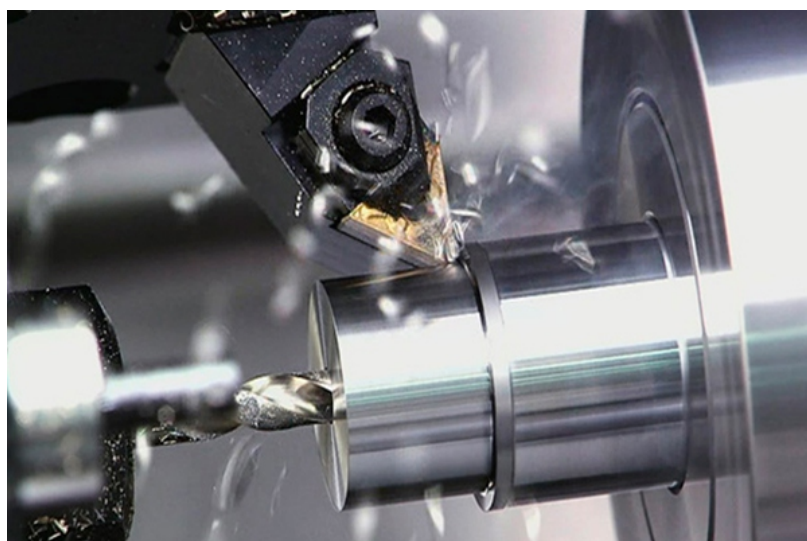




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόρνευση



**ΜΠΙΚΑΚΗΣ
ΜΙΧΑΗΛ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστώ πρώτα από όλα την οικογένεια μου για την αρωγή και την στήριξη της κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Ευχαριστώ επίσης, τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Αριστομένη Αντωνιάδη για την κατανόηση και την βοήθεια του. Τέλος ευχαριστώ όλους τους φίλους που ήταν δίπλα μου αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
2. ΕΥΡΕΩΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΚΑΤΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ.....	8
2.1 Κατεργαζόμενα μεταλλικά υλικά	8
2.1.1 Κατηγοριοποίηση κατεργαζόμενων μεταλλικών υλικών κατά ISO 513	8
2.1.2 Χάλυβες ISO P.....	9
2.1.3 Ανοξείδωτοι χάλυβες ISO M.....	9
2.1.4 Χυτοσίδηροι ISO K.....	10
2.1.5 Μη σιδηρούχα μέταλλα ISO N.....	10
2.1.6 Υπέρ κράματα-τιτάνιο ISO S	10
2.1.7 Υπέρσκληρα υλικά ISO H.....	10
2.1.8 Περαιτέρω κατηγοριοποίηση κατεργαζόμενων μεταλλικών υλικών.....	10
2.1.9 Κατηγοριοποίηση cMC Sandvik Coromant.....	11
2.1.10 Κατηγοριοποίηση SMG Seco tools	11
2.1.11 Κατηγοριοποίηση Beyond Material Group Kennametal.....	12
2.2 Υλικά κοπτικών εργαλείων.....	13
2.2.1 Εισαγωγικά για τα κοπτικά	13
2.2.2 Εργαλειοχάλυβες-Ταχυχάλυβες (HSS).....	14
2.2.3 Κράματα κοβαλτίου (στελλίτες)	14
2.2.4 Τσιμεντοειδή καρβίδια (cemented carbides).....	14
2.2.5 Cermets	16
2.2.6 Κεραμικά (ceramic)	16
2.2.7 Polycrystalline cubic boron nitride (P)CBN.....	17
2.2.8 Polycrystalline diamond PCD	17
2.3 Είδη-Σχήματα-Φθορά κοπτικών εργαλείων.....	18
2.3.1 Γενικά για τα είδη των κοπτικών εργαλείων στην τόννευση.....	18
2.3.2 Η γεωμετρία των ένθετων κοπτικών πλακιδίων.....	18
2.3.2 Γωνία ελευθερίας κοπτικό πλακίδιο.....	19
2.3.3 Διαμόρφωση ροής αποβλήτου κοπτικών πλακιδίων και γρεζοθραύστες	19
2.3.4 Τυποποίηση κοπτικών πλακιδίων	20
2.3.5 Διάρκεια ζωής κοπτικών εργαλείων.....	20
2.3.6 Φθορά κοπτικών εργαλείων	21

3. Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ	24
3.1 Τόρνευση (Turning)	24
3.1.1 Σύνομη περιγραφή της τόρνευσης	24
3.1.2 Είδη τόρνευσης	24
3.1.3 Γεωμετρία της κόψης (κύριες γωνίες κοπής)	25
3.1.4 Κοπή στον τόρνο (γωνίες)	26
3.1.5 Συνθήκες κοπής- Μεγέθη	28
3.1.6 Δυνάμεις κοπής	28
3.2 Εξαρτήματα εργαλειομηχανής και στοιχεία με αντίκτυπο στην κατεργασιμότητα	30
3.2.1 Εργαλειομηχανή	30
3.2.2 Στελέχη (μανέλες)	30
3.2.3 Ψυκτικά υγρά	32
4. ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ	33
4.1 Γενικά κατεργασιμότητα υλικών ανά κατηγορία	33
4.1.1 Εισαγωγικά τις βέλτιστες συνθήκες κατεργασιμότητας	33
4.1.2 Κατεργασιμότητα χαλύβων (ISO P)	33
4.1.3 Κατεργασιμότητα ανοξείδωτων χαλύβων (ISO M)	33
4.1.4 Κατεργασιμότητα χυτοσιδήρων (ISO K)	34
4.1.5 Κατεργασιμότητα Μη σιδηρούχων μετάλλων (ISO N)	34
4.1.6 Κατεργασιμότητα Υπέρ-κραμάτων και Τιτανίου (ISO S)	34
4.1.7 Κατεργασιμότητα Υπέρσκληρων υλικών (ISO H)	34
4.2 Κατεργασιμότητα επιμέρους υλικών	36
4.2.1 Χάλυβας - Απλός χάλυβας αποκοπής 11 SMn 30	36
4.2.2 Κραματοποιημένος χάλυβας 42 CrMo 4, 1.7225	37
4.2.3 Ανοξείδωτος χάλυβας - EN 1.4372 / AISI 201	40
4.2.4 Σκληρυμένος ανοξείδωτος χάλυβας 17-4 PH (1.4548)	41
4.2.3 Χυτοσίδηρος – Φαιός χυτοσίδηρος EN-GJL-250	44
4.2.3 Ανοπτημένος όλκιμος σίδηρος (ADI)	46
4.2.4 Μη σιδηρούχα μεταλλικά υλικά	49
4.2.5 Αλουμίνιο-Κράματα αλουμινίου	49
4.3.6 Κράμα αλουμινίου 7075 και MCC	49
4.2.7 Κράματα ορειχάλκου	53
4.2.8 Υπέρ κράματα ανθεκτικά στην υψηλή θερμοκρασία (HRSA)	55
4.2.9 HRSA- Κράμα Inconel 625	56
4.2.10 HRSA- Κράμα Incoloy 800	57
4.2.10 HRSA- Stellite ® alloy 6	59
4.2.11 Τιτάνιο-Κράματα τιτανίου	60

4.2.12 Κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V	61
4.2.13 Υπέρ σκληρά υλικά	62
4.3.13 Χάλυβας εδράνων κύλισης DIN 100Cr6	62
4.3 Δυνατότητες εργαλείων κοπής.....	65
4.3.1 Τσιμεντοειδή καρβίδια (Cemented Carbides)	65
4.3.2 Κεραμικά.....	66
4.3.3 Πολυκρυσταλλικά κυβικά βοριονιτρίδια (P)CBN	66
4.3.4 Πολυκρυσταλλικό διαμάντι PCD.....	67
4.4 Κατάλογοι εργαλείων.....	69
4.4.1 Seco Tools.....	69
4.4.2 Sandvik Coromant	69
4.4.2 Kennametal.....	70
5. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	72

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία θα γίνει ανάλυση της κατεργασιμότητας των ευρέως χρησιμοποιούμενων κατεργαζόμενων μεταλλικών υλικών περιλαμβάνοντας βέλτιστες συνθήκες ανά γεωμετρία και υλικό κοπτικών εργαλείων.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται αναγκαία μια σύντομη μελέτη του όρου κατεργασιμότητα (Machinability) των μεταλλικών υλικών. Ο όρος κατεργασιμότητα είναι ένας σύνθετος όρος που δεν αφορά μόνο την ευκολία που παρουσιάζει ένα υλικό στο να υποστεί κάποια κατεργασία. Για να ορισθεί η κατεργασιμότητα ενός μεταλλικού υλικού πρέπει να ορισθούν τρεις βασικοί παράγοντες. Η κατάταξη του υλικού βάση της μεταλλουργικής του σύστασης, η γεωμετρία της κοπής σε μικροκλίμακα και σε μακροκλίμακα, το κατάλληλο υλικό εργαλείου κοπής. Η κατεργασιμότητα λοιπόν δεν έχει έναν εμφανή ορισμό καθώς είναι ένας όρος πολυδιάστατος. Πιο συγκεκριμένα είναι λοιπόν ο όρος που εμπεριέχει τα στοιχεία εκείνα που θα συνδράμουν σε μία κατεργασία που χαρακτηρίζεται από συνεχόμενη και ανενόχλητη κοπή καθώς και μια «δίκαιη» διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου. Λόγο της φύσης του όρου ως «κατεργασία με καλύτερη κατεργασιμότητα» μπορεί να χαρακτηριστεί μια κατεργασία μόνο συγκρίνοντας την με μία παρόμοια. Κριτήρια ο χρόνος, το κόστος, η ποιότητα επιφανείας, η διάρκεια ζωής του κοπτικού κ.α.

Αναλυτικότερα, ξεκινώντας από πρώτο κομμάτι της εργασίας, σε αυτό θα γίνει καταγραφή των ευρέως χρησιμοποιούμενων κατεργαζόμενων μεταλλικών υλικών και υλικών κοπτικών εργαλείων. Όσον αφορά τα κατεργαζόμενα μεταλλικά υλικά θα χρησιμοποιηθούν οι ομαδοποιήσεις αυτών κατά ISO, χρήση των οποίων κάνουν και οι μεγαλύτερες εταιρίες του κλάδου της κατεργασίας μετάλλων δημιουργώντας βεβαίως και επιπλέον υποκατηγορίες. Οι ομαδοποιήσεις αυτές χωρίζουν τα υλικά βάση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν, αυτά αφορούν την χημική τους σύσταση την θερμική κατεργασία που έχουν υποστεί την σκληρότητα κ.α. Πιο συγκεκριμένα στις κατηγορίες των κατεργαζόμενων μεταλλικών υλικών έχουμε: ISO P χάλυβες, ISO M ανοξείδωτοι χάλυβες, ISO K χυτοσίδηρος, ISO N μη σιδηρούχα μέταλλα, ISO S υπέρ-κράματα, ISO H χάλυβες με σκλήρυνση. Για τα υλικά κοπτικών εργαλείων ανάλογα και την γκάμα εργαλείων που προσφέρουν οι εταιρίες τα ευρέως χρησιμοποιούμενα κοπτικά υλικά είναι: τα τιμμεντοειδή καρβίδια (Cemented carbides) που χωρίζονται σε αυτά με επικάλυψη (CVD,PVD) και σε αυτά χωρίς επικάλυψη, στα κεραμομέταλλα (Cermet), στα κεραμικά και τέλος στα πολυκρυσταλλικά που χωρίζονται σε αυτά με βάση το βοριονιτρίδιο (PCBN) και σε αυτά με βάση το διαμάντι (PCD). Τα πολυκρυσταλλικά μπορούν να βρεθούν με επικάλυψη ή χωρίς ανάλογα την γκάμα της εταιρείας παραγωγής τους.

