη θερμότητα και τη χαμηλή χημική αντιδραστικότητα με το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση με το κράμα νικελίου X-750. Σε συνδυασμό πλέον με τις

συμβατικές μεθόδους ψύξης και λίπανσης αυξάνεται η αποδοτικότητα της κατεργασίας καθώς και η διάρκεια του κοπτικού εργαλείου /48/.

Λόγω λοιπόν της κακής κατεργασιμότητας τους κράματος νικελίου X-750 είναι σημαντικό να καθοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες κοπής. Για το σκοπό αυτό στη συνέχεια παρουσιάζεται η χημική σύσταση του κράματος νικελίου X-750 (Πίνακας 4.33) αλλά και οι ιδανικές παράμετροι κοπής για την κατεργασία του τεμαχίου από το κεραμικό κοπτικό εργαλείο SiAlON (Πίνακας 4.34).

C	Ti	Mn	Co	Fe	Si	Cu	Nb+Ta	Ni	Cr	Al
0,04	2,47	0,21	0,01	8,04	0,08	0,03	0,9	71,32	16,22	0,68

Πίνακας 4.33 Χημική σύσταση του κράματος νικελίου X-750 (Πηγή: Machinability performance of nickel alloy X-750 with SiAlON ceramic cutting tool under dry, MQL and hBN mixed nanofluid-MQL, Senol Sirin, Murat Sarikaya, Çağrı Vakkas Yıldırım, Turgay Kivak, Turkey, 2021)

Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στη φραιζα Delta Seiki CNC-1050 με ισχύ κινητήρα 11 kW και μέγιστη ταχύτητα κοπής 10000 rpm. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα μη επικαλυμμένο SiAlON CCT, από την εταιρεία παραγωγής κοπτικών εργαλείων Sandvic Coromant. Το κοπτικό εργαλείο αυτό, διακρίνεται για την εξαιρετική αντοχή του στη θερμότητα και τη φθορά σε κατεργασίες υψηλής ταχύτητας /37/.

	Ταχύτητα Κοπής (m/min)	Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (mm/rev)
1	500	0,025
2	600	0,05
3	700	0,075

Πίνακας 4.34 Παράμετροι κοπής κράματος νικελίου X-750 (Πηγή: Machinability performance of nickel alloy X-750 with SiAlON ceramic cutting tool under dry, MQL and hBN mixed nanofluid-MQL, Senol Sirin, Murat Sarikaya, Çağrı Vakkas Yıldırım, Turgay Kivak, Turkey, 2021)

- Πειραματικές δοκιμές κατεργασίας κραμάτων τιτανίου Gr5 και Gr12 υπό ξηρές συνθήκες κατεργασίας με διαστάσεις 50 x 150 x 10 mm

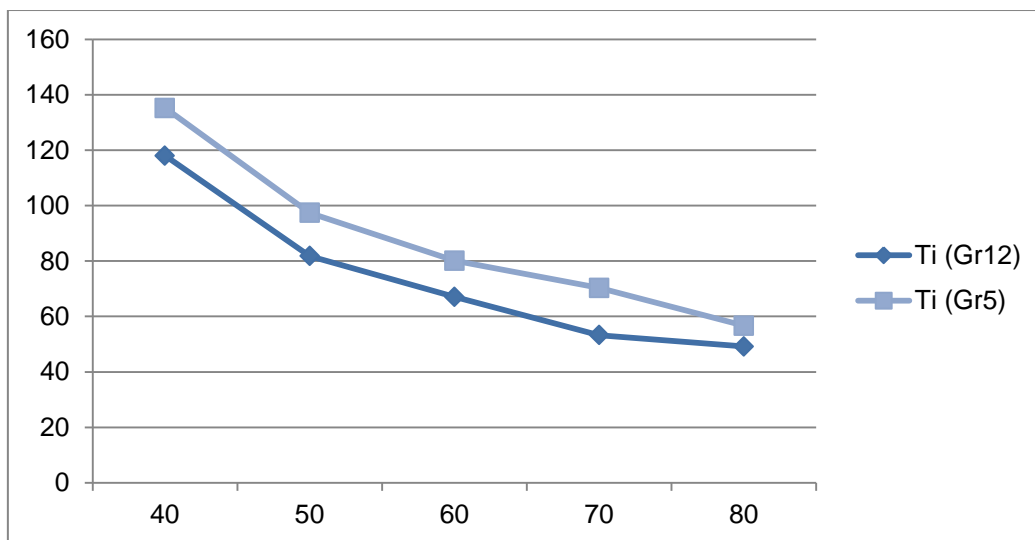
Τα κράματα τιτανίου Grade-5 χρησιμοποιούνται συνήθως σε ιατρικά, αεροδιαστημικά και θαλάσσια εξαρτήματα, καθώς και σε βιομηχανίες χημικής επεξεργασίας. Διαθέτουν μικρό βάρος και υψηλή αντοχή στη διάβρωση. Αντίστοιχα και τα κράματα τιτανίου Grade-12 χρησιμοποιούνται κυρίως σε θαλάσσιες και χημικές εγκαταστάσεις. Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε μηχανή CNC ακρίβειας πέντε άξονων υπό συνθήκες ξηρής κοπής. Η μέγιστη ταχύτητα κοπής της μηχανής είναι 50.000 rpm, με ενσωματωμένο σύστημα ψύξης και ακρίβεια θέσης  $\pm 0,001$  mm. Για την κοπή χρησιμοποιήθηκε ένα μη επικαλυμμένο καρβίδιο βολφραμίου από τα εργαλεία της Kyocera Cutting Tool Company /38/.

	Ti	V	Al	Fe	C	O	H	N	Ni	Mo
Gr-5	89,22	4,2	6,2	0,38	-	-	-	-	-	-
Gr-12	98,13	-	-	0,29	0,08	0,25	0,015	0,035	0,8	0,4

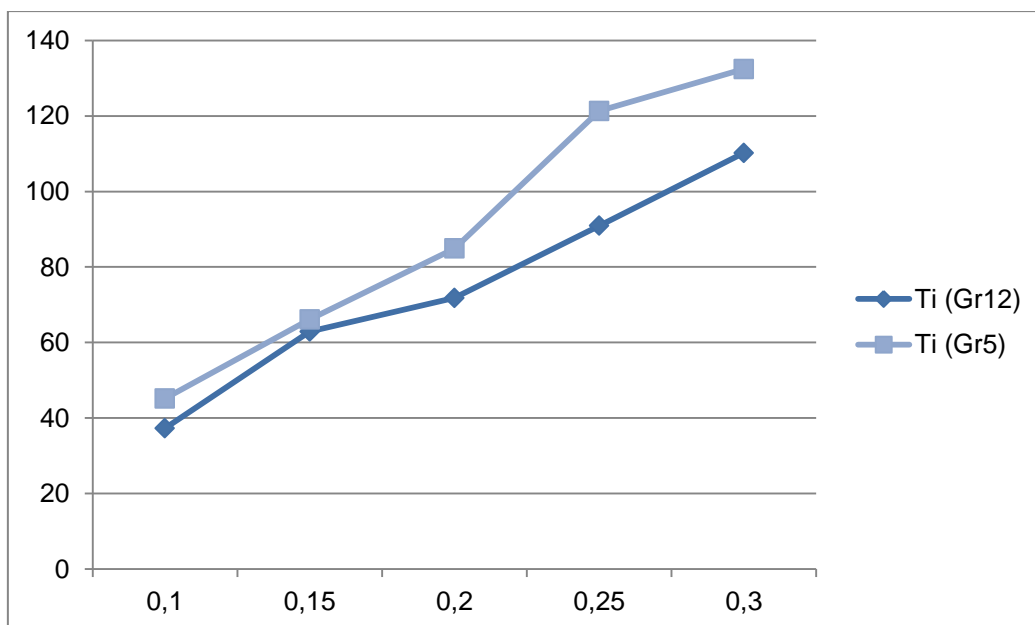
Πίνακας 4.35 Χημική σύσταση κραμάτων τιτανίου Gr5 και Gr12 (Πηγή: Investigations on the effect of Machining parameters on Machining force and roughness in Micro-Milling of Titanium Gr5 and Gr12 alloys under dry Machining conditions using carbide tool, M.S. Kishore Kumar, B. Gurudatt, H.N. Reddappa, R. Suresh, India, 2021)

Κατά την κατεργασία παρατηρήθηκε ότι οι δυνάμεις κοπής μειώνονται με την ταχύτητα κοπής (Vc) σε καθορισμένο βάθος (d) = 0,3 mm και ρυθμό αφαίρεσης υλικού (f) = 0,2 mm/min, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.7. Παρατηρείται λοιπόν από το σχήμα ότι το κράμα τιτανίου Gr5 απαιτεί μεγαλύτερη δύναμη κοπής σε οποιαδήποτε ταχύτητα κοπής, σε σχέση με το κράμα Gr12. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε αντίστοιχα ένα διάγραμμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8, στο οποίο παρουσιάζεται η σχέση της δύναμης κοπής με