Στο δεύτερο κομμάτι θα περιγραφεί η διαδικασία της τόννευσης με βάση τους μαθηματικούς τύπους της κοπής. Έπειτα θα πραγματοποιηθεί παρουσίαση των βασικών εξαρτημάτων των σύγχρονων εργαλειομηχανών τόννευσης. Ακόμα θα παρουσιαστεί ο λόγος που κρίνεται απαραίτητη η ανάλυση αυτών των εξαρτημάτων στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και έχει να κάνει με τον τρόπο με τον οποίο αυτά τα εξαρτήματα έχουν αντίκτυπο στην κατεργασιμότητα των υλικών. Τέλος θα παρουσιαστεί η γεωμετρική και μαθηματική ανάλυση της κοπής και των ιδιοτεροτήτων στην κοπή στον τόρνο.

Στο τρίτο κομμάτι θα βρίσκεται το κυρίως-ουσιαστικό θέμα της εργασίας. Συνδυάζοντας λοιπόν τα παραπάνω στοιχεία, τα κατεργαζόμενα υλικά, τα κοπτικά εργαλεία και τα στοιχεία των εργαλειομηχανών θα μελετηθούν και θα παρουσιαστούν οι βέλτιστες

συνθήκες κοπής για τα ζευγάρια υλικών για την κατεργασία της τόννευσης. Αυτά τα δεδομένα θα παρουσιαστούν με την βοήθεια πραγματικών δεδομένων που πηγάζουν από την διεθνή βιβλιογραφία και προέρχονται από πειραματικές εφαρμογές και έρευνες. Τα θα αναλυθούν με την βοήθεια γραφημάτων και πινάκων και θα σχολιαστούν τα κρίσιμα συμπεράσματα που κρίνονται σημαντικά για το περιεχόμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο τελευταίο κομμάτι γίνεται επισύναψη πινάκων με τους κωδικούς κοπτικών πλακιδίων διαθέσιμων αυτή την στιγμή από τις μεγαλύτερες εταιρίες του κλάδου.

2. ΕΥΡΕΩΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΚΑΤΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

2.1 Κατεργαζόμενα μεταλλικά υλικά

2.1.1 Κατηγοριοποίηση κατεργαζόμενων μεταλλικών υλικών κατά ISO 513

Σε αυτήν την πρώτη ενότητα του κεφαλαίου 2 θα αναλυθούν και θα παρουσιαστούν οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται τα κατεργαζόμενα μεταλλικά υλικά. Όπως επιγραμματικά αναφέρθηκε στην εισαγωγή τα μεταλλικά υλικά ομαδοποιούνται σε κατηγορίες κατά ISO βάση των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν. Οι κατηγορίες των τεμαχίων προς κατεργασία χρησιμοποιούνται για να καθορίσουμε το σωστό εργαλείο κοπής καθώς και για να θέσουμε τις αρχικές τιμές για τις συνθήκες κατεργασίας του εκάστοτε τεμαχίου. Τα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη για την κατηγοριοποίηση ISO έχουν να κάνουν με τις κυρίαρχες φυσικές ιδιότητες των κατεργαζόμενων μεταλλικών υλικών, την χημική σύσταση των μετάλλων, τα στοιχεία κραμάτωσης, την θερμική κατεργασία που έχουν υποστεί την σκληρότητα που εμφανίζουν. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε κατηγορία ISO χαρακτηρίζεται από ένα γράμμα και ένα χρώμα για ευκολότερη και γρηγορότερη αναγνώρισης του προς κατεργασία τεμαχίου στον χώρο εργασίας. Οι κατηγορίες λοιπόν είναι:

- ISO P: Η κατηγορία ISO P (μπλε) εμπεριέχει τους χάλυβες. Είναι η μεγαλύτερη κατηγορία κατεργαζόμενων υλικών και σε αυτήν ανήκουν υλικά που ξεκινούν από τους μη κραματοποιημένους χάλυβες και φτάνουν στους κραματοποιημένους χάλυβες συμπεριλαμβανομένων επίσης προϊόντων χύτευσης χάλυβα φερριτικών και μαρτενσιτικών ανοξείδωτων χαλύβων. Γενικά η κατηγορία υλικών ISO P χαρακτηρίζεται από καλή κατεργασιμότητα ανάλογα με την εκάστοτε σκληρότητα και περιεκτικότητα σε άνθρακα του κάθε χάλυβα.
- ISO M: Η κατηγορία ISO M (κίτρινο) εμπεριέχει τους ανοξείδωτους χάλυβες με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο το 12%. Επιπλέον άλλα κράματα πιθανόν να περιέχουν νικέλιο και μολυβδαίνιο, διαφορετικές συστάσεις και δομές, όπως φερριτική, μαρτενσιτική, ωστενιτική και ωστενιτική-φερριτική (διπλή), απαρτίζουν μια μεγάλη γκάμα δομών ανοξείδωτων χαλύβων. Κοινό στοιχείο που εμφανίζεται κατά την κατεργασία των υλικών της κατηγορίας ISO M είναι ότι οι ακμές κοπής των κοπτικών εργαλείων εκτίθενται σε μεγάλα ποσά θερμότητας και εμφανίζεται φθορά κόψης και ψευδόκοψη.
- ISO K: Η κατηγορία ISO K (κόκκινο) εμπεριέχει τον χυτοσίδηρο. Ο χυτοσίδηρος σε αντίθεση με τον χάλυβα είναι υλικό που κατά την κοπή παράγει μικρού μήκους απόβλητο. Όλοι οι χυτοσίδηροι περιέχουν καρβίδιο του πυριτίου (SiC) γεγονός που προκαλεί μεγάλη φθορά στην κοπτική ακμή λόγω της τραχύτητας που προσδίδει στο προς κατεργασία τεμάχιο. Οι γκρι χυτοσίδηροι (GCI) και οι ελατοί χυτοσίδηροι (MCI) είναι εύκολοι στην κατεργασία ενώ οι οζώδης χυτοσίδηροι (NCI) οι συμπαγής χυτοσίδηροι (CGI) και οι σφυρήλατοι χυτοσίδηροι (θερμική κατεργασία βαφής) (ADI) παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυσκολία.
- ISO N: Η κατηγορία ISO N (πράσινο) εμπεριέχει τα μη σιδηρούχα μέταλλα. Μαλακότερα μέταλλα όπως το αλουμίνιο ο χαλκός και ο ορείχαλκος. Το αλουμίνιο με περιεκτικότητα πυριτίου 13% είναι πολύ τραχύ και προκαλεί φθορά. Γενικά μεγάλες ταχύτητες κοπής και μεγάλη διάρκεια ζωής του κοπτικού αναμένετε για κοπτικά με οξείες ακμές.

- ISO S: Η κατηγορία ISO S (καφέ-πορτοκαλί) εμπεριέχει ανθεκτικά στην θερμοκρασία υπέρ κράματα όπως έντονα κραματοποιημένα μέταλλα με βάση τον σίδηρο, το νικέλιο, το κοβάλτιο και το τιτάνιο. Τα υλικά αυτά είναι κολλώδη και παρουσιάζουν μεγάλη τριβή κατά την κατεργασία πράγμα που παράγει θερμότητα. Έχουν ομοιότητες με τα υλικά του ISO M αλλά είναι αρκετά δυσκολότερα στην κοπή και επίσης μειώνουν την διάρκεια ζωής των ακμών του κοπτικού εργαλείου.
- ISO H: Η κατηγορία ISO H (γκρι) εμπεριέχει χάλυβες με αρκετά μεγάλη σκληρότητα. Ακόμα εμπεριέχει σκληρυμένους χυτοσιδήρους χύτευσης. Η σκληρότητα αυτών των υλικών τα καθιστά δύσκολα στο να κατεργαστούν. Παράγουν μεγάλα ποσά θερμότητας κατά την διάρκεια της κοπής και φθείρουν υπερβολικά την κοπτική ακμή.



Σχήμα 2.1: Ευρέως χρησιμοποιούμενα κατεργαζόμενα μεταλλικά υλικά ISO 513 (Πηγή: Sandvik Coromant)

2.1.2 Χάλυβες ISO P

Η κατηγορία ISO P (χάλυβες) είναι η μεγαλύτερη κατηγορία κατεργαζόμενων μεταλλικών κομματιών στην περιοχή της κοπής. Περιέχει από μη σκληρυμένους χάλυβες έως σκληρυμένους και ανοιτημένους με σκληρότητα έως 400HB. Ο χάλυβας είναι κράμα σιδήρου άνθρακα στο οποίο ο σίδηρος είναι το βασικό συστατικό. Ως μη κραματοποιημένοι χάλυβες χαρακτηρίζονται εκείνοι με περιεκτικότητα άνθρακα κάτω του 0.8% και αποτελούνται μόνο από σίδηρο χωρίς την παρουσία άλλων στοιχείων. Ως κραματοποιημένοι χάλυβες χαρακτηρίζονται οι χάλυβες που έχουν περιεκτικότητα άνθρακα μεγαλύτερη του 1.7% και περιέχουν στοιχεία κραμάτωσης όπως νικέλιο Ni, χρώμιο Cr, μολυβδαίνιο Mo βανάδιο V και βολφράμιο W. Επιπλέον χωρίζονται σε υψηλά κραματοποιημένοι και ελαφρώς κραματοποιημένοι όταν περιέχουν στοιχεία κραμάτωσης σε περιεκτικότητα μεγαλύτερη ή μικρότερη του 5% αντίστοιχα.

2.1.3 Ανοξείδωτοι χάλυβες ISO M

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες ISO M περιέχουν χρώμιο σε περιεκτικότητα μεγαλύτερη του 12% ενώ γενικά έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα της ($\leq 0.05\%$). Οι ανοξείδωτοι χάλυβες μπορούν να αποκτήσουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ανάλογα των διαφορετικών στοιχείων που μπορεί να περιέχουν. Αυτά μπορεί να είναι το νικέλιο, το χρώμιο, το μολυβδαίνιο, το νιόβιο και το τιτάνιο. Κάποια από τα χαρακτηριστικά είναι η αυξημένη αντοχή στην διάβρωση και στις υψηλές θερμοκρασίες.

2.1.4 Χυτοσίδηροι ISO K

Οι χυτοσίδηροι ISO K είναι μία σύνθεση σιδήρου-άνθρακα με σχετικά υψηλό ποσοστό πυριτίου (1-3%). Η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι άνω του 2%, που είναι και η μέγιστη διαλυτότητα του άνθρακα στην ωστενιτική φάση. Το χρώμιο, το μολυβδαίνιο και το βανάδιο σχηματίζουν καρβίδια, τα οποία αυξάνουν την αντοχή και τη σκληρότητα αλλά μειώνουν την κατεργασιμότητα. Οι 5 τύποι χυτοσίδηρου είναι:

- Φαιός χυτοσίδηρος (GCI)
- Ελαστικός χυτοσίδηρος (MCI)
- Οζώδης χυτοσίδηρος (NCI)
- Συμπαγής σίδηρος σφαιροειδούς γραφίτη (CGI)
- Όλκιμος σίδηρος, ανοπτημένος όλκιμος χυτοσίδηρος (ADI)

2.1.5 Μη σιδηρούχα μέταλλα ISO N

Τα μη σιδηρούχα μεταλλικά υλικά της κατηγορίας ISO N παρουσιάζουν σκληρότητα κάτω των 130 HB εκτός από χαλκούς υψηλής αντοχής (> 225 HB). Τα υλικά που συναντούμε σε αυτή την κατηγορία είναι:

- Κράματα αλουμινίου (Al) που περιέχουν λιγότερο από 12-13% πυρίτιο (Si) (αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της κατηγορίας)
- MMC (Metal Matrix Composite): Al + SiC (20-30%)
- Κράματα με βάση το μαγνήσιο Mg
- Χαλκός: ηλεκτρολυτικός χαλκός με 99.95% Cu
- Μπρούτζος: χαλκός με κασσίτερο (Sn) (10-14%) και/ή αλουμίνιο (3-10%)
- Ορείχαλκος: χαλκός (60-85%) με ψευδάργυρο (ψευδάργυρος) (40-15%)

2.1.6 Υπέρ κράματα-τιτάνιο ISO S

Τα υλικά της κατηγορίας ISO S μπορούν να χωριστούν σε υπέρ κράματα υψηλής θερμοκρασιακής αντοχής (HRSA) και στο τιτάνιο. Τα HRSA χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, αυτά που βασίζονται στο νικέλιο, αυτά που βασίζονται στον σίδηρο και σε αυτά που βασίζονται στο κοβάλτιο. Μπορούν να είναι προϊόντα ανόπτησης, θερμική σκλήρυνσης, έλασης, σφυρηλάτησης ή χύτευσης. Μεγαλύτερη κραμάτωση (ιδιαίτερα την περίπτωση του κοβαλτίου και όχι τόσο στην περίπτωση του νικελίου) έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη αντίσταση στην θερμοκρασία, μεγαλύτερη αντίσταση εφελκυσμού και υψηλότερη αντίσταση διάβρωσης.