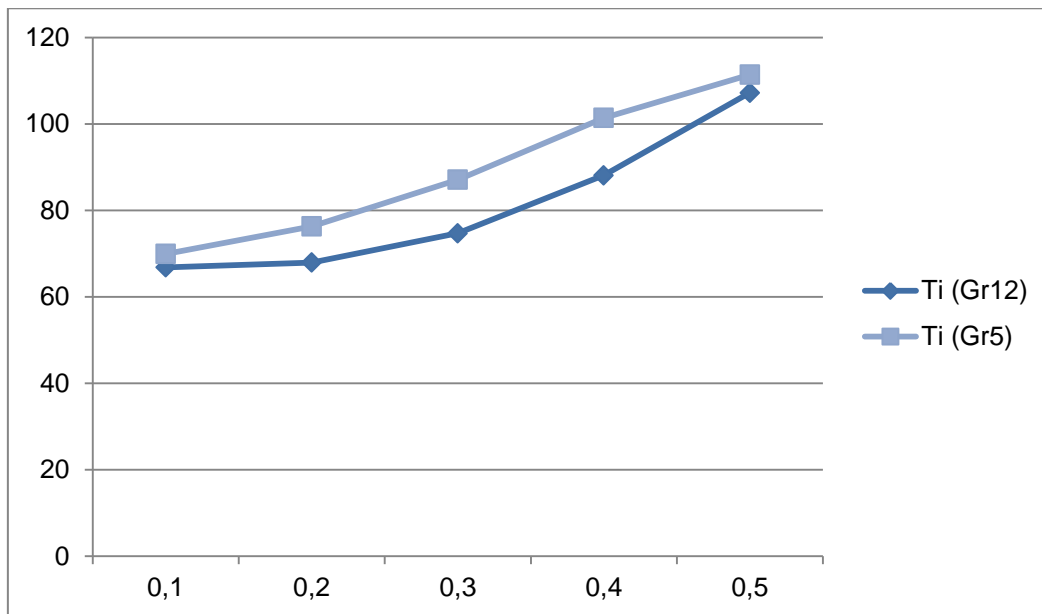
τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού σε καθορισμένη ταχύτητα κοπής ( $V_c$ ) = 60 m/min και βάθος κοπής ( $d$ ) = 0,3 mm. Από το σχήμα αυτό μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η συνολική δύναμη κατεργασίας αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού. Ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι ο μεγάλος ρυθμός αφαίρεσης υλικού οδηγεί και σε μεγάλο όγκο κομμένου υλικού στην ίδια μονάδα χρόνου με κάποιο μικρότερο ρυθμό. Αυτό οδηγεί λοιπόν σε αύξηση της τάσης μεταξύ του εργαλείου κοπής και του αποβλίπτου (δηλ. στο επίπεδο διάτμησης). Τέλος στο σχήμα 4.9 φαίνεται η σχέση του βάθους κοπής με τη δύναμη κοπής με καθορισμένες τις τιμές της ταχύτητας κοπής ( $V_c$ ) = 60 m/min και του ρυθμού αφαίρεσης υλικού ( $f$ ) = 0.2 mm/min. Το βάθος κοπής δεν επηρεάζει πολύ την κατεργασία των κραμάτων τιτανίου Gr5 και Gr12, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9 /38/.



Σχήμα 4.7 Επίδραση της ταχύτητας στην δύναμη κοπής κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου Gr5 και Gr12 (Πηγή: Investigations on the effect of Machining parameters on Machining force and roughness in Micro-Milling of Titanium Gr5 and Gr12 alloys under dry Machining conditions using carbide tool, M.S. Kishore Kumar, B. Gurudatt, H.N. Reddappa, R. Suresh, India, 2021)



Σχήμα 4.8 Επίδραση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού στην δύναμη κοπής κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου Gr5 και Gr12 (Πηγή: Investigations on the effect of Machining parameters on Machining force and roughness in Micro-Milling of Titanium Gr5 and Gr12 alloys under dry Machining conditions using carbide tool, M.S. Kishore Kumar, B. Gurudatt, H.N. Reddappa, R. Suresh, India, 2021)



Σχήμα 4.9 Επίδραση του βάθους κοπής στην δύναμη κοπής κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου Gr5 και Gr12 (Πηγή: Investigations on the effect of Machining parameters on Machining force and roughness in Micro-Milling of Titanium Gr5 and Gr12 alloys under dry Machining conditions using carbide tool, M.S. Kishore Kumar, B. Gurudatt, H.N. Reddappa, R. Suresh, India, 2021)

#### 4.5.13 Προτάσεις για δεδομένα κοπής Ti6Al4V χρησιμοποιώντας εργαλεία κοπής από την σειρά CoroMill της εταιρείας Sandvik Coromant

Το κράμα Ti6Al4V είναι ένα δύσκολο προς κατεργασία υλικό, με καλή αντοχή στη διάβρωση, υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα ακόμα και σε ακραίες θερμοκρασίες. Έτσι τα πεδία εφαρμογής του στην αεροδιαστημική βιομηχανία και στην ιατρική συνεχώς αυξάνονται. Αν και το κράμα τιτανίου Ti6Al4V είναι συνήθως ανθεκτικό στην οξείδωση κάτω από τους 420°C (λόγω της παρουσίας ενός λεπτού στρώματος φυσικού οξειδίου στην επιφάνεια του), η απόδοση του σε υψηλές θερμοκρασίες είναι περιορισμένη λόγω της μετάβασης του στρώματος οξειδίου σε μία πιο ενεργή και μη προστατευτική κατάσταση σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Για αυτό, οι εφαρμογές του κράματος Ti6Al4V περιορίζονται συχνά σε θερμοκρασίες κάτω των 400°C, γεγονός που το περιορίζει σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών, όπως σε εξαρτήματα σε έναν αεροδιαστημικό κινητήρα ή σε χημικούς αισθητήρες υψηλών θερμοκρασιών /26/.

Το τιτάνιο σαν υλικό απαιτεί συγκεκριμένη μελέτη λόγω της υψηλής αναλογίας της αντοχής του ως προς το βάρος του, με αποτέλεσμα την αντοχή σε κοπή υψηλών θερμοκρασιών. Επιπλέον, είναι χημικά αντιδραστικό, πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε πρόσφυση και συγκόλληση κατά τη διάρκεια της κοπής. Για να επιτευχθεί λοιπόν, μία καλή κοπή απαιτούνται τα κατάλληλα εργαλεία. Στον πίνακα 4.31 παρουσιάζονται κάποιες προτεινόμενες παράμετροι κοπής του κράματος Ti6Al4V, σύμφωνα με την εταιρεία Sandvik Coromant για κάθε φάση κοπής. Ενώ στου επόμενους πίνακες 4.36 – 4.44 καταγράφηκαν οι συνθήκες κοπής του κράματος τιτανίου Ti6Al4V με κάποια κοπτικά εργαλεία προτεινόμενα από την εταιρεία Sandvik Coromant, για την κατεργασία του συγκεκριμένου κράματος /26/.



Στάδιο Κοπής	Προτεινόμενες Παράμετροι Κοπής	Βάθος Κοπής
Προκαταρκτική Κοπή	Vc 40-60 m/min	>3 mm
Εκχόνδριση	Vc 60-80 m/min	1-3 mm
Αποπεράτωση	Vc 80-120 m/min	0.5-1 mm

Πίνακας 4.36 Τυπικές παράμετροι κοπής Ti6Al4V (Πηγή: Sandvik Coromant Application Guide Titanium Ti6Al4V)

**Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 390:** Το CoroMill® 390 καλύπτει πολλές εφαρμογές προσφέροντας καλή τραχύτητα επιφανείας. Προσφέρει:

- Καλές ανοχές, δίνοντας καλή τραχύτητα επιφανείας μετά τη διαδικασία της αποπεράτωσης
- Δυνατότητα κοπής σε μεγάλο βάθος
- Μειωμένους κραδασμούς και αυξημένη σταθερότητα /3/

Γεωμετρία Ένθετου Πλακιδίου	fz mm/tooth			vc m/min		
	Μέγεθος	Αρχική Τιμή	Μέγιστο-Ελάχιστο	Ένθετο Κοπής	Προτεινόμενη Τιμή	Μέγιστο-Ελάχιστο
<b>E-PL/ML Light</b>	11	0.08	0.05-0.12	GC1010	70	50-80
	17	0.08	0.05-0.15	S30T	60	40-70
	18	0.10	0.05-0.19	S40T	50	30-60
				GC2040	40	30-50
<b>M-PL/ML Medium light</b>	11	0.10	0.05-0.15	GC1010	70	50-80
	17	0.10	0.05-0.15	S30T	60	40-70
	18			S40T	50	30-60
				GC2040	40	30-50
<b>M-PM/MM Medium</b>	11	0.12	0.08-0.15	GC1010	70	50-80
	17	0.15	0.08-0.20	S30T	60	40-70
	18	0.20	0.08-0.30	S40T	50	30-60
				GC2040	40	30-50

Πίνακας 4.37 Προτεινόμενες παράμετροι κοπής κράματος Ti6Al4V με Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 390 (Πηγή: Sandvik Coromant Application Guide Titanium Ti6Al4V)

**Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 790:** Αυτό το κοπτικό εργαλείο διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Αποτελεί πρώτη επιλογή για κοπή μη σιδηρούχων μετάλλων
- Κατάλληλο για κατεργασίες αποπεράτωσης
- Διαθέτει τη δυνατότητα ασφαλούς κοπής σε υψηλές ταχύτητες
- Δυνατότητα κοπής σε μεγάλο βάθος /3/

<b>H-PL Light</b>	12 16	0.15	0.03-0.20	GC1010	200	150-250
-------------------	----------	------	-----------	--------	-----	---------

Πίνακας 4.38 Προτεινόμενες παράμετροι κοπής κράματος Ti6Al4V με Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 790 (Πηγή: Sandvik Coromant Application Guide Titanium Ti6Al4V)

**Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 690:** Το συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο έχει αναπτυχθεί ειδικά για την επεξεργασία τεμαχίων τιτανίου εξοπλίζοντας κάθε θέση ένθετου κοπτικού με ακροφύσιο ψυκτικού υγρού. Παρέχει:

- Δυνατότητα φραιζαρίσματος τιτανίου υψηλής παραγωγικότητας
- 2D προφίλ άλεσης τιτανίου /3/

<b>E-SL Light</b>	10	0.10	0.05-0.15	S30T	60	40-70
				S40T	50	30-60
				GC2040	40	30-50
<b>E-SL Light</b>	14	0.12	0.07-0.17	S30T	60	40-70
				S40T	50	30-60
				GC2040	40	30-50

Πίνακας 4.39 Προτεινόμενες παράμετροι κοπής κράματος Ti6Al4V με Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 690 (Πηγή: Sandvik Coromant Application Guide Titanium Ti6Al4V)

**Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 331:** Το κοπτικό CoroMill® 331 προσφέρει:

- Δυνατότητα κοπής υψηλής ακρίβειας σε πολλές εφαρμογές
- Υψηλής ποιότητας τραχύτητα επιφανείας και εξαιρετικούς ρυθμούς αφαίρεσης υλικού μετάλλων ακόμα και σε γωνίες 90°
- Δυνατότητα χρήσης εσωτερικού ψυκτικού, το οποίο ρυθμίζει τη θερμότητα στην ζώνη κοπής, με αποτέλεσμα τη μεγάλη διάρκεια ζωής του κοπτικού /3/.

Γεωμετρία	fz mm/tooth (inch/tooth)			vc m/min (ft/min)		
	Μέγεθος	Αρχική Τιμή	Μέγιστο-Ελάχιστο	Βαθμοί	Προτεινόμενη Τιμή	Μέγιστο-Ελάχιστο
<b>H-PL/ML Light</b>	04	0.05	0.02-0.15	S30T	60	40-70
	05	0.05	0.02-0.15	GC2040	40	30-50
	08	0.06	0.03-0.15			
	11	0.06	0.03-0.15			
	14	0.06	0.03-0.15			
<b>H-PM/MM Medium light</b>	04	0.07	0.04-0.18	S30T	50	30-60
	05	0.07	0.04-0.18	GC2040	40	30-50
	08	0.09	0.05-0.20			
	11	0.09	0.05-0.20			
	14	0.09	0.05-0.20			

Πίνακας 4.40 Προτεινόμενες παράμετροι κοπής κράματος Ti6Al4V με Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 331 (Πηγή: Sandvik Coromant Application Guide Titanium Ti6Al4V)

**Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 245:** Πρόκειται για κοπτικό εργαλείο το οποίο παρέχει μεγάλη παραγωγικότητα. Επιπλέον είναι εύκολο στη χρήση και προτείνεται για ελαφριές κοπές, λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας /3/.

<b>E-PL Light</b>	12	0.15	0.07-0.20	GC1010	60	40-70
				S30T	50	30-60
				S40T	40	30-50
<b>M-PL Medium light</b>	12	0.17	0.08-0.21	GC1010	60	40-70
				S30T	50	30-60
				S40T	40	30-50
<b>K-MM M-MM</b>	12	0.23	0.10-0.28	S30T	50	30-60
	18	0.25	0.10-0.30	S40T	40	25-50
				GC2040	40	25-50

Πίνακας 4.41 Προτεινόμενες παράμετροι κοπής κράματος Ti6Al4V με Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 245 (Πηγή: Sandvik Coromant Application Guide Titanium Ti6Al4V)

**Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 210 high feed:** Στο συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο φαίνεται πως προτεραιότητα είναι ο υψηλός ρυθμός αφαίρεσης υλικού. Πλεονέκτημα του συγκεκριμένου κοπτικού είναι οι χαμηλές δονήσεις κατά τη διάρκεια της κοπής /3/.

<b>E-PM/MM First choice</b>	09	0.8	0.5-1.2	GC1010	60	40-70
	14	1.0	0.5-1.5	S30T	50	30-60
				S40T	40	30-50
				GC2040	40	30-50
<b>M-PM/MM</b>	09	0.8	0.5-1.2	GC1010	60	40-70
	14	1.0	0.5-1.5	S30T	50	30-60
				S40T	40	30-50
				GC2040	40	30-50

Πίνακας 4.42 Προτεινόμενες παράμετροι κοπής κράματος Ti6Al4V με Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 210 high feed (Πηγή: Sandvik Coromant Application Guide Titanium Ti6Al4V)

**Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 300:** Το κοπτικό εργαλείο CoroMill® 300 είναι ένας στρογγυλός κόφτης με χρήση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Κατά τη διαδικασία κοπής με το συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι χαμηλές όπως και η αναπτυσσόμενη θερμότητα /3/.

<b>E-PL/ML Light</b>	08	0.12	0.05-0.15	GC1010 S30T	70	50-80
	10	0.15	0.05-0.18	S40T GC2040	60	40-70
	12	0.15	0.05-0.20		50	30-60
	16	0.18	0.05-0.25		40	30-50
	20	0.2	0.05-0.25			
	25.4	0.23	0.05-0.28			
<b>E-PM/MM Medium light</b>	08	0.13	0.05-0.21	GC1010 S30T	70	50-80
	10	0.18	0.05-0.25	S40T GC2040	60	40-70
	12	0.18	0.05-0.25		50	30-60
	16	0.2	0.05-0.30		40	30-50
	20	0.25	0.05-0.40			
<b>M-PM/MM Light</b>	08	0.13	0.07-0.20	GC1010 S30T	70	50-80
	10	0.15	0.07-0.25	S40T GC2040	60	40-70
	12	0.15	0.07-0.25		50	30-60
	16	0.18	0.07-0.25		40	30-50
	20	0.2	0.07-0.30			
	25.4	0.23	0.07-0.33			
<b>M-PH/MH Medium light</b>	08	0.15	0.07-0.25	GC1010 S30T	70	50-80
	10	0.2	0.07-0.30	S40T GC2040	60	40-70
	12	0.2	0.07-0.30		50	30-60
	16	0.25	0.07-0.40		40	30-50
	20	0.35	0.07-0.55			
	25.4	0.4	0.07-0.60			

Πίνακας 4.43 Προτεινόμενες παράμετροι κοπής κράματος Ti6Al4V με Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 300 (Πηγή: Sandvik Coromant Application Guide Titanium Ti6Al4V)

**Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 200:** Το CoroMill® 200 είναι ένα πολύ ανθεκτικό και ευέλικτο κοπτικό εργαλείο. Οι ισχυρές κοπτικές ακμές του το καθιστούν ικανό να κόψει ακόμα και σε σκληρές συνθήκες. Προσφέρει:

- Ασφάλεια και αξιοπιστία κατά τη διάρκεια της κοπής
- Υψηλό ρυθμό αφαίρεσης υλικού /3/

<b>PL/ML Light</b>	10	0.12	0.07-0.17	S30T	60	40-70
	12	0.12	0.07-0.17	S40T	50	30-60
	16	0.12	0.07-0.17	GC2040	40	30-50
	20	0.12	0.07-0.17			
<b>PM/MM Medium</b>	10	0.17	0.10-0.28	S30T	60	40-70
	12	0.17	0.10-0.28	S40T	50	30-60
	16	0.17	0.10-0.28	GC2040	40	30-50
	20	0.17	0.10-0.28			
<b>PM/MM Heavy</b>	10	0.28	0.10-0.42	S30T	50	30-60
	12	0.28	0.10-0.42	S40T	40	30-50
	16	0.28	0.10-0.42	GC2040		
	20	0.28	0.10-0.42			

Πίνακας 4.44 Προτεινόμενες παράμετροι κοπής κράματος Ti6Al4V με Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 200 (Πηγή: Sandvik Coromant Application Guide Titanium Ti6Al4V)

**Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 316:** Το σύστημα κοπής CoroMill® 316 προσφέρει λύσεις για τα περισσότερα είδη φραιζαρίσματος σε διάφορες ομάδες υλικών από ISO P (Χάλυβες) έως ISO S (Super κράματα και τιτάνιο). Οι ανταλλάξιμες κεφαλές κοπής επιτρέπουν γρήγορη και εύκολη εναλλαγή λειτουργιών. Στον πίνακα 4.45 παρουσιάζονται οι ταχύτητες κοπής για κάθε ένα από τα στάδια κοπής, αντίστοιχα και στον πίνακα 4.46 ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού /3/.

			Προκαταρκτική Κοπή	Εκχόνδριση	Αποπεράτωση
			$a_e \leq 1.0 \times D_c$ $a_p \leq 0.5 \times D_c$	$a_e \leq 0.3 \times D_c$ $a_p \leq 0.5 \times D_c$	$a_e \leq 0.005 \times D_c$
ISO	CMC	HB	Vc m/min	Vc m/min	Vc m/min
<b>P</b>	01.1	125	190	280	630
	01.2	150	170	255	580
	01.4	210	150	225	510
	02.1	175	165	245	555
	02.2	300	100	150	340
	03.11	200	170	250	570
	03.22	380	80	120	280
<b>M</b>	05.11	200	70	110	240
	05.21	200	55	85	190
	05.51	230	45	70	155
<b>K</b>	07.1	130	120	180	395
	08.1	180	130	190	420
	08.2	245	110	160	360
	09.2	250	105	155	350
<b>N</b>	30.22	90	1000	1100	1300
<b>S</b>	20.22	350	25	35	80
	23.22	350	40	80	150

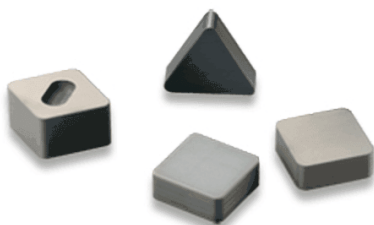
Πίνακας 4.45 Προτεινόμενες ταχύτητες κοπής κράματος Ti6Al4V με Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 316 (Πηγή: Sandvik Coromant Application Guide Titanium Ti6Al4V)

	Προκαταρκτική Κοπή	Εκχόνδριση	Αποπεράτωση
	$a_e \leq 1.0 \times D_c$ $a_p \leq 0.5 \times D_c$	$a_e \leq 0.3 \times D_c$ $a_p \leq 0.5 \times D_c$	$a_e \leq 0.005 \times D_c$
$D_c$	$f_z$ mm	$f_z$ mm	$f_z$ mm
10	0.045	0.07	0.12
12	0.055	0.085	0.14
16	0.065	0.11	0.16
20	0.08	0.13	0.18

Πίνακας 4.46 Προτεινόμενος ρυθμός αφαίρεσης υλικού κράματος Ti6Al4V με Κοπτικό εργαλείο CoroMill® 316 (Πηγή: Sandvik Coromant Application Guide Titanium Ti6Al4V)

## 4.6 Κοπτική Δυνατότητα Κοπτικών Εργαλείων

### 4.6.1 Sialon Κεραμικά εργαλεία κοπής



Σχήμα 4.10 Sialon κεραμικά εργαλεία κοπής (Πηγή: <https://www.sialon.com/product/sialon-ceramic-cutting-tools/>)

Τα Sialon κεραμικά διαθέτουν πολύπλοκη χημική σύσταση και θεωρούνται μία οικογένεια κραμάτων με ευρύ φάσμα ιδιοτήτων. Δημιουργούνται από την αντίδραση του νιτρίδιου του πυριτίου ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) με το οξείδιο του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) και το νιτρίδιο του αργιλίου ( $\text{AlN}$ ). Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα Sialon κεραμικά είναι τα  $\beta$ -SiAlON και  $(\alpha + \beta)$  SiAlON τα οποία περιέχουν περίσσεια βοηθημάτων πυροσυσσωμάτωσης /45/. Κάποιες από τις ιδιότητες τους είναι:

- Η χαμηλή πυκνότητα
- Η υψηλή αντοχή
- Η υψηλή αντοχή σε απότομες θερμοκρασιακές αλλαγές
- Η μέτρια αντοχή στη φθορά
- Η αντοχή στην οξείδωση

Η αντοχή στις απότομες θερμοκρασιακές αλλαγές καθώς και η αντοχή σε θραύση καθιστούν τα Sialon κεραμικά υλικά κατάλληλα για υλικά κοπτικών εργαλείων. Είναι μία πολύ ελκυστική λύση κοπτικών εργαλείων λόγω του χαμηλού κόστους τους. Επίσης προσφέρουν αυξημένο ρυθμό αφαίρεσης υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του κοπτικού σε σχέση με τα συμβατικά εργαλεία κοπής. Τα Sialon κεραμικά εργαλεία κοπής έχουν αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τα τσιμεντοειδή εργαλεία κοπής κυρίως κατά την κατεργασία υπερκραμάτων με βάση το νικέλιο /45/.

Σε σύγκριση με τα τσιμεντοειδή καρβίδια, τα κεραμικά εργαλεία κοπής χαρακτηρίζονται από ισχυρότερη αντοχή στη διάχυση και την οξειδωτική φθορά, ενώ διαθέτουν μεγαλύτερη σκληρότητα και αντίσταση στη διάβρωση σε περιβάλλοντα με υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον έχουν τη δυνατότητα διατήρησης της καλής ικανότητας κοπής ακόμα και σε θερμοκρασίες άνω των  $1200^\circ\text{C}$ , με αποτέλεσμα την επιτυχημένη εφαρμογή τους στην κοπή των Super-Alloys (υπερκραμάτων) με βάση το νικέλιο. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα κεραμικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων κοπής είναι τα κεραμικά με βάση το αλουμίνιο, το νιτρίδιο του πυριτίου και τα Sialon based κεραμικά. Τα Sialon κεραμικά εργαλεία κοπής παρουσιάζουν εξαιρετική απόδοση στην

κοπή χυτοσιδήρου και χάλυβα, με επιπλέον πλεονέκτημα έναντι των κεραμικών με βάση το αλουμίνιο, αφού διαθέτουν αυξημένη αδράνεια στην επαφή τους με το σίδηρο κατά τη διάρκεια κοπής του σιδήρου με υψηλή ταχύτητα κοπής /28/.

Στον πίνακα 4.48 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές της ταχύτητας κοπής και η συσχέτισή τους με τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού κατά το φραιζάρισμα του κράματος Inconel 718 χρησιμοποιώντας Sialon κεραμικό εργαλείο κοπής. Διαπιστώθηκε λοιπόν, ότι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητα κοπής.

	Στοιχεία σύνθεσης τεμαχίου (wt%)								
	Cr	Co	W	Mo	Ta	Nb	Al	Ti	Zr
	1.5-16.6	12.5-13.5	3.8-4.2	3.8-4.2	<0.2	0.6-1.0	2.0-2.4	3.5-3.9	0.025-0.05
	Si	Fe	Mn	N	C	S	P	B	Ni
	<0.2	<0.5	<0.15	≤0.005	0.02-0.05	0.015	0.015	0.06-0.15	Balance

Πίνακας 4.47 Χημική Σύνθεση τεμαχίου Inconel 718 (Πηγή: Analysis of cutting responses of Sialon ceramic tools in high-speed milling of FGH96 superalloys, Weiwei Ming, Xianghui Huang, Min Ji, Jinyang Xu, Fan Zou, Ming Chen, 2021)

	Ταχύτητα κοπής (m/min)	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (mm/rev)
<b>1</b>	225	0.02
<b>2</b>	255	0.06
<b>3</b>	285	0.08

Πίνακας 4.48 Χημική Σύνθεση τεμαχίου Inconel 718 (Πηγή: Analysis of cutting responses of Sialon ceramic tools in high-speed milling of FGH96 superalloys, Weiwei Ming, Xianghui Huang, Min Ji, Jinyang Xu, Fan Zou, Ming Chen, 2021)

#### 4.6.2 Τσιμεντοειδές Καρβίδιο

Τα τσιμεντοειδή καρβίδια κατέχουν σημαντικό ρόλο στη βιομηχανία, σε κατεργασίες όπως η κοπή, η διάτρηση και η λείανση. Τα τσιμεντοειδή καρβίδια αντιπροσωπεύουν μία κατηγορία σύνθετων υλικών, αποτελούμενη από ένα σκληρό και ανθεκτικό στη φθορά καρβίδιο (WC, TiC), και κάποιο όλκιμο συνδετικό υλικό (Co, Ni, και/ή Fe), ώστε τελικά το υλικό να κατέχει ένα μοναδικό συνδυασμό σκληρότητας και ανθεκτικότητας. Για να υπάρξει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των εργαλείων από τσιμεντοειδές καρβίδιο, απαιτούνται υψηλότερες τιμές σκληρότητας και αντοχής. Αυτό είναι δυνατό να επιτευχθεί μέσω της μείωσης του αρχικού μεγέθους των σωματιδίων του καρβιδίου, ή και με αντικατάσταση των συνδετικών υλικών (π.χ. αντικατάσταση WC με NbC και Co με Ni). Τα τσιμεντοειδή καρβίδια που χρησιμοποιούνται κυρίως στη βιομηχανία είναι αυτά με βάση το βολφράμιο, και αποτελούν περίπου το 70% των εργαλείων κοπής. Ωστόσο το 2015, το βολφράμιο κατέστη από την ευρωπαϊκή ένωση ως ένα υψηλής οικονομικής σημασίας και υψηλού σχετικού κινδύνου εφοδιασμού υλικό, έτσι το κόστος του αυξήθηκε σταθερά, με αποτέλεσμα να καταταχθεί στην όγδοη θέση στην λίστα με τις 15 πιο κρίσιμες πρώτες ύλες /30/.