2.1.7 Υπέρσκληρα υλικά ISO H

Στην κατηγορία μεταλλικών υλικών ISO H ανήκουν οι σκληρυμένοι χάλυβες με σκληρότητα > 45–68 HRC. Κοινοί χάλυβες αυτής της κατηγορίας είναι χάλυβες ενανθράκωσης (~ 60 HRC), χάλυβες που χρησιμοποιούνται στα ρουλεμάν (~ 60 HRC) και εργαλειοχάλυβες (~ 68 HRC). Οι σκληροί τύποι χυτοσίδηρου που περιλαμβάνουν λευκό χυτοσίδηρο (~ 50 HRC) και ADI/Kymenite (~ 40 HRC). Οι κατασκευαστικοί χάλυβες (40-45 HRC), ο χάλυβας με μαγγάνιο (Mn) και χάλυβες με διαφορετικούς τύπους σκληρών επικαλύψεων, δηλ. στελλίτες, P/M, τσιμεντοειδή καρβίδια ανήκουν επίσης σε αυτήν την ομάδα. Συνήθως, η τόνρευση σκληρών τεμαχίων εμπίπτει στο εύρος σκληρότητας 55-68 HRC.

2.1.8 Περαιτέρω κατηγοριοποίηση κατεργαζόμενων μεταλλικών υλικών

Η ομαδοποίηση των κατεργαζόμενων μεταλλικών υλικών στην 6 ομάδες κατά ISO αν και σαφής, στην πράξη δεν θα μπορούσε παρά μόνο να είναι μια αρχική κατηγοριοποίηση

αυτών, δεν προσδίδει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που χρειαζόμαστε. Για να προσδιορίσουμε την γεωμετρία, το υλικό του κοπτικού εργαλείου καθώς και τα σωστά στοιχεία κοπής χρειάζεται μια περαιτέρω ομαδοποίηση των προς κατεργασία υλικών.

Σε αυτό το σημείο οι εταιρίες του κλάδου παρουσιάζουν διαφορετικές κατηγοριοποιήσεις. Στην βάση τους η φιλοσοφία είναι η ίδια με μικρές διαφορές. Κάθε εταιρεία έχει καταβάλει προσπάθεια έτσι ώστε η κατηγοριοποίηση της να προσδίδει ως τον δυνατόν περισσότερη πληροφορία με τον απλούστερο τρόπο. Πιο συγκεκριμένα αυτές οι κατηγοριοποιήσεις χωρίζουν σε υποσύνολα τις κατηγορίες ISO 513, δίνοντας την δυνατότητα να προστεθεί πληροφορία που έχει να κάνει με ιδιαίτερες μεταλλουργικές κατεργασίες που έχει υποστεί ένα προς κατεργασία υλικό, όπως επίσης και τυχόν θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης.

Επίσης αυτές οι υποκατηγορίες καθιστούν δυνατή την προσαρμογή προτάσεων για την βέλτιστη κατεργασιμότητα για υλικά που προέρχονται από διαφορετικούς προμηθευτές που υπάγονται σε διαφορετικά διεθνή στάνταρντ και διαφορετικές αγορές. Βάση αυτών των υποκατηγοριών γίνεται δυνατή η εύρεση των συνθηκών εκείνων που θα είναι ιδανικές για το υλικό που θέλουμε να κατεργαστούμε. Στην περίπτωση που και αυτές οι υποκατηγορίες δεν είναι αρκετές για τον ακριβή προσδιορισμό των ιδανικών δεδομένων κοπής, παρέχονται πίνακες με τους οποίους γίνεται η κατάλληλη διόρθωση για την επίτευξη των ιδανικών συνθηκών.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα γίνει μελέτη βάση των υποκατηγοριών και των στάνταρντ που προσφέρουν οι εταιρίες Sandvik Coromant Seco Tools και Kennametal. Η υποκατηγοριοποίηση της Sandvik Coromant ονομάζεται «CMC (Coromant Material Classification)», της Seco Tools ονομάζεται SMG ενώ της Kennametal, Beyond Material Group.

2.1.9 Κατηγοριοποίηση cMC Sandvik Coromant

Η δομή του MC κωδικού είναι τέτοια ώστε να προσδίδει μια ευρεία ποικιλία υλικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών με την χρήση αριθμών και γραμμάτων. Η κατηγοριοποίηση της Sandvik Coromant χαρακτηρίζει το προς κατεργασία υλικό που διαθέτουμε. Παραδείγματα χάρη το προς κατεργασία υλικό με MC κωδικό K1.2.C.NS για τις θέσεις του κωδικού MC δίνει:

- Πρώτη θέση: K δείχνει ότι πρόκειται για υλικό ISO K (χυτοσίδηρος)
- Δεύτερη θέση: 1 δείχνει ότι πρόκειται για υλικό κατηγορίας 1 που εδώ αντιστοιχεί σε όλκιμο χυτοσίδηρο.
- Τρίτη θέση: 2 δείχνει ότι πρόκειται για υψηλά όλκιμο χυτοσίδηρο.
- Τέταρτη θέση: C δείχνει την μηχανική κατεργασία από την οποία προέρχεται. Εδώ C (CAST) χύτευση.
- Πέμπτη θέση: NS δείχνει την θερμική κατεργασία που έχει υποστεί. Εδώ NS (NOT SPECIFIED).

2.1.10 Κατηγοριοποίηση SMG Seco tools

Η βάση του SMG είναι μία κατηγοριοποίηση των προς κατεργασία τεμαχίων βασισμένη στον τύπο τους και την σχετική κατεργασιμότητα και ως εκ τούτου περιέχει και σύνθετα υλικά. Είναι περιεκτική και ταυτόχρονα καθιστά εύκολη την κατάταξη του εκάστοτε υλικού στην σωστή κατηγορία SMG. Το κάθε SMG στάνταρντ υλικό έχει προκαθορισμένα στοιχεία ως σημεία αναφοράς για κάθε συνθήκη κατεργασίας έτσι ώστε να επιτρέπει την προσαρμογή των δεδομένων κοπής στο πραγματικό υλικό που θέλουμε να αντιστοιχίσουμε στα SMG υλικά αναφοράς.

2.1.11 Κατηγοριοποίηση Beyond Material Group Kennametal

Η Kennametal με την σειρά της παρέχει για κάθε ISO 513 κατηγορία υλικού κατεργαζόμενου τεμαχίου επιπλέον υποκατηγορίες με σκοπό την καλύτερη προσαρμογή των δεδομένων της κοπής και βέλτιστη επιλογή κοπτικού πλακιδίου.

- ISO P 1-6 υποκατηγορίες
- ISO M 1-3 υποκατηγορίες
- ISO K 1-3 υποκατηγορίες
- ISO N 1-8 υποκατηγορίες
- ISO S 1-4 υποκατηγορίες
- ISO H 1 υποκατηγορία

2.2 Υλικά κοπτικών εργαλείων

2.2.1 Εισαγωγικά για τα κοπτικά

Είναι προφανές ότι για την επίτευξη οποιασδήποτε επιτυχημένης κατεργασίας κοπής μετάλλου (στην προκειμένη περίπτωση τórνευση) η επιλογή του υλικού κοπτικού εργαλείου είναι το πρώτο και πιο σημαντικό βήμα. Ταυτόχρονα με την επιλογή του υλικού του κοπτικού πρέπει να επιλεγεί το σχήμα και ο τύπος του.

Για να είναι η επιλογή του κοπτικού εργαλείου ορθά, πρέπει να γνωρίζουμε τις βασικές δυνατότητες των κοπτικών εργαλείων, το προς κατεργασία τεμάχιο (υλικό, το μέγεθος και το σχήμα του), τις συνθήκες στις οποίες θα γίνει η κατεργασία (πχ παρουσία ή όχι ψυκτικού) και την επιθυμητή τελική ποιότητα της επιφάνειας κατεργασίας.

Για την κάλυψη όλων των αναγκών που δημιουργούνται από την ύπαρξη αυτής της πληθώρας διαφορετικών παραγόντων που επηρεάζουν την κοπή (τόρνευση) υπάρχουν διάφοροι τύποι κοπτικών. Τα κοπτικά ανάλογα τον τύπο τους παρουσιάζουν διαφορετικούς συνδυασμούς σκληρότητας και αντοχής σε φθορά και χωρίζονται σε κατηγορίες και βαθμίδες με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Γενικά ένα κοπτικό εργαλείο που μπορεί να χαρακτηριστεί ως αποτελεσματικό για μια κατεργασία πρέπει να έχει:

- Μηχανική αντοχή ώστε να αντιστέκεται σε φθορά, παραμόρφωση και θραύση
- Σκληρότητα εν θερμώ
- Μη αντιδραστικό με το υλικό του τεμαχίου
- Χημικά σταθερό, ανθεκτικό στην οξείδωση και διάχυση
- Αντίσταση σε απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές

Εκτός αυτών το κοπτικό εργαλείο πρέπει να είναι οικονομικά συμφέρον για την εργασία που επιθυμούμε να πραγματοποιήσουμε. Οπότε η διάρκεια ζωής και το κόστος στην πραγματικότητα είναι δυο πολύ σημαντικοί παράγοντες.

Υπάρχουν κοπτικά εργαλεία διαφορετικών υλικών, με ενισχυτικές επικαλύψεις ή χωρίς. Επιπλέον, προσφέρονται σε διάφορα σχήματα και μεγέθη για να εξυπηρετούν την εκάστοτε διεργασία. Κάποια εξ αυτών είναι σχεδιασμένα για κατεργασίες με χρήση ψυκτικού υγρού και άλλα με ειδικές διαμορφώσεις ροής αποβλήτου (γρεζοθραύστες). Τα κοπτικά εργαλεία μπορούν να είναι τμήματα μετάλλου (τροχισμένα κατάλληλα) ή και ένθετα πλακίδια. Τα υλικά των κοπτικών εργαλείων χωρίζονται στα σιδηρούχα και στα μη σιδηρούχα. Στα σιδηρούχα υπάγονται:

- Εργαλειοχάλυβες-Ταχυχάλυβες (HSS)
- Κράματα κοβαλτίου (στελλίτες)

Στα μη σιδηρούχα υπάγονται:

- Cemented carbides (Τσιμεντοειδές καρβίδιο): Υπάρχουν με επικάλυψη (coated cemented carbide) ή χωρίς (uncoated cemented carbide). Όσον αφορά τα επικαλυμμένα αυτά χωρίζονται σε αυτά με επικάλυψη μορφής CVD και PVD ανάλογα με την τρόπο δημιουργίας της.
- Cermet (κεραμομέταλλο): είναι καρβίδιο με τιτάνιο.
- Ceramic (κεραμικά)
- Polycrystalline cubic boron nitride (P)CBN (Πολυκρυσταλλικό κυβικό βοριονιτρίδιο)
- Polycrystalline diamond PCD (Πολυκρυσταλλικό διαμάντι)

2.2.2 Εργαλειοχάλυβες-Ταχυχάλυβες (HSS)



Σχήμα 2.2: Ταχυχάλυβες (HSS)
(Πηγή:Linkun Metal Supermarkets)

ταχύτητες και βάθη κοπής. Επομένως χαρακτηρίζονται από μικρή παραγωγικότητα και τελικά υψηλό κόστος. Οι κεκραμμένοι εργαλειοχάλυβες έχουν στην σύνθεσή τους μέταλλα σε διάφορες περιεκτικότητες, όπως το χρώμιο Cr, το μαγγάνιο Mn, το βολφράμιο W, το μολυβδαίνιο Mo, το νικέλιο Ni, και το πυρίτιο Si. Τα μέταλλα αυτά βελτιώνουν τις ιδιότητες των χάλυβων ανάλογα με την σύνθεση και την περιεκτικότητά τους.

Οι ταχυχάλυβες (High Speed Steels) περιέχουν στην βασική τους σύνθεση βολφράμιο W, χρώμιο Cr, και βανάδιο V. Για καλύτερη ποιότητα περιέχουν κοβάλτιο Co και μολυβδαίνιο Mo. Παρουσιάζουν μεγάλη σκληρότητα και μηχανική αντοχή σε χρήση σε θερμοκρασίες έως και τους 600°C, αντοχή στην φθορά και ικανοποιητική αντοχή σε κρουστικά φορτία. Για τα χαρακτηριστικά τους το κόστος τους είναι χαμηλό.

2.2.3 Κράματα κοβαλτίου (στελλίτες)



Σχήμα 2.3: Στελλίτες
(Πηγή:Matmatch)

ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε σχετικά υψηλότερες ταχύτητες από τους ταχυχάλυβες.

Οι εργαλειοχάλυβες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στους ανθρακούχους και στους κεκραμμένους. Οι ανθρακούχοι εργαλειοχάλυβες είναι χάλυβες με περιεκτικότητα άνθρακα που κυμαίνεται από 0.6-1.5%. Έχουν χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά και η περιεκτικότητά τους σε άνθρακα καθορίζει και τις ιδιότητές τους. Μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άνθρακα τους προσδίδει μεγαλύτερη αντοχή αλλά ταυτόχρονα γίνονται πιο εύθραυστοι σε κρούσεις. Δεν έχουν σκληρότητα εν θερμώ και για αυτό τον λόγο οι κατεργασίες σε ανθρακούχους ταχυχάλυβες δεν μπορεί να έχει μεγάλες

Τα κράματα κοβαλτίου σήμερα έχουν περιορισμένη χρήση λόγω της χρήσης των κεραμικών και των σκληρομετάλλων. Τα κράματα αυτά έχουν ως βασικό συστατικό το κοβάλτιο (Co) με περιεκτικότητα περίπου 40-55% και περιέχουν χρώμιο (Cr) 30% και βολφράμιο (W) 10-20%. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου χρειάζεται αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα σκληρότερα εξ αυτών με τιμές σκληρότητας ανάμεσα στα 58HRC και τα 64HRC, είναι κατάλληλα για κοπτικά εργαλεία συνεχής κοπής. Έχουν καλή αντοχή στην φθορά

2.2.4 Τσιμεντοειδή καρβίδια (cemented carbides)

Τα κοπτικά τσιμεντοειδή καρβίδια είναι κονιομεταλλουργικό υλικό, σύνθεση σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου (WC) και συγκολλητικού υλικού πλούσιο σε μεταλλικό κοβάλτιο (Co). Τα τσιμεντοειδή καρβίδια όταν χρησιμοποιούνται ως κοπτικά εργαλεία αποτελούνται από περισσότερο του 80% καρβίδιο του βολφραμίου σκληρής φάσης. Άλλα σημαντικά πρόσθετα συστατικά είναι τα κυβικά καρβονιτρίδια. Για την παραγωγή τους τα τσιμεντοειδή καρβίδια σχηματίζονται με συμπίεση των κόκκων ή με την έγχυση σε καλούπι και μετέπειτα σύντηξη.



Σχήμα 2.4: Τσιμεντοειδές καρβίδιο χωρίς επικάλυψη H10 (Πηγή:Sandvik Coromant)

κατά την φθορά της.

Τα κοπτικά τσιμεντοειδή καρβίδια χωρίς επικάλυψη (Uncoated cemented carbide) εκπροσωπούν μόνο μία μικρή μερίδα των επιλογών σε ότι αφορά τα κοπτικά υλικά. Αυτά τα κοπτικά είναι είτε απλά καρβίδια βολφραμίου με κοβάλτιο (WC/Co) ή περιέχουν μεγάλη περιεκτικότητα από κυβικά καρβονιτρίδια. Τυπικές χρήσεις τους είναι η κατεργασία ανθεκτικών στην θερμοκρασία υπέρ κραμάτων (HRSA), κραμάτων

τιτανίου και σκληρυμένων υλικών σε χαμηλές ταχύτητες. Η φθορά έρχεται άμεσα λόγω της έλλειψης προστατευτικής επικάλυψης αλλά συμβαίνει ελεγχόμενα, ενώ η κοπτική τους ακμή αυτοτροχίζεται

Τα κοπτικά τσιμεντοειδή καρβίδια με επικάλυψη (Coated cemented carbide) αποτελούν σήμερα το 80-90% όλων των κοπτικών σε χρήση. Αυτή η ευρεία απήχηση οφείλεται στον μοναδικό συνδυασμό αντοχής στην φθορά σκληρότητας και δυνατότητας να κατασκευαστούν σε πολύπλοκα σχήματα. Τα τσιμεντοειδή καρβίδια με επικάλυψη είναι ιδανική επιλογή για πολλές κατεργασίες διότι με την παρουσία της κατάλληλης επικάλυψης είναι ικανά να ανταπεξέλθουν σε πληθώρα διαφορετικών εργασιών τόννευσης. Η επικάλυψη τους μπορεί να είναι τύπου CVD ή τύπου PVD.

Αυτά με επικάλυψη τύπου CVD, Chemical Vapor Deposition, (Χημικής εναπόθεσης ατμού) παράγονται με χημικές αντιδράσεις σε θερμοκρασίας 700–1.050°C. Οι επικαλύψεις τύπου CVD προσδίδουν υψηλή αντοχή φθοράς και έχουν εξαιρετική συνοχή με τα τσιμεντοειδές καρβίδιο. Κατατάσσονται ως η πρώτη επιλογή σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών στο οποίο η αντίσταση σε φθορά είναι το ζητούμενο. Τέτοιες εφαρμογές υπάρχουν στην γενική τόννευση αλλά και στο boring χαλύβων όπου η αντίσταση σε φθορά κρατήρα που προσδίδει το πάχος επικάλυψης τύπου CVD είναι ζητούμενο (~10μm). Επιπλέον μαζική είναι η χρήση τους στην τόννευση ανοξείδωτου χάλυβα.



Σχήμα 2.5: Τσιμεντοειδές καρβίδιο με επικάλυψη CVD, GC2220 (Πηγή:Sandvik Coromant)



Σχήμα 2.6: Τσιμεντοειδές καρβίδιο με επικάλυψη PVD, GC2035 (Πηγή:Sandvik Coromant)

Αυτά με επικάλυψη τύπου PVD, Physical Vapor Deposition, (Φυσικής εναπόθεσης ατμού) παράγονται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (400–600°C). Η διαδικασία εμπεριέχει την ατμοποίηση μετάλλων που αντιδρούν με το υδρογόνο, για παράδειγμα για να δημιουργήσουν μία σκληρή νιτρική επικάλυψη. Οι επικαλύψεις τύπου PVD προσδίδουν υψηλή αντοχή φθοράς λόγω της σκληρότητας τους και λόγω των περιεχόμενων παραμενουσών θλιπτικών τους τάσεων προσθέτουν ανθεκτικότητα στις ακμές και αντίσταση στην δημιουργία ακτινικών ρωγμών. Συνιστώνται για τις ανθεκτικές αλλά κοφτερές ακμές τους καθώς και για τις εφαρμογές φινιρίσματος.

2.2.5 Cermets

Τα κοπτικά κεραμομέταλλα Cermet είναι καρβίδια που περιέχουν σκληρυντικά με βάση το τιτάνιο. Το όνομα τους "Cermet" είναι συνδυασμός των λέξεων ceramic και metal. Αρχικά τα Cermet ήταν σύνθεση καρβιδίου του τιτανίου (TiC) και νικελίου(Ni). Τα μοντέρνα Cermet δεν εμπεριέχουν νικέλιο (Ni) και έχουν κύρια δομή από καρβονιτρίδιο του τιτανίου (Ti(C,N)), μία δεύτερη από κράμα καρβονιτρίδιου του τιτανίου που εμπεριέχει νιόβιο, κοβάλτιο (Ti,Nb,W)(C,N)), και συγκολλητικό από βολφράμιο (W). Το Ti(C,N) της πρώτης



δομής προσδίδει αντοχή στην φθορά, ενώ η δεύτερη δομή αυξάνει την αντοχή στις πλαστικές παραμορφώσεις. Ακόμα, η ποσότητα κοβαλτίου ρυθμίζει την γενική ανθεκτικότητα που παρουσιάζουν.

Σχήμα 2.7: Cermet
(Πηγή:Sandvik
Coromant)

Σε σχέση με τα απλά τσιμεντοειδή καρβίδια τα cermet έχουν βελτιωμένη αντοχή σε φθορά αλλά μικρότερη ανθεκτικότητα και αντοχή σε απότομες θερμοκρασιακές αλλαγές. Τα cermet μπορούν να βρεθούν και με επικάλυψη τύπου PVD για ακόμα καλύτερη αντοχή σε φθορά. Η ικανότητα τους να αυτοτροχίζονται ακόμα και μετά από μακροχρόνια χρήση κρατά τις δυνάμεις κοπής χαμηλά. Σε εφαρμογές φινιρίσματος αυτό τους το χαρακτηριστικό, τους προσδίδει μεγάλη διάρκεια ζωής και τα κάνει ικανά να δώσουν γυαλιστερές επιφάνειες με πολύ καλές ανοχές. Τυπικές τους εφαρμογές είναι στο φινίρισμα ανοξείδωτου χάλυβα, NCI χυτοσιδήρου, χαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα και φερριτικών χαλύβων.

2.2.6 Κεραμικά (ceramic)



Σχήμα 2.8: Κεραμικό
(Πηγή: Sandvik
Coromant)

Τα κεραμικά κοπτικά υλικά έχουν εξαιρετικές αντοχές στην φθορά σε υψηλές ταχύτητες κοπής. Τα κεραμικά κοπτικά χωρίζονται σε κατηγορίες και είναι ιδανικά για μια ποικιλία κατεργασιών. Οι κατηγορίες είναι:

Oxide ceramics: είναι οξειδία με βάση το αλουμίνιο με πρόσθετο ζirkόνιο για αντίσταση στη θραύση. Είναι υλικό πολύ

ευσταθές χημικά αλλά παρουσιάζει ελλιπή αντίσταση σε ραγδαίες θερμοκρασιακές αλλαγές.

Mixed ceramics: είναι κεραμικά με ενίσχυση από σωματίδια κυβικών καρβιδίων και καρβονιτρίδιων (TiC, Ti(C,N)), για ανθεκτικότητα και θερμική αγωγιμότητα.

Whisker-reinforced ceramics: χρησιμοποιούν ίνες από καρβίδιο πυριτίου (SiCw) για να αυξήσουν δραματικά την ανθεκτικότητα και έτσι να επιτρέψουν την χρήση ψυκτικού. Ιδανικά για κατεργασία κραμάτων με βάση το νικέλιο.