Οι δύο κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου με βάση το βολφράμιο κατά τη διαδικασία κοπής είναι η θερμοκρασία κοπής και χημική αντίδραση μεταξύ του τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου. Έχει παρατηρηθεί κατά την

κοπή τεμαχίου από τσιμεντοειδές καρβίδιο με βάση το βολφράμιο, ότι σε θερμοκρασίες 1000 ° C και άνω, μειώνεται η σκληρότητα και η αντοχή του κοπτικού οδηγώντας το σε φθορά. Ενώ, η χημική φθορά στην ακμή του κοπτικού παρατηρείται κυρίως κατά τη διάρκεια κοπής τεμαχίων χάλυβα και χυτοσιδήρου /30/.

Αντίστοιχα, το καρβίδιο με βάση το νιόβιο διαθέτει και αυτό καλές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες, όπως υψηλή σκληρότητα, υψηλό σημείο τήξης και χαμηλή πυκνότητα. Η χαμηλή πυκνότητα καθιστά το NbC ελκυστικό από άποψη κόστους, αφού για να επιτευχθεί ο ίδιος όγκος/σχήμα ένθετου με αυτό με βάση το βολφράμιο WC, χρειάζεται μόνο το ήμισυ περίπου της συνολικής μάζας NbC σε σύγκριση με το WC. Επιπλέον το NbC διαθέτει καλύτερες ιδιότητες, σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Διατηρεί δηλαδή τη σκληρότητα του, αλλά διαθέτει και σημαντικά χαμηλότερη διαλυτότητα σε τεμάχια σιδήρου και κραμάτων του σε υψηλές θερμοκρασίες /31/. Κατά τη δοκιμή κοπής με τσιμεντοειδές καρβίδιο χρησιμοποιήθηκε τεμάχιο από κράμα 718 (Alloy 718). Στον πίνακα 4.49 παρουσιάζονται τα συστατικά του κράματος.

Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	Co	C
%	%	%	%	%	%	%	%	%
53.9	18.0	Balance	5.2	2.9	1.0	0.5	0.2	0.02
Mn	S	P	Si	W	Cu	B	V	
%	%	%	%	%	%	%	%	
0.7	<0.0003	0.01	0.7	0.02	0.04	0.004	0.03	

Πίνακας 4.49 Χημική σύσταση τεμαχίου από κράμα 718 (Πηγή: Investigations on the Influence of the Cemented Carbide Grade on the Surface Integrity when End Milling DA 718, T. Bergsa, M. Hardta\*, D. Schraknepper, 2020)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βέλτιστες συνθήκες κοπής τους κράματος 718 από ένα τσιμεντοειδές καρβίδιο.

Ταχύτητα κοπής (m/min)	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (mm/min)	Βάθος κοπής (mm)
800	713	1

Πίνακας 4.50 Προτεινόμενες παράμετροι κοπής κράματος 718 από τσιμεντοειδές καρβίδιο (Πηγή: Investigations on the Influence of the Cemented Carbide Grade on the Surface Integrity when End Milling DA 718, T. Bergsa, M. Hardta\*, D. Schraknepper, 2020)

Στο επόμενο πείραμα πραγματοποιήθηκε κατεργασία σε τεμάχιο από γκρι χυτοσίδηρο με διαστάσεις 150 × 150 mm × 50 mm. Για την κοπή του τεμαχίου χρησιμοποιήθηκαν όπως και προηγουμένως, τετράγωνα ένθετα κοπής κατασκευασμένα από τσιμεντοειδή καρβίδια (τα περισσότερα τσιμεντοειδή καρβίδια αποτελούνται κυρίως από βολφράμιο και κοβάλτιο και έχουν υψηλή πυκνότητα) /29/.

Χημική σύνθεση τεμαχίου κατεργασίας	Στοιχεία σύνθεσης τεμαχίου (wt%)					
	C	Si	Mn	Ph	S	Fe
	3.4	3.0	1.2	1.2	0.15	Balance

Πίνακας 4.51 Χημική σύσταση τεμαχίου κατεργασίας από γκρι χυτοσίδηρο (Πηγή: Microstructure, mechanical and machining properties of LPS and SPS NbC-cemented carbides for face-milling of grey cast iron, R.M. Genga, L.A. Cornish, M. Woydt, A. Janse van Vuuren, C. Polese, 2018)



	Ταχύτητα κοπής (m/min)	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (mm/min)	Βάθος κοπής (mm)
1	100	40	1
2	200	80	1
3	200	80	0,5
4	300	120	0,5
5	300	120	0,5

Πίνακας 4.52 Παράμετροι κοπής τεμαχίου κατεργασίας από γκρι χυτοσίδηρο από τσιμεντοειδές καρβίδιο (Πηγή: Microstructure, mechanical and machining properties of LPS and SPS NbC-cemented carbides for face-milling of grey cast iron, R.M. Genga, L.A. Cornish, M. Woydt, A. Janse van Vuuren, C. Polese, 2018)

#### 4.6.3 Κεραμικό Εργαλείο Κοπής



Τα κεραμικά εργαλεία κοπής χρησιμοποιούνται ευρέως για την κοπή σκληρών ως προς τη μηχανή υλικών, αν και παρόλα αυτά οι εφαρμογές των κεραμικών εργαλείων κοπής είναι περιορισμένες λόγω του ότι υπάρχουν περιορισμοί στον σχεδιασμό τους και στην παραγωγή τους /32/. Είναι κατάλληλα για το φραιζάρισμα εξαρτημάτων κινητήρα, όπως τα σώματα των βαλβίδων, το περίβλημα του κιβωτίου ταχυτήτων και του στροφαλοφόρου άξονα.

Σχήμα 4.11 Εργαλεία κοπής PCD (Πηγή: <https://www.materialstoday.com/hardmetals-and-ceramics/news/ceramic-insert-improves-cast-iron-milling/>)

Οι σκληρυσμένοι χάλυβες έχουν εφαρμοστεί σε διάφορα πεδία της μηχανικής λόγω της υψηλής αντοχής, της υψηλής σκληρότητας και της καλής αντοχής τους στη φθορά. Παρόλα αυτά, θεωρούνται

δύσκολα προς κατεργασία υλικά σε σύγκριση με τους απλούς χάλυβες, λόγω του ότι η υψηλή σκληρότητα αυτών των τεμαχίων δημιουργεί υψηλές δυνάμεις κοπής καθώς και μεγάλη τριβή μεταξύ του τεμαχίου και του εργαλείου κοπής. Επιπλέον η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των τεμαχίων από σκληρυσμένους χάλυβες, αυξάνει τη θερμοκρασία κοπής, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μεγάλη φθορά του κοπτικού εργαλείου μέχρι του σημείου θραύσης του σε ορισμένες περιπτώσεις. Τα κεραμικά λοιπόν εργαλεία κοπής διαθέτουν μοναδικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, ακόμα και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Κάποιες από αυτές τις ιδιότητες είναι η εξαιρετικά υψηλή σκληρότητα, η υψηλή αντοχή στην φθορά και η χαμηλή σχετικά αντιδραστικότητα με χάλυβες αλλά και με άλλα υλικά. Ως εκ τούτου τα κεραμικά εργαλεία κοπής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατεργασία υλικών, τα οποία είναι δύσκολο να κατεργαστούν με παραδοσιακά εργαλεία κοπής. Ακόμα, η βέλτιστη ταχύτητα κοπής των κεραμικών εργαλείων είναι τρεις έως δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή των συνηθισμένων τσιμεντοειδών καρβιδίων εργαλείων κοπής, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει εξαιρετικά την απόδοση της κατεργασίας /32/. Κατά τον έλεγχο κοπής με κεραμικό εργαλείο κοπής χρησιμοποιήθηκε τεμάχιο από κράμα 718 (Alloy 718). Στον πίνακα 4.53 φαίνονται οι βέλτιστες συνθήκες κοπής του κράματος 718 από κεραμικό εργαλείο κοπής.