Silicon nitride ceramics (Si3N4): αντιπροσωπεύουν ένα ακόμη γκρουπ κεραμικών υλικών. Οι επιμηκυμένοι κρύσταλλοι τους σχηματίζουν ένα ενισχυμένο υλικό λόγω σύστασης με μεγάλη ανθεκτικότητα. Τα κεραμικά με νιτρίδιο του πυριτίου είναι ιδανικά για την κατεργασία γκρι-χυτοσιδήρου αλλά λόγω της χημικής τους αστάθειας έχουν περιορισμένη χρήση σε άλλα τεμάχια.

Sialon (SiAlON): τα κοπτικά Sialon συνδυάζουν αντοχή από ενισχυμένη δομή νιτριδίου πυριτίου με αυξημένη χημική σταθερότητα. Τα κοπτικά αυτά είναι ιδανικά για κατεργασία υπέρ κραμάτων (HRSA).

Γενικά οι εφαρμογές των κεραμικών κοπτικών είναι ποικίλες. Ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται σε τόννευση με υψηλές στροφές. Οι διαφορετικές κατηγορίες κεραμικών κοπτικών με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους είναι ικανές να δώσουν υψηλή παραγωγικότητα όταν χρησιμοποιηθούν σωστά. Ως αδύναμα σημεία των κεραμικών υλικών έχουμε την αντίσταση σε θερμοκρασιακά σοκ και την ευθραυστότητα που τα χαρακτηρίζει.



Σχήμα 2.9: Κοπτικό CBN (Πηγή: Sandvik Coromant)

2.2.7 Polycrystalline cubic boron nitride (P)CBN

Τα (P)CBN κοπτικά υλικά είναι υλικά που χαρακτηρίζονται από εξαιρετική θερμή σκληρότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κατεργασίες κοπής πολύ υψηλών ταχυτήτων. Επίσης παρουσιάζουν καλή ανθεκτικότητα και αντίσταση στα θερμικά σοκ. Τα σύγχρονα CBN κοπτικά είναι σύνθεση με κεραμικά υλικά και περιεκτικότητα CBN μεταξύ 40-65%. Η κεραμική ουσία συγκόλλησης προσθέτει αντοχές στο CBN, που χωρίς αυτή είναι ευάλωτο στην χημική φθορά. Μία άλλη ομάδα κοπτικών CBN περιέχει κοπτικά με ποσοστό CBN που ξεπερνάει το

85% και φτάνει σχεδόν το 100%. Αυτό γίνεται εφικτό με την προσθήκη μικρής ποσότητας μεταλλικής συγκολλητικής ουσίας. Τα κοπτικά CBN εναποθέτονται σε βάση από τσιμεντοειδές καρβίδιο (cemented carbide).

2.2.8 Polycrystalline diamond PCD

Τα κοπτικά PCD είναι μια σύνθεση σωματιδίων διαμαντιού συντηγμένα με συγκολλητικό από μέταλλο. Το διαμάντι είναι το σκληρότερο γνωστό υλικό και για αυτό έχει και την μεγαλύτερη αντοχή σε τριβή από όλα τα υλικά. Ως κοπτικό υλικό το PCD έχει καλή αντοχή στην φθορά αλλά έλλειψη χημικής σταθερότητας σε υψηλές θερμοκρασίες και επιπλέον διαλύεται εύκολα στον σίδηρο.



Σχήμα 2.10: Κοπτικό PCD (Πηγή: Sandvik Coromant)

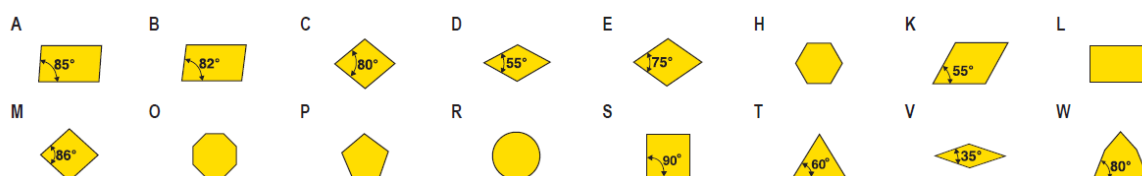
2.3 Είδη-Σχήματα-Φθορά κοπτικών εργαλείων

2.3.1 Γενικά για τα είδη των κοπτικών εργαλείων στην τόννευση

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι για τις διάφορες εφαρμογές στην τόννευση χρειάζονται εργαλεία κοπής ιδανικά για την κάθε περίπτωση. Εκτός από το υλικό του εργαλείου κοπής σημαντική είναι και η γεωμετρία και το μέγεθος του. Το σχήμα του κοπτικού καθώς και οι γωνίες της κοπτικής ακμής διαφέρουν έτσι ώστε να ικανοποιούν τις ανάγκες της κάθε κατεργασίας. Τα κοπτικά εργαλεία μπορούν να αποτελούν ένα ενιαίο σώμα (συμπαγή κοπτικά εργαλεία) με το στέλεχος συγκράτησης τους στις εργαλειομηχανές. Εκτός από αυτή την επιλογή χρησιμοποιούνται κοπτικά εργαλεία στην μορφή πλακιδίων ή πολύ μικρά κοπτικά, τα οποία προσαρμόζονται σε ειδικά τυποποιημένα στελέχη (μανέλες) συνήθως φτιαγμένες από μαλακό χάλυβα για να απορροφούν όσο το δυνατόν περισσότερες δονήσεις. Όσον αφορά τα κοπτικά πλακίδια τόννευσης, αυτά έχουν συγκεκριμένη γεωμετρία και χαρακτηριστικά (όπως προβλέπεται κατά ISO 1832). Τα χαρακτηριστικά της κάθε γεωμετρίας προσαρμόζονται στην εκάστοτε κατεργασία για επίτευξη της επιθυμητής κατεργασιμότητας και παραγωγικότητας. Ένα εκ των πλέον σημαντικότερων χαρακτηριστικών των εργαλείων κοπής είναι η γωνία ελευθερίας, με βάση της γωνίας ελευθερίας ένα κοπτικό πλακίδιο μπορεί να χαρακτηριστεί ως θετικό ή αρνητικό.

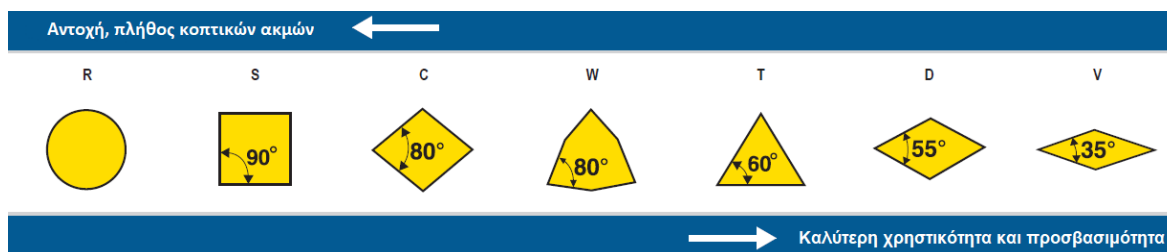
2.3.2 Η γεωμετρία των ένθετων κοπτικών πλακιδίων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα κοπτικά πλακίδια διατίθενται σε διάφορα σχήματα για να ικανοποιούν τις ανάγκες την εκάστοτε κατεργασίας καθώς και για να προσφέρουν χρηστικότητα και προσαρμοστικότητα σε διάφορες χρήσεις. Τα σχήματα είναι:



Σχήμα 2.11: Σχήματα ένθετων κοπτικών πλακιδίων (Πηγή: Seco Tools)

Γενικά σχήματα κοπτικών με λιγότερες γωνίες ή και γωνίες κοπτικής ακμής μεγαλύτερης κλίσης δίνουν κοπτικά με μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Αντιθέτως κοπτικά σε σχήμα με περισσότερες γωνίες ή και γωνίες κοπτικής ακμής μικρότερης κλίσης δίνουν κοπτικά με καλύτερη χρηστικότητα και προσβασιμότητα στο τεμάχιο προς κατεργασία.



Σχήμα 2.12: Αντοχή και προσβασιμότητα ανάλογα με τις κοπτικές ακμές των πλακιδίων (Πηγή: Seco Tools)

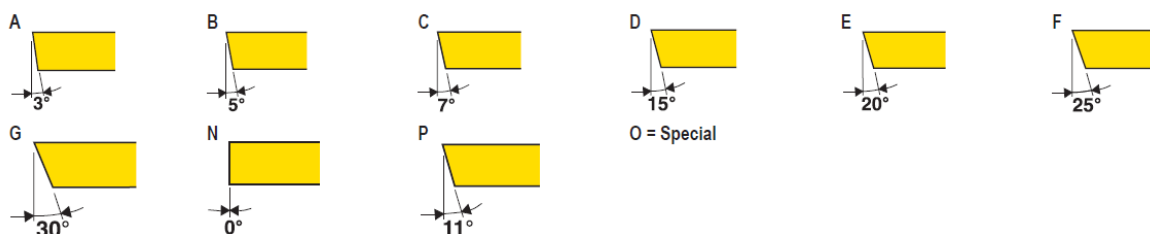
Όταν έχει γίνει η επιλογή ενός σχήματος κοπτικού πλακιδίου απομένει η επιλογή του μεγέθους του. Το μέγεθος είναι σημαντικό καθώς είναι και αυτό που θα καθορίσει και το μέγιστο βάθος κοπής που μπορούμε να έχουμε με το εκάστοτε εργαλείο. Μεγαλύτερο

μέγεθος συνεπάγεται μεγαλύτερο μέγιστο βάθος κοπής θυσιάζοντας όμως σε ότι έχει να κάνει με την προσβασιμότητα σε ορισμένα ιδιαίτερα σημεία του τεμαχίου όπως εσοχές ή γωνίες.

Τέλος, για να μπορέσουμε να έχουμε επιθυμητές συνθήκες κοπής όσον αφορά την πρακτική προσέγγιση του τεμαχίου (προσβασιμότητα στο τεμάχιο και χρηστικότητα των ακμών του κοπτικού), δεν αρκεί η επιλογή του σωστού ένθετου κοπτικού πλακιδίου. Σε μεγάλο βαθμό τα παραπάνω επιτυγχάνονται όταν το κατάλληλο πλακίδιο χρησιμοποιείται στο κατάλληλο για την κατεργασία στέλεχος (μανέλα). Για τα στελέχη, τα είδη και τις ονοματολογίες τους θα γίνει περιγραφή στο επόμενο κεφάλαιο.

2.3.2 Γωνία ελευθερίας κοπτικό πλακίδιο

Η γωνία ελευθερίας είναι ένα βασικό και αρχικό στοιχείο για την επιλογή του είδους του κοπτικού που θα χρησιμοποιήσουμε. Με βάση την γωνία ελευθερίας ένα κοπτικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως θετικό ή αρνητικό. Τα κοπτικά με γωνία ελευθερίας από 1° - 90° χαρακτηρίζονται ως θετικά (ονοματολογία κοπτικών πλακιδίων γράμμα C), ενώ τα κοπτικά με μηδενική γωνία ελευθερίας χαρακτηρίζονται ως αρνητικά (ονοματολογία κοπτικών πλακιδίων γράμμα N).