Ταχύτητα κοπής (m/min)	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (mm/min)	Βάθος κοπής (mm)
40	153	0.75

Πίνακας 4.53 Παράμετροι κοπής κράματος 718 από κεραμικό εργαλείο κοπής (Πηγή: Cutting performance of solid ceramic end milling tools in machining hardened AISI H13 steel, Bing Wang, Zhanqiang Liu, China, 2016)

#### 4.6.4 Πολυκρυσταλλικό Διαμάντι (PCD)

Το πολυκρυσταλλικό διαμάντι (PCD) είναι ένα εξαιρετικά ανθεκτικό υλικό, το οποίο αποτελείται από κρυστάλλους διαμαντιών χωρίς συστηματικό προσανατολισμό. Είναι συνθετικό υλικό και παράγεται μέσω της διαδικασίας πυροσυσσωμάτωσης υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας οι κενές θέσεις μεταξύ των κόκκων PCD γεμίζουν με κράμα κοβαλτίου /40/. Στα κυριότερα οφέλη του πολυκρυσταλλικού διαμαντιού ως εργαλείο κοπής περιλαμβάνονται:

- η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των PCD σε σχέση με τα καρβιδοειδή εργαλεία κοπής. Τα εργαλεία καρβιδίου λειτουργούν μόνο για λίγες μέρες ή εβδομάδες ανάλογα με τα επίπεδα παραγωγής, σε αντίθεση με τα εργαλεία PCD τα οποία έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν για μήνες. Αυτό καθιστά τα εργαλεία PCD εξαιρετική επιλογή για εγκαταστάσεις με υψηλή παραγωγικότητα.
- η απόδοση υψηλής ταχύτητας. Τα εργαλεία PCD μπορούν να λειτουργήσουν έως και δέκα φορές πιο γρήγορα από τα εργαλεία καρβιδίου στη μέγιστη απόδοση και αποτελεσματικότητα.
- οι αυστηρότερες ανοχές. Τα εργαλεία PCD είναι πιο ακριβή και διατηρούν την ακμή τους αιχμηρή πολύ περισσότερο ακόμα και από τα χαλύβδινα εργαλεία υψηλής ταχύτητας (HSS).
- η ευελιξία. Στο παρελθόν, τα εργαλεία PCD θεωρούνταν ένα εξειδικευμένο υλικό λόγω του ότι μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία κοπής σε μία πολύ μικρή γκάμα υλικών των κατεργαζόμενων τεμαχίων. Ωστόσο η πρόοδος στις διαδικασίες και στα υλικά παραγωγής επέτρεψε τη χρήση των εργαλείων κοπής PCD σε πολλές εφαρμογές ακόμα και στην κοπή αλουμινίου.
- η εξαιρετική ποιότητα επιφανείας. Τα εργαλεία PCD προσφέρουν υψηλής ποιότητας φινίρισμα επιφανείας χωρίς να απαιτείται δεύτερο πέρασμα /40/.



Σχήμα 4.12 Εργαλεία κοπής PCD (Πηγή: <https://www.triumphtool.com/metal-working-tools-blog/the-advantages-of-polycrystalline-diamond-pcd-tools/>)

Τα κράματα τιτανίου είναι δύσκολο να κατεργαστούν λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας και της υψηλής χημικής αντιδραστικότητας. Η υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την κατεργασία αυτών των υλικών αυξάνει κατά πολύ τη φθορά του εργαλείου. Λόγω της εξαιρετικής σκληρότητας και της εξαιρετικής θερμικής αγωγιμότητας, το πολυκρυσταλλικό διαμάντι είναι το ιδανικό υλικό για την κοπή κραμάτων τιτανίου. Η σκληρότητα των PCD κοπτικών εργαλείων είναι δύο φορές μεγαλύτερη από τη

σκληρότητα του πολυκρυσταλλικού κυβικού βοριονιτρίδιου (PCBN), κάτι το οποίο εξασφαλίζει την υψηλή αντοχή στη φθορά του κοπτικού εργαλείου.

Επιπλέον η θερμική αγωγιμότητά του είναι πέντε φορές μεγαλύτερη από αυτήν των καρβιδίων βολφραμίου για αυτό και τα κοπτικά εργαλεία από πολυκρυσταλλικά υλικά, καθίστανται τα ιδανικότερα εργαλεία για την κατεργασία των κραμάτων τιτανίου. Στον πίνακα 4.50 παρουσιάζονται οι ιδανικές συνθήκες κοπής για την κοπή Ti6Al4V από PCD /33/.

Ταχύτητα κοπής (m/min)	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (mm/rev)	Βάθος κοπής (mm)
160	0.15	0.2

Πίνακας 4.54 Παράμετροι κοπής Ti6Al4V από PCD (Πηγή: Wear mechanisms and performance of abrasively ground polycrystalline diamond tools of different diamond grains in machining titanium alloy, Guangxian Li, Shuang Yi, Shoujin Sun, Songlin Din, 2017)

#### 4.6.5 Πολυκρυσταλλικό Κυβικό Βοριονιτρίδιο (pcBN)

Το pcBN είναι το δεύτερο πιο σκληρό υλικό στον κόσμο και χρησιμοποιείται ευρέως για λείανση χάλυβα. Κρύσταλλοι βοριονιτρίδιου οι οποίοι συντήκονται, και στη συνέχεια συνδυάζονται με κάποια συνδετικά υλικά υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας δημιουργούν τα κοπτικά εργαλεία από πολυκρυσταλλικό κυβικό βοριονιτρίδιο. Όσον αφορά την αντοχή σε θερμότητα το pcBN είναι χημικά σταθερό στους 1300°C, σε σύγκριση με το διαμάντι στο οποίο η οξειδωση ξεκινάει γύρω τους 700°C. Επιπλέον παρουσιάζει εξαιρετικές ιδιότητες καθώς χρησιμοποιείται για την κατεργασία κατεργαζόμενων τεμαχίων από χυτοσίδηρο, ανθεκτικών στη θερμότητα κραμάτων και σιδήρου με υψηλή σκληρότητα (HRC 45 και άνω). Μία ακόμα ιδιότητα των κοπτικών εργαλείων από pcBN είναι ότι διαθέτουν χαμηλό συντελεστή τριβής για αυτό και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές λείανσης. Αν και λόγω των ακραίων συνθηκών παρασκευής (υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις) τέτοιων εργαλείων κοπής, το κόστος παραγωγής τους είναι αρκετά υψηλό, προτιμάται από τις βιομηχανίες λόγω των πολύ καλών ιδιοτήτων του.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η κατεργασία των κραμάτων τιτανίου είναι ιδιαίτερα απαιτητική και τα κοπτικά εργαλεία που μπορούν να ανταπεξέλθουν είναι αυτά που είναι κατασκευασμένα από πολυκρυσταλλικό διαμάντι ή από πολυκρυσταλλικό κυβικό βοριονιτρίδιο (pcBN). Στον πίνακα 4.51 παρουσιάζονται οι παράμετροι κοπής που είναι κατάλληλοι για την κοπή κράματος τιτανίου από pcBN /34/.

Ταχύτητα κοπής (m/min)	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (mm/rev)	Βάθος κοπής (mm)
300	0.10	0.3

Πίνακας 4.55 Παράμετροι κοπής κράματος τιτανίου από pcBN (Πηγή: Performance and wear mechanisms of PCD and pcBN cutting tools during machining titanium alloy Ti6Al4V, Rebecka Lindvall, Filip Lenrick, Henrik Persson, Rachid M'Saoub, iJan-Eric Ståhl, Volodymyr Bushlya, 2020)

#### 4.6.6 PVD

Η επίστρωση PVD (physical vapor deposition), επίσης γνωστή και ως επίστρωση λεπτής μεμβράνης, αναφέρεται σε μια ποικιλία τεχνικών εναπόθεσης ενός στερεού υλικού το οποίο εξατμίζεται σε περιβάλλον κενού και στη συνέχεια εναποτίθεται ως επίστρωση

καθαρού υλικού ή κράματος πάνω σε ένα διαφορετικό υλικό. Η επικάλυψη αυτή δεν είναι ένα απλό μεταλλικό στρώμα στην επιφάνεια ενός υλικού, αλλά είναι συνθετικά συνήθως υλικά τα οποία εναποτίθενται άτομο ανά άτομο στην επιφάνεια του υλικού. Το επιφανειακό αυτό στρώμα βελτιώνει σημαντικά την αντοχή και τη λειτουργία ενός υλικού.

Για την επιλογή των παραμέτρων κοπής για φραιζάρισμα χάλυβα MDN 250 στην φάση της αποπεράτωσης χρησιμοποιήθηκαν τα επικαλυμμένα PVD καρβίδια AlCrN και AlTiN (Seco Tool India). Τα επικαλυμμένα εργαλεία σε συνδυασμό με ψύξη κατά την διάρκεια κατεργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κατεργασίες υψηλής ταχύτητας. Τα επικαλυμμένα ένθετα διαθέτουν υψηλότερη διάρκεια ζωής από τα μη επικαλυμμένα καθώς προσφέρουν καλύτερη ποιότητα επιφανείας στο τεμάχιο μετά από κατεργασία φινιρίσματος. Και για τα δύο εργαλεία κοπής χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παράμετροι κοπής /36/.