Σχήμα 2.13: Γωνίες ελευθερίας ένθετων κοπτικών πλακιδίων (Πηγή: Seco Tools)

Μερικά γενικά χαρακτηριστικά για αυτούς τους δύο τύπους:

Για τα θετικά:

- Έχουν κοπτικές ακμές μόνο στην μία τους επιφάνεια
- Συνήθως χρησιμοποιούνται για εφαρμογές με μικρότερες δυνάμεις κοπής
- Έχουν καλύτερη προσβασιμότητα στο τεμάχιο λόγω της γωνίας ελευθερίας
- Είναι η κύρια επιλογή για εσωτερική τόννευση και εξωτερική τόννευση στενότερων τεμαχίων

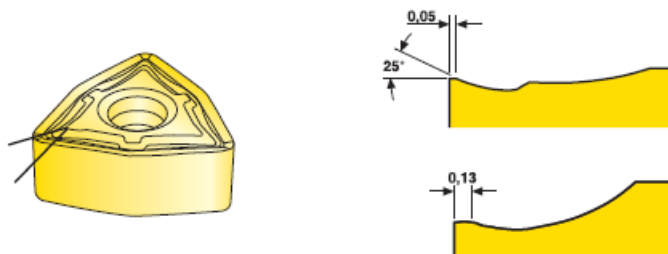
Για τα αρνητικά:

- Έχουν κοπτικές ακμές μόνο στην μία ή και στις δύο επιφάνειες τους
- Παρουσιάζουν υψηλή αντοχή κοπτικής ακμής
- Αρνητικό τους στοιχείο το ότι δεν έχουν την προσβασιμότητα που προσδίδεται από την γωνία ελευθερίας
- Κύρια επιλογή για γενικές εφαρμογές εξωτερικής τόννευσης
- Ιδανικά για εφαρμογές που παρουσιάζουν υψηλές δυνάμεις κοπής και δύσκολες συνθήκες

2.3.3 Διαμόρφωση ροής αποβλήτου κοπτικών πλακιδίων και γρεζοθραύστες

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των κοπτικών πλακιδίων είναι ο σχεδιασμός της επιφάνειας αποβλήτου ικανός ώστε να διαχειρίζεται με καλύτερο τρόπο την ροή του. Οι διαμορφώσεις αυτές για την ροή του αποβλήτου προβλέπονται κατά τον κανονισμό ISO 1832. Τα

κοπτικά με ιδική σχεδίαση επιφανείας γρεζοθραύστη είναι ικανά να προσδώσουν ομαλότερη κατεργασία. Κατά την σχεδίαση των γρεζοθραυστών έχει ληφθεί υπόψη η γεωμετρία των ακμών κοπής έτσι ώστε να μην περιορίζεται η χρησιμότητα και να μεγιστοποιείται η διαχείριση του αποβλήτου, η αντοχή και η ακεραιότητα της κοπτικής ακμής. Οι γρεζοθραύστες βρίσκονται τόσο σε θετικά όσο και σε αρνητικά κοπτικά εργαλεία.



Σχήμα 2.14: Σχεδίαση γρεζοθραύστη σε κοπτικό πλακίδιο (Πηγή: Seco Tools)

2.3.4 Τυποποίηση κοπτικών πλακιδίων

Η τυποποίηση κοπτικών πλακιδίων όπως αναφέρθηκε και παραπάνω γίνεται κατά ISO 1832, αποτελείται από 7 υποχρεωτικές θέσεις (πχ WNMG 06 04 08 _ M3) και 6 που περιέχουν επιπλέον μη υποχρεωτικές πληροφορίες. Με την κάθε θέση να έχει την ακόλουθη σημασία:

1. Σχήμα πλακιδίου
2. Γωνία ελευθερίας πλακιδίου
3. Ανοχές
4. Είδος τύπου συγκράτησης και ανοχές
5. Μήκος κοπτικής ακμής
6. Πάχος
7. Σχεδίαση γωνίας
8. Κατάσταση κοπτικής ακμής
9. Φορά κοπής
10. Κωδικός κατασκευαστή
11. Επιλογή κατασκευαστή
12. Κωδικός κατασκευαστή
13. Πλήθος κοπτικών ακμών

2.3.5 Διάρκεια ζωής κοπτικών εργαλείων

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία των κοπτικών εργαλείων είναι η διάρκεια ζωής τους. Η διάρκεια ζωής τους είναι επίσης ένα και από τα βασικά ζητήματα της παρούσας εργασίας διότι η επίτευξη της καλύτερης δυνατής κατεργασιμότητας προϋποθέτει την ύπαρξη μίας δίκαιης διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου.

Είναι δεδομένο ότι όλα τα κοπτικά εργαλεία έχουν περιορισμένο χρόνο ζωής. Με τον όρο χρόνο ζωής κοπτικού νοείται ο χρόνος που το εργαλείο παραμένει λειτουργικό, δηλαδή κόβει χωρίς να χρειαστεί να επανατροχιστεί ή να απορριφθεί και να αντικατασταθεί με κάποιο νέο. Για να κριθεί αν πρέπει να γίνει αντικατάσταση ή μη ενός κοπτικού εργαλείου επικαλούμαστε κάποια κριτήρια αστοχίας. Αυτά τα κριτήρια αστοχίας έχουν να κάνουν με την κατάσταση του κοπτικού (θραύση ή φθορά που έχει υποστεί) αλλά και με την

ποιότητα της κατεργασίας που είναι σε θέση να προσφέρει. Κάποια κριτήρια αστοχίας μπορεί να είναι:

- Η ανώτερη τιμή της τραχύτητας της κατεργαζόμενης επιφανείας
- Η επιτρεπόμενη ανοχή διαστάσεων στο κατεργασμένο τεμάχιο
- Το προκαθορισμένο μέγιστο ποσοστό αύξησης των δυνάμεων κοπής ή της ισχύος κοπής
- Η στόμωση του εργαλείου
- Η ανώτερη επιτρεπτή τιμή για το πλάτος ζώνης φθοράς ή για το βάθος κρατήρα ή και τα δύο μαζί

Όπως θα αναλυθούν και στην συνέχεια οι παράγοντες που επιδρούν σημαντικά στην ζωή του κοπτικού εργαλείου είναι:

- Οι συνθήκες κοπής (ταχύτητα κοπής, πρόωση και βάθος κοπής)
- Η γεωμετρία του εργαλείου
- Το υλικό εργαλείου
- Το κατεργαζόμενο υλικό
- Ο συνδυασμός υλικού εργαλείου κοπής και υλικού κατεργαζόμενου τεμαχίου
- Το ψυκτικό υγρό κοπής

Η βέλτιστη επιλογή των ανωτέρων παραγόντων οδηγεί σε καλύτερη κατεργασιμότητα με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου με αποτέλεσμα την οικονομικότερη κατεργασία.

2.3.6 Φθορά κοπτικών εργαλείων

Η κατανόηση και η ανάλυση των τύπων φθοράς των κοπτικών εργαλείων είναι διαδικασία ύψιστης σημασίας στην κοπή των μετάλλων. Λόγω του άμεσου αντίκτυπου στην κατεργασία (ποιότητα επιφανείας και κόστος) η φθορά του κοπτικού χρησιμοποιείται ως δείκτης της ποιότητας και τις κατεργασιμότητας που επιτεύχθηκε.

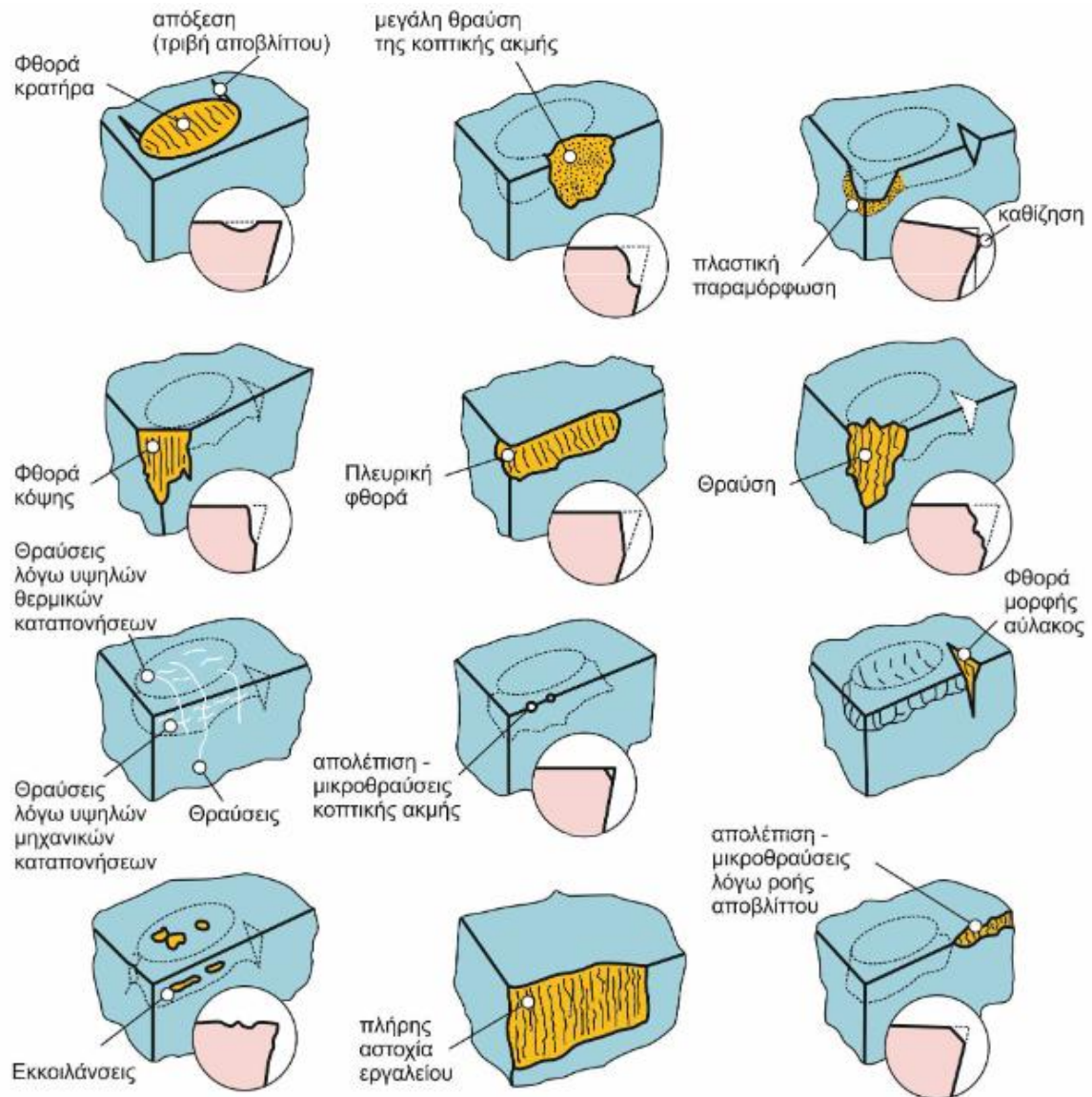
Κατά την κατεργασία κοπής το κοπτικό εργαλείο έρχεται σε επαφή με το κατεργαζόμενο τεμάχιο και λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης και της διεπιφανειακής τριβής μεταξύ του κοπτικού και του τεμαχίου δημιουργούνται υψηλές θερμοκρασίες και τάσεις. Αυτές έχουν ως συνέπεια την σταδιακή καταπόνηση και φθορά του εργαλείου κοπής έως την τελική του αστοχία που μπορεί να επέλθει ακόμα και με θραύση. Έτσι το εργαλείο πρέπει σε περίπτωση που το επιτρέπει το είδος του να επανατροχιστεί ή να απορριφθεί.

Η φθορά που προκύπτει στα κοπτικά μπορεί να αποδοθεί σε κάποιους μηχανισμούς βάση των οποίων σχηματίζεται. Οι κύριοι είναι:

- Σχηματισμός και λύση συγκολλητών δεσμών: Η συνεχής τριβές που παρουσιάζονται στην κατεργασία της κοπής (κοπτικό- τεμάχιο, κοπτικό-απόβλητο) έχουν ως αποτέλεσμα την συνεχή δημιουργία και καταστροφή δεσμών με αποτέλεσμα την αποκόλληση μικρών τεμαχίων από το εργαλείο.
- Απόξεση: Σκληρά τμήματα αποβλήτου τα οποία κινούνται πιεζόμενα διαρκώς στην επιφάνεια αποβλήτου του κοπτικού, το φθείρουν συνεχώς εκτελώντας κοπή σε μικρή κλίμακα.
- Διάχυση στερεάς κατάστασης: Άτομα από το υλικό κοπτικού εργαλείου διαχέονται λόγω των ευνοϊκών υψηλών θερμοκρασιών που υπάρχουν στην ζώνη κοπής στο τεμάχιο ή στο απόβλητο.