Ni	Co	Al	Mo	Mn	Ti	Si	C	Fe
18.5	8.5	4.17	4.8	0.05	0.4	0.05	0.01	Balance

Πίνακας 4.56 Χημική σύσταση τεμαχίου χάλυβα MDN 250 (Πηγή: Investigation on the performance of AlCrN and AlTiN coated cemented carbide inserts during end milling of maraging steel under dry, wet and cryogenic environments, Vinay Varghese, Akhil K., M. R. Ramesh, D. Chakradhar, 2019)

Ταχύτητα Κοπής (rpm)	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (mm/min)	Βάθος κοπής (mm)
270	58	0.3
350	58	0.3
540	58	0.3

Πίνακας 4.57 Παράμετροι κοπής από τεμαχίου χάλυβα MDN 250 από επικαλυμμένα καρβίδια AlCrN και AlTiN (Πηγή: Investigation on the performance of AlCrN and AlTiN coated cemented carbide inserts during end milling of maraging steel under dry, wet and cryogenic environments, Vinay Varghese, Akhil K., M. R. Ramesh, D. Chakradhar, 2019)

Τα αποτελέσματα των δοκιμών για αυτά τα δεδομένα έδειξαν ότι η επίστρωση AlCrN έχει καλύτερη αντοχή στη φθορά και καλύτερη μηχανική κατεργασιμότητα σε σύγκριση με την επικάλυψη AlTiN. Επιπλέον όπως είναι προφανές όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής τόσο μειώνεται η διάρκεια ζωής του εργαλείου /36/.

#### 4.6.7 High-Speed Steel (HSS)



Σχήμα 4.13 Χάλυβας υψηλής ταχύτητας - M8(Πηγή: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/metals-what-are-metals/steels-properties-of-steels/high-speed-steel-hss/>)

Οι χάλυβες υψηλής ταχύτητας είναι μία εξειδικευμένη κατηγορία χαλύβδινων εργαλείων κοπής, τα οποία διακρίνονται για την ικανότητα τους να κόβουν υλικά σε υψηλές ταχύτητες. Για περισσότερο από έναν αιώνα οι χάλυβες υψηλής ταχύτητας (HSS) χρησιμοποιούνταν ευρέως στην παραγωγή κοπτικών εργαλείων. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι η υψηλή τους αντοχή σε σύγκριση με τα κεραμικά εργαλεία κοπής ή τα τσιμεντοειδή καρβίδια. Ωστόσο το πολύ σημαντικό μειονέκτημα τους είναι η χαμηλή σκληρότητα και επομένως η αντοχή στην φθορά ιδίως σε υψηλές θερμοκρασίες. Μέχρι σήμερα ο πιο αποτελεσματικός τρόπος βελτίωσης της

σκληρότητας των χαλύβων υψηλής ταχύτητας είναι η εναπόθεση επικαλύψεων στην επιφάνειά τους. Από την άλλη μεριά, πραγματοποιούνται συνεχώς έρευνες για τη βελτιστοποίηση της μικροδομής των HSS, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά αυξημένη αντοχή στη φθορά, άρα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του κοπτικού. Αυτά τα εργαλεία κοπής χρησιμοποιούνται εκτενώς στην κατασκευή εργαλείων κοπής τα οποία χρησιμοποιούνται σε εργαστήρια και βιομηχανίες. Οι HSS είναι σύνθετα σιδηρούχα κράματα τα οποία περιέχουν άνθρακα, χρώμιο, βανάδιο και μολυβδαίνιο ή βολφράμιο. Τα στοιχεία κραμάτωσης εισάγονται σε καθορισμένες ποσότητες στοχεύοντας στη δυνατότητα λειτουργίας τους στην υψηλότερη θερμοκρασία, άρα και στην μέγιστη ταχύτητα. Σημαντικό στοιχείο για την απόδοση των χαλύβων υψηλής ταχύτητας είναι το μέγεθος της σκληρότητας μετά τη διαδικασία θερμικής επεξεργασίας /41/.

Για παράδειγμα, ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος χάλυβας υψηλής ταχύτητας είναι ο M2. Οι χάλυβες υψηλής ταχύτητας μολυβδαινίου χαρακτηρίζονται ως χάλυβες της ομάδας M σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης AISI. Το M2 HSS αποτελείται στο εσωτερικό της μικροδομής του από μικρά και ομοιόμορφα κατανεμημένα καρβίδια, τα οποία του προσδίδουν υψηλή αντοχή στη φθορά. Οι ποσότητες σε άνθρακα και στοιχεία κραμάτωσης είναι σε καθορισμένες ποσότητες ώστε να παρέχουν στο χάλυβα υψηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και αποτελεσματική χρήση σε βιομηχανικές εφαρμογές /41/. Στον πίνακα 4.54 παρουσιάζεται η τυπική χημική σύσταση του χάλυβα υψηλής ταχύτητας M2.

Fe	C	Cr	Mo	W	V
Balance	0,01	0,4	0,05	0,06	0,02

Πίνακας 4.58 Χημική σύσταση χάλυβα υψηλής ταχύτητας M2 (Πηγή: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/metals-what-are-metals/steels-properties-of-steels/high-speed-steel-hss/>)

#### 4.6.8 Ανθρακούχος Χάλυβας



Σχήμα 4.14 Κοπτικό εργαλείο φραιζαρίσματος από χάλυβα υψηλού άνθρακα (Πηγή: <https://www.indiamart.com/pr oddetail/extra-long-end-mill-cutters-8730837712.html>)

Ο ανθρακούχος χάλυβας είναι ένα κράμα σιδήρου – άνθρακα το οποίο περιέχει έως και 2,1 wt.% άνθρακα. Στους ανθρακούχους χάλυβες δεν υπάρχει κάποια ελάχιστη καθορισμένη περιεκτικότητα στα στοιχεία κραμάτωσης, ενώ συχνά περιέχουν μαγγάνιο. Η μέγιστη περιεκτικότητα σε μαγγάνιο, πυρίτιο και χαλκό δεν πρέπει να ξεπερνά το 1,65 wt.%, 0,6 wt.% και 0,6 wt.%, αντίστοιχα. Οι ανθρακούχοι χάλυβες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες με βάση την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα, σε χάλυβες χαμηλού άνθρακα, χάλυβες μεσαίου άνθρακα και χάλυβες υψηλού άνθρακα /43/.

	Περιεκτικότητα σε άνθρακα
<b>Χάλυβες χαμηλού άνθρακα</b>	<0,25
<b>Χάλυβες μεσαίου άνθρακα</b>	0,25 – 0,60
<b>Χάλυβες υψηλού άνθρακα.</b>	0,60 – 1,25

Πίνακας 4.59 Περιεκτικότητα σε άνθρακα των ανθρακούχων χαλύβων (Πηγή: <https://matmatch.com/learn/material/carbon-steel>)

- Χάλυβες χαμηλού άνθρακα: Οι χάλυβες χαμηλού άνθρακα είναι οι πιο διαδεδομένη μορφή ανθρακούχων χαλύβων. Διαθέτουν περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη από 0,25 wt.% και δεν μπορούν να σκληρυνθούν με θερμική επεξεργασία παρά μόνο με ψυχρή. Αυτού του τύπου οι ανθρακούχοι χάλυβες είναι σχετικά μαλακοί και έχουν χαμηλή αντοχή.
- Χάλυβες μεσαίου άνθρακα: Οι χάλυβες μεσαίου άνθρακα έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα 0,25 - 0,60 wt.% περιεκτικότητα σε μαγγάνιο 0,60 - 1,65 wt.%. Οι μηχανικές τους ιδιότητες βελτιώνονται μέσω θερμικής επεξεργασίας, αλλά και με προσθήκες στοιχείων κραμάτωσης όπως χρώμιο, μολυβδαίνιο και νικέλιο.
- Χάλυβες υψηλού άνθρακα: Οι χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα 0,60 - 1,25 wt.% και περιεκτικότητα σε μαγγάνιο 0,30 - 0,90 wt.%. διαθέτουν την υψηλότερη σκληρότητα από τους υπόλοιπους ανθρακούχους χάλυβες καθώς και τη χαμηλότερη ολκιμότητα. Επιπλέον είναι πολύ ανθεκτικοί στη φθορά. Για μεγαλύτερη σκληρότητα προστίθενται στοιχεία κραμάτωσης όπως χρώμιο, βανάδιο, μολυβδαίνιο και βολφράμιο /43/.

Γενικά τα εργαλεία κοπής από ανθρακούχο χάλυβα είναι φθηνά εργαλεία κοπής και χρησιμοποιούνται συνήθως για κατεργασίες σε χαμηλές ταχύτητες. Λόγω του ότι χάνουν τη σκληρότητά τους σε θερμοκρασίες άνω των 250°C δεν προτιμούνται στις σύγχρονες κατεργασίες κοπής. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε κατεργασίες φραιζαρίσματος και τórνευσης για υλικά κατεργαζόμενων τεμαχίων όπως είναι το αλουμίνιο, το μαγνήσιο και ο ορείχαλκος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε αρχικά καταγραφή των κυριότερων κατηγοριών των τεμαχίων προς κατεργασία. Η καταγραφή περιέχει βασικά στοιχεία της δομής αυτών των υλικών. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα κυριότερα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την κατεργασία αυτών των τεμαχίων. Καταγράφηκαν οι ιδιότητές τους και τεκμηριώθηκε η καταλληλότητά τους για τη χρήση τους έναντι των συγκεκριμένων τεμαχίων βάσει των χαρακτηριστικών τους. Ακολούθως περιγράφηκαν συνδυασμοί αυτών βάσει μετρήσεων ώστε να προσδιοριστεί ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων κοπής για κάθε συνδυασμό κοπτικού εργαλείου – τεμαχίου. Οι κύριες παράμετροι κοπής που μελετήθηκαν και εφαρμόστηκαν είναι η ταχύτητα κοπής, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού και το βάθος κοπής. Για την τεκμηρίωση της καταλληλότητας των συνδυασμών κοπτικού εργαλείου-τεμαχίου, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από πραγματικά πειράματα τα οποία αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία, και από δεδομένα εταιρειών παραγωγής κοπτικών εργαλείων. Στόχος της ιδανικής επιλογής του κατάλληλου κοπτικού εργαλείου που θα χρησιμοποιηθεί στο αντίστοιχο υλικό προς κατεργασία, είναι αρχικά η βέλτιστη αποτελεσματικότητα του κοπτικού εργαλείου. Η αποτελεσματικότητα αυτή αφορά τόσο στο άρτιο τεχνικό αποτέλεσμα, όσο όμως και στην οικονομικότερη λύση, ελαχιστοποιώντας τις αστοχίες στο κοπτικό εργαλείο και στο υλικό προς κατεργασία. Ο συνδυασμός των αριθμητικών δεδομένων αποδεικνύει αυτή την άριστη συσχέτιση στη διαδικασία κατεργασίας των υλικών.