- Οξείδωση: Πιο σύνηθες στην δευτερεύουσα κόψη του κοπτικού εργαλείου και αφορά σκληρομέταλλα σε μεγάλες ταχύτητες κοπής και θερμοκρασίες.

Αυτοί οι μηχανισμοί ή ο συνδυασμός τους έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία φθορών. Η φθορά που αναπτύσσεται σε ένα εργαλείο μπορεί να παρουσιαστεί με τις παρακάτω μορφές:



Σχήμα 2.15: Αντιπροσωπευτικοί τύποι αστοχίας κοπτικών εργαλείων (Πηγή: Μηχανουργική τεχνολογία Α. Αντωνιάδης)

Επεξήγηση ειδών φθοράς:

- Πλευρική φθορά (flank wear): Είναι η πιο κοινή μορφή φθοράς και ταυτόχρονα η πιο επιθυμητή καθώς δίνει τη δυνατότητα πρόβλεψης της διάρκειας ζωής του κοπτικού.
- Φθορά ελεύθερης επιφάνειας (ζώνη φθοράς)
- Φθορά κρατήρα στην επιφάνεια αποβλήτου (crater wear): Η φθορά κρατήρα προκαλείται από την χημική αντίδραση μεταξύ κοπτικού και τεμαχίου ή από την απόξεση και αυξάνεται με την αύξηση των ταχυτήτων κοπής και των

θερμοκρασιών. Μεγάλη φθορά κρατήρα μπορεί να οδηγήσει σε θραύση της κοπτικής ακμής.

- Ψευδόκοψη (Build up edge): Εμφανίζεται πιο συχνά στην κοπή κολλωδών υλικών όπως χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα, αλουμίνιο και ανοξείδωτους χάλυβες. Η χαμηλή ταχύτητα κοπής τείνει να αυξάνει την ψευδόκοψη.
- Φθορά κόψης (notch wear): Εμφανίζεται τοπικά στην κοπτική ακμή αλλά και στην ελεύθερη επιφάνεια. Προκαλείται συνήθως κατά την κατεργασία ανοξείδωτων χάλυβων και υπέρ-κραμάτων.
- Πλαστική παραμόρφωση καθίζηση (plastic deformation): Συμβαίνει όταν το κοπτικό εργαλείο μαλακώνει και χάνει τις καλές του μηχανικές ιδιότητες. Συμβαίνει σε υψηλές θερμοκρασίες και μπορεί να αποφευχθεί με την χρήση κοπτικών με προστατευτική επικάλυψη.
- Θραύσεις λόγω θερμικών καταπονήσεων (thermal cracks): Εμφανίζονται λόγω των απότομων θερμοκρασιακών αλλαγών κάθετα στην κοπτική ακμή. Συχνά κατά την διακοπτόμενη κατεργασία ή κατά την επιπόλαια χρήση ψυκτικού υγρού.
- Ρωγμές (cracks) ακτινικές ρωγμές τύπου «χτένας» (comb wear)
- Απολέπιση, μικροθραύσεις κοπτικής ακμής (edge chipping-breakage): Συμβαίνουν ως αποτέλεσμα των υψηλών θλιπτικών φορτίσεων, που μπορούν να προέρχονται λόγω μεγάλου βάθους κοπής δονήσεων και εγκλεισμάτων στο προς κατεργασία τεμάχιο.

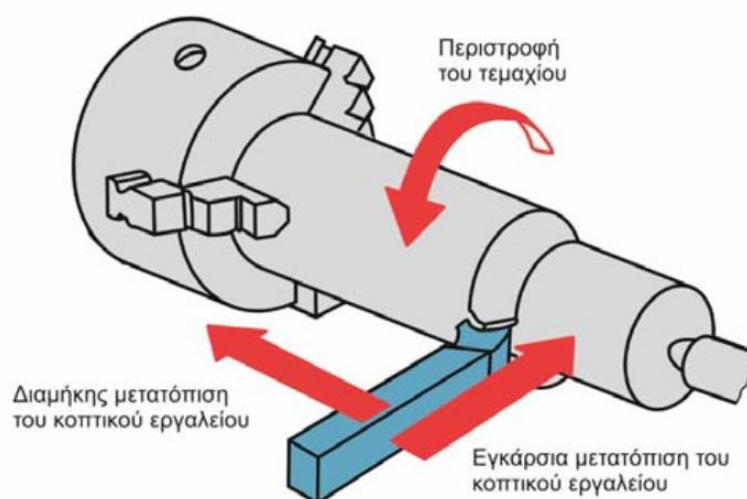
3. Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ

3.1 Τόρνευση (Turning)

3.1.1 Σύντομη περιγραφή της τórνευσης

Τόρνευση είναι η κατεργασία κοπής με κύρια κίνηση την περιστροφή της ατράκτου που φέρει το προς κατεργασία τεμάχιο και δευτερεύουσα την μεταφορική κίνηση της πρόωσης του εργαλείου κοπής. Αποτελεί κοπή με εργαλείο με γεωμετρικά καθορισμένη κόψη και κατεργάζονται τεμάχια συμμετρικά εκ περιστροφής κατά κανόνα με κυκλική διατομή. Οι γεωμετρίες που διαμορφώνονται με τórνευση είναι κωνικές, κυλινδρικές, ή σφαιρικές. Τα τεμάχια είναι δυνατόν να αποκτούν διαφορετική ποιότητα επιφανείας στα επιμέρους τμήματά τους, ανάλογα τις συνθήκες κατεργασίας στις οποίες κατεργάζονται.

Κατά την τórνευση το προς κατεργασία τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του ενώ βρίσκεται δεμένο στον σφικτήρα (τσοκ) του τórνου. Το κοπτικό εργαλείο του οποίου η μεταφορική κίνηση μπορεί να είναι εγκάρσια και διαμήκης έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο και έτσι απομακρύνει υλικό (κόβει). Η εγκάρσια εισχώρηση του κοπτικού στο τεμάχιο αποτελεί το βάθος κοπής.



Σχήμα 3.1: Κινηματική της τórνευσης (Πηγή: Μηχανουργική τεχνολογία Α. Αντωνιάδης)

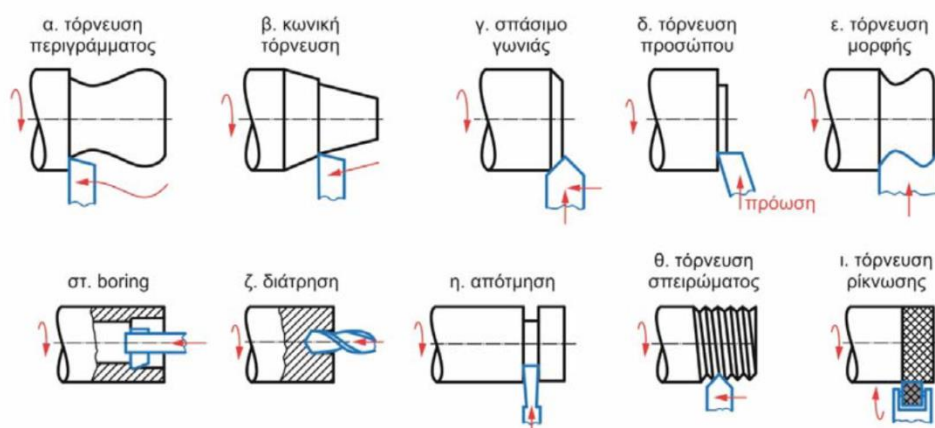
Για την επίτευξη των διαφορετικών μορφών στην τórνευση πρέπει να γίνει χρήση των κατάλληλων συνδυασμών κινήσεων καθώς και επιλογή του κατάλληλου εργαλείου κοπής σε συνδυασμό με το στέλεχος. Ένας από τους παράγοντες επιλογής τους εργαλείου κοπής είναι και το είδος της τórνευσης που θα πραγματοποιηθεί. Αυτή μπορεί να είναι εσωτερική ή εξωτερική στο κομμάτι

3.1.2 Είδη τórνευσης

Τα είδη τórνευσης τα οποία υλοποιούνται με τα κατάλληλα κάθε φορά κοπτικά εργαλεία είναι:

α. Τόρνευση περιγράμματος

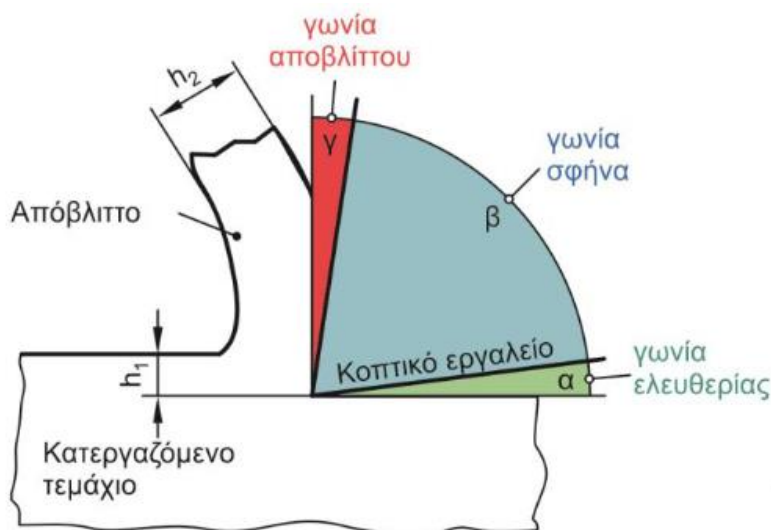
- β. Κωνική τórνευση
- γ. Σπάσιμο γωνίας
- δ. Τórνευση προσώπου
- ε. Τórνευση μορφής
- στ. Boring
- ζ. Διάτρηση
- η. Απότμηση
- θ. Σπειρωτόμηση
- ι. Τórνευση ρίκνωσης



Σχήμα 3.2: Είδη τórνευσης (Πηγή: Μηχανουργική τεχνολογία Α. Αντωνιάδης)

3.1.3 Γεωμετρία της κόψης (κύριες γωνίες κοπής)

Η κατεργασία με αφαίρεση υλικού μπορεί να προσομοιωθεί με την είσοδο στο κατεργαζόμενο τεμάχιο μίας κοπτικής σφήνας. Η κόψη της σφήνας έχει σχεδόν πάντα συγκεκριμένη γεωμετρία, γεωμετρία που επιλέγεται για να αρμόζει με το υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου, το είδος και τις συνθήκες της κατεργασίας. Τα χαρακτηριστικά αυτής της γεωμετρίας είναι και τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κάθε κοπτικού εργαλείου. Η κοπτική αυτή σφήνα-κοπτικό εργαλείο παρουσιάζει δύο κύριες επιφάνειες. Την επιφάνεια αποβλήτου (πάνω στην οποία ρέει το απόβλητο κατά την κοπή), και την ελεύθερη επιφάνεια που βρίσκεται στο μέρος της νεοσχηματισμένης επιφάνειας του τεμαχίου.



Σχήμα 3.3: Γεωμετρία κόψης (Πηγή: Μηχανουργική τεχνολογία Α. Αντωνιάδης)

Σημαντικοί παράμετροι για την κοπή που εμφανίζονται στο παραπάνω σχήμα είναι το πάχος κοπής h_1 όπως και το πάχος του παραμορφωμένου αποβλήτου h_2 . Στο σχήμα επίσης παρουσιάζονται οι τρεις χαρακτηριστικές γωνίες κοπής οι οποίες είναι:

- Γωνία α (γωνία ελευθερίας) η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου και την κατεύθυνση της κοπής
- Γωνία β (γωνία σφήνας) η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στις επιφάνειες αποβλήτου και ελευθερίας του κοπτικού εργαλείου. Είναι χαρακτηριστική της αιχμής του κοπτικού εργαλείου
- Γωνία γ (γωνία αποβλήτου) η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στην επιφάνεια αποβλήτου του εργαλείου κοπής και την κάθετο στην κατεύθυνση κοπής.