- [1] ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ ΧΑΣΑΠΗ, Σχεδίαση και Κατασκευή εργαλειοφόρου άξονα Φ22 φρέζας του Εργαστηρίου Μηχ/ργικής Τεχνολογίας II, 2011.
- [2] Τσουρβελούδης Ν., Νικολός Ι., Τεχνολογίες Παραγωγής, 1η έκδοση, 2014
- [3] Sandvic Coromant
- [4] <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26076/mathimata/2006Fresarisma.pdf>
- [5] Αριστομένης Θ. Αντωνιάδης, 'Μηχανουργική Τεχνολογία', Εκδόσεις Τζιόλα, 2017
- [6] ISCAR's Quick Reference Guide for Die and Mold Making
- [7] Experimental study on the milling of thin parts oftitanium alloy, Zhang Guimu, Yu Chao, Shi Rong Chen, An Libao, China, 2003
- [8] Multi-response optimization of machining parameters for end millingprocess on BSL168-T6511 aluminium alloy using Taguchi based greyrelational analysis, B. Srinivasa Rao, Ch. Kanna Babu, H. Shivananda Nayaka, 2021
- [9] A mechanistic model for the prediction of cutting forces in the face-milling of ductile spheroidal cast iron components for wind industry application, Technical University of Denmark DTU, Department of
- [10] Tool deterioration of 316 stainless steel in dry down-milling usingcarbide insert, N.F. Husein, N.H. Razak, 2021
- [11] Effect of machining parameters on cutting force during dry milling of2205 DSS and 2507 SDSS materials, Pradeep George, K. Leo Dev Wins, D.S. Ebenezer Jacob Dhas, Pramod George, B. Anuja Beatrice, India, 2021
- [12] Investigation of Chip-Tool Interface Temperature: Effect of Machining Parameters and Tool Material on Ferrous and Non-Ferrous Metal, ICMPC 2017, Surabhi Lata Ramakant Rana Hitesh.
- [13] Ajay Sharma, MAE Dpt. Amity School of Engineering & Technology, Amity University, Noida Campus, India, 2020.
- [14] 3D Finite Element Analysis of milling process for non-ferrous metalusing deform-3D, Premnarayan Vishwakarma
- [15] Machinability study and process optimization in face milling of some super alloys with indexable copy face mill inserts, Chandra Nath, Zachary Brooks, Thomas R. Kurfess, 2015
- [16] Productivity and quality improvement by optimization of milling parameters of super alloy, A. Maria Jackson, N. Baskar, R. Sabarish, S. Mohan Raj, A. Annis Ahmed, India, 2020
- [17] Surface Roughness Analysis and Parameter Optimization of Mold Steel Milling, Xuefeng Wu\*, Xuefeng Yin, 2018
- [18] Machining feasibility and sustainability study on end milling process of Monel alloy, Muhammed Shihaan, J. Chandradass , T.T.M. Kannan, S.M. Sivagami, India, 2020
- [19] Investigation of vibration analysis during end milling process of monelalloy, Muhammed shihaan, J. Chandradass, TTM. Kannan, 2021
- [20] An experimental investigation on the process parameters influencingmachining forces during milling of carbon and glass fiber laminates, N. Rajesh Mathivanan, B.S. Mahesh, H. Anup Shetty, 2016
- [21] Milling parameter and tool wear dependent surface quality in micro-milling of brass, ehena\*, Eric Segebadea, Michael Gerstenmeyera, Frederik Zangera, Volker Schulze, Germany, 2020
- [22] Prediction of surface roughness and tool wear in milling process on brass(C26130) alloy by Taguchi technique, S.V. Alagarsamy, M. Ravichandran, M. Meignanamoorthy, S. Sakthivelu, S. Dineshkuma, India, 2020

- [23] Optimization of Machining Parameters for End Milling of Inconel 718 Super Alloy Using Taguchi Based Grey Relational Analysis, Lohithaksha M Maiyara, Dr.R.Ramanujamb, K.Venkatesanc, Dr.J.Jerald, India, 2013
- [24] New mechanistic cutting force model for milling additive manufactured Inconel 718 considering effects of tool wear evolution and actual tool geometry, Edouard Ducroux, Guillaume Fromentin, Fabien Viprey, David Prat, Alain D'Acunto, 2021
- [25] Effect of machining parameters on surface roughness for compacted graphite cast iron by analyzing covariance function of Gaussian process regression, Juan Lu, Zhenkun Zhang, Xuepeng Yuan, Junyan Ma, Shanshan Hu, Bin Xue, Xiaoping Liao, 2020
- [26] Enhancing high-temperature oxidation resistance of Ti6Al4V alloy by simple surface aluminization Xiaoyang Wang, Chun Li, Mingshen Li, Jian Ca, China, 2021
- [27] Sandvik Coromant Application Guide Titanium Ti6Al4V
- [28] Analysis of cutting responses of Sialon ceramic tools in high-speed milling of FGH96 superalloys, Weiwei Ming, Xianghui Huang, Min Ji, Jinyang Xu, Fan Zou, Ming Chen, 2021
- [29] <https://www.sialon.com/sialon-ceramics/>
- [30] Microstructure, mechanical and machining properties of LPS and SPS NbCcemented carbides for face-milling of grey cast iron, R.M. Genga, L.A. Cornish, M. Woydt, A. Janse van Vuuren, C. Polese, South Africa, 2018
- [31] Investigations on the Influence of the Cemented Carbide Grade on the Surface Integrity when End Milling DA 718, T. Bergsa, M. Hardta\*, D. Schraknepper, 2020
- [32] Cutting performance of solid ceramic end milling tools in machining hardened AISI H13 steel, Bing Wang, Zhanqiang Liu, China, 2016
- [33] Wear mechanisms and performance of abrasively ground polycrystalline diamond tools of different diamond grains in machining titanium alloy, Guangxian Li, Shuang Yi, Shoujin Sun, Songlin Din, 2017
- [34] Performance and wear mechanisms of PCD and pcBN cutting tools during machining titanium alloy Ti6Al4V, Rebecka Lindvall, Filip Lenrick, Henrik Persson, Rachid M'Saoub, iJan-Eric Ståhl, Volodymyr rBushlya, 2020
- [35] <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>
- [36] Investigation on the performance of AlCrN and AlTiN coated cemented carbide inserts during end milling of maraging steel under dry, wet and cryogenic environments, Vinay Varghese, Akhil K., M. R. Ramesh, D. Chakradhar, 2019
- [37] Machinability performance of nickel alloy X-750 with SiAlON ceramic cutting tool under dry, MQL and hBN mixed nanofluid-MQL, Senol Sirin, Murat Sarıkaya, Çağrı Vakkas Yıldırım, Turgay Kivak, Turkey, 2021
- [38] Investigations on the effect of Machining parameters on Machining force and roughness in Micro-Milling of Titanium Gr5 and Gr12 alloys under dry Machining conditions using carbide tool, M.S. Kishore Kumar, B. Gurudatt, H.N. Reddappa, R. Suresh, India, 2021
- [39] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-metals-are-non-ferrous>
- [40] <https://www.triumphtool.com/metal-working-tools-blog/the-advantages-of-polycrystalline-diamond-pcd-tools/>
- [41] <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/metals-what-are-metals/steels-properties-of-steels/high-speed-steel-hss/>
- [42] <https://www.materialstoday.com/hardmetals-and-ceramics/news/ceramic-insert-improves-cast-iron-milling/>
- [43] <https://matmatch.com/learn/material/carbon-steel>
- [44] <https://www.indiamart.com/proddetail/extra-long-end-mill-cutters-8730837712.html>
- [45] <https://www.sialon.com/product/sialon-ceramic-cutting-tools/>

- [46] <https://matmatch.com/learn/material/inconel-718>
- [47] <https://www.energyregister.gr/perivallon/anakyklosi/>
- [48] Effects of hybrid nanofluids on machining performance in MQL-milling of Inconel X-750 superalloy, Senol Sirin, Turgay Kivak, Turkey, 2021