Οι γωνίες αυτές είναι πολύ σημαντικές στην κοπή επηρεάζουν σημαντικά την κατεργασία και επιλέγονται ανάλογα με το συνδυασμό υλικού κοπτικού εργαλείου-κατεργαζόμενου τεμαχίου και των συνθηκών κοπής. Οι τρεις αυτές γωνίες είναι συμπληρωματικές, οπότε :

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

Όντας συμπληρωματικές αυτές οι γωνίες είναι εμφανές ότι οποιαδήποτε αλλαγή σε οποιαδήποτε από αυτές επηρεάζει και τις άλλες. Λόγο αυτού είναι σημαντικό να υπάρχει πλήρης εικόνα για το πώς επηρεάζουν οι γωνίες την εκάστοτε κατεργασία ανάλογα το κατεργαζόμενο υλικό. Έτσι έχουμε:

- Αύξηση της γωνίας αποβλήτου γ : μείωση δυνάμεων κοπής, καλύτερη ποιότητα επιφανείας καλύτερη ροή αποβλήτου
- Μείωση της γωνίας αποβλήτου γ : ενίσχυση της στιβαρότητας της κόψης που ισοδυναμεί με αύξηση της αντοχής του κοπτικού εργαλείου
- Αύξηση της γωνίας ελευθερίας α : μείωση τριβής της θέσης επαφής μείωση της φθοράς
- Μείωση της γωνίας ελευθερίας α : Ενίσχυση της στιβαρότητας της κόψης που ισοδυναμεί με αύξηση της αντοχής του κοπτικού εργαλείου

Ακόμα σημαντικό ρόλο στην κατεργασία παίζει και η καμπυλότητα της κόψης, δηλαδή η ακτίνα r της κοπτικής ακμής του εργαλείου. Αύξηση της καμπυλότητας r μειώνει το ελάχιστο δυνατό πάχος αποβλήτου και η κόψη «χοντραίνει» ενώ παράλληλα ενδυναμώνει την κοπτική ακμή αυξάνοντας την στιβαρότητα της. Η ακτίνα καμπυλότητας προσφέρει αύξηση της αντοχής στο σημείο που ενώνονται η κύρια και η δευτερεύουσα κοπτική ακμή και σχετίζεται με την αύξηση της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου. Γενικότερα ισχύει ότι για την επιλογή της ακτίνας καμπυλότητας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη το βάθος κοπής, η πρόωση και ότι η μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας προτιμάται για μεγάλα βάθη κοπής. Τέλος μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας συνιστάται για κατεργασίες ψαθυρών υλικών όπου το απόβλητο που παράγεται δεν είναι συνεχές.

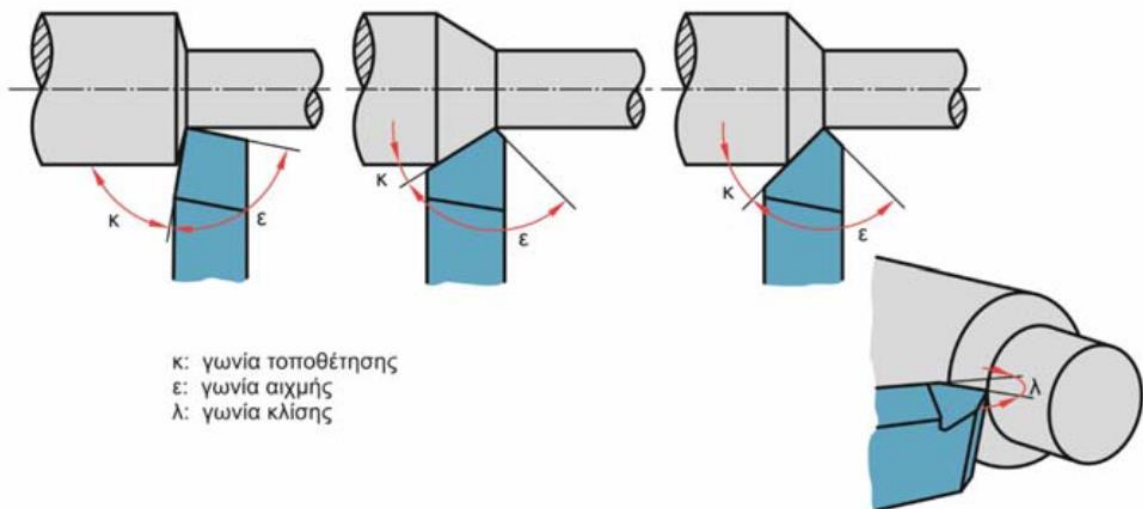
3.1.4 Κοπή στον τόρνο (γωνίες)

Εκτός από τις τρεις βασικές γωνίες κοπής οι οποίες παρουσιάστηκαν παραπάνω, υπάρχουν και άλλες τρεις γωνίες, σημαντικές για την κατεργασία της τόρνευσης. Οι γωνίες είναι οι παρακάτω:

- Γωνία τοποθέτησης κ : ορίζεται ως η γωνία ανάμεσα στην κύρια κοπτική ακμή τους εργαλείου κοπής και στην κατεργαζόμενη επιφάνεια. Για μεγάλη γωνία κ έχουμε μικρό πάχος αποβλήτου άλλα κατανομή της φόρτισης σε μικρή περιοχή του κοπτικού εργαλείου με συνέπεια στην διάρκεια ζωής του. Για μικρή γωνία κ έχουμε

πιο παχύ απόβλητο για το ίδιο βάθος κοπής και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής εργαλείου. Η γωνία κ είναι συνήθως 45° .

- Γωνία αιχμής ϵ : ορίζεται ανάμεσα στην κύρια και στη δευτερεύουσα κόψη του εργαλείου. Συνήθως είναι γύρω στις 90° , ενώ εργαλεία με μικρή γωνία αιχμής ϵ γρήγορα γίνονται ιδιαίτερα αιχμηρά.
- Γωνία κλίσης λ : η γωνία αυτή προσδιορίζει τη θέση της κύριας κοπτικής ακμής ως προς την οριζόντια θέση. Η ακμή αυτή μπορεί να λαμβάνει θέση οριζόντια ή με κλίση. Για τórνευση εκχονδρίσματος, η κλίση της κύριας κόψης αποδεικνύεται ευνοϊκή μιας και το απόβλητο ρέει ευκολότερα. Η γωνία κλίσης λ για εργαλεία εκχονδρίσματος λαμβάνει τιμές περίπου από 3° έως 5°



Σχήμα 3.4: Χαρακτηριστικές γωνίες τοποθέτησης τórνευση (Πηγή: Μηχανουργική τεχνολογία Α. Αντωνιάδης)

Η επιλογή του κατάλληλου εργαλείου εκτός των άλλων περιλαμβάνει και την ορθή επιλογή των διαφόρων γωνιών του κοπτικού. Επιπλέον ανάλογα την μορφή και το είδος της τórνευσης απαιτούνται και διαφορετικά κοπτικά εργαλεία ως προς την μορφή και την γεωμετρία τους. Έτσι ειδικής μορφής εργαλεία χρησιμοποιούνται για την εκάστοτε κατεργασία. Τα περισσότερα εργαλεία τórνευσης έχουν μία και μόνο κοπτική ακμή ενώ υπάρχουν και κάποια με δύο κοπτικές ακμές (ταυτόχρονης κοπής) για πιο γενικές χρήσεις. Τα κοπτικά εργαλεία τórνευσης χωρίζονται σε:

- Εργαλεία εκχόνδρισης: είναι σχεδιασμένα για να αντέχουν ισχυρές πιέσεις λόγω της φύσης της κατεργασίας που πραγματοποιούν. Αφαιρούν πολύ υλικό σε μικρό χρόνο και βάση της θέσης κύριας κόψης χωρίζονται σε δεξιόκοπα και αριστερόκοπα.
- Πλευρικά εργαλεία: για κατεργασίες προσώπου και εξομάλυνση αιχμηρών γωνιών. Έχουν μόνο μια κοπτική αιχμή για αυτό χρησιμοποιούνται από το κέντρο προς το εξωτερικό του τεμαχίου
- Εργαλεία ειδικών μορφών: για ειδικές κατεργασίες όπως απότμηση, σπειρωτόμηση, τórνευση μορφής, boring.
- Εργαλεία αποπεράτωσης (φινιρίσματος): έχουν ως σκοπό την κατεργασία και την απόδοση της καλύτερης δυνατής τελικής επιφάνειας

3.1.5 Συνθήκες κοπής- Μεγέθη

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν παράμετροι που αφορούν της συνθήκες της κοπής. Αυτοί οι παράμετροι είναι βασικοί για την παρούσα εργασία γιατί εκτός από τους παραμέτρους που αφορούν τα μεταλλικά στοιχεία των υλικών η σωστή επιλογή των τιμών τους είναι βασική προϋπόθεση για να επιτύχουμε την επιθυμητή κατεργασιμότητα.

Στην τórνευση οι συνθήκες κοπής είναι η ταχύτητα κοπής που σχετίζεται με τις στροφές περιστροφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου και τη διάμετρο κοπής, η πρόωση και το βάθος κοπής.

Ταχύτητα κοπής v_c : εκφράζει το ρυθμό κοπής στη κύρια κίνηση, που είναι η περιστροφή του τεμαχίου. Κατά την τórνευση τεμαχίου διαμέτρου D [mm], το οποίο περιστρέφεται με n στροφές το λεπτό [rpm], η ταχύτητα κοπής v_c προκύπτει από την σχέση :

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000}$$

Η τιμή της ταχύτητας v_c εκφράζεται σε μέτρα το λεπτό [m/min] για αυτό και προσθέτετε ο παρονομαστής 1000.

Η ταχύτητα κοπής δεν επιλέγεται τυχαία. Χαμηλή ταχύτητα κοπής οδηγεί σε μεγάλο χρόνο κοπής, άρα σε χαμηλή παραγωγικότητα που με την σειρά της σημαίνει μεγάλο κόστος. Από την άλλη, υψηλή ταχύτητα κοπής δίνει υψηλές θερμοκρασίες στο κοπτικό εργαλείο που με βάση και το υλικό κατασκευής τους φθείρεται πρόωρα σε μεγαλύτερο βαθμό και μπορεί να φτάσει και στην πλήρη καταστροφή του.

Η πρόωση f ή f_{min} : είναι η ταχύτητα κίνησης του κοπτικού εργαλείου, εγκάρσια ή διαμήκεις προς το περιστρεφόμενο τεμάχιο και εκφράζεται σε χιλιοστά ανά λεπτό [mm/min] ή σε χιλιοστά ανά περιστροφή του τεμαχίου [mm/rev] (f και f_{min} αντίστοιχα), η μεταξύ τους σχέση προκύπτει από την παρακάτω σχέση :

$$f_{min} = f \cdot n$$

όπου n οι στροφές της ατράκτου.

Το βάθος κοπής (A_p) ή (t) : καθορίζει το βάθος αφαίρεσης υλικού από το τεμάχιο. Το βάθος κοπής παίζει καθοριστικό λόγο στην κατεργασιμότητα και καθορίζεται ανάλογα το κοπτικό εργαλείο το κατεργαζόμενο υλικό και την επιθυμητή κατεργασία και ποιότητα.

Ο χρόνος κοπής (t_h): είναι το πηλίκο του μήκους (L) κατεργασίας προς τη πρόωση. Έτσι:

$$t_h = \frac{L}{f n}$$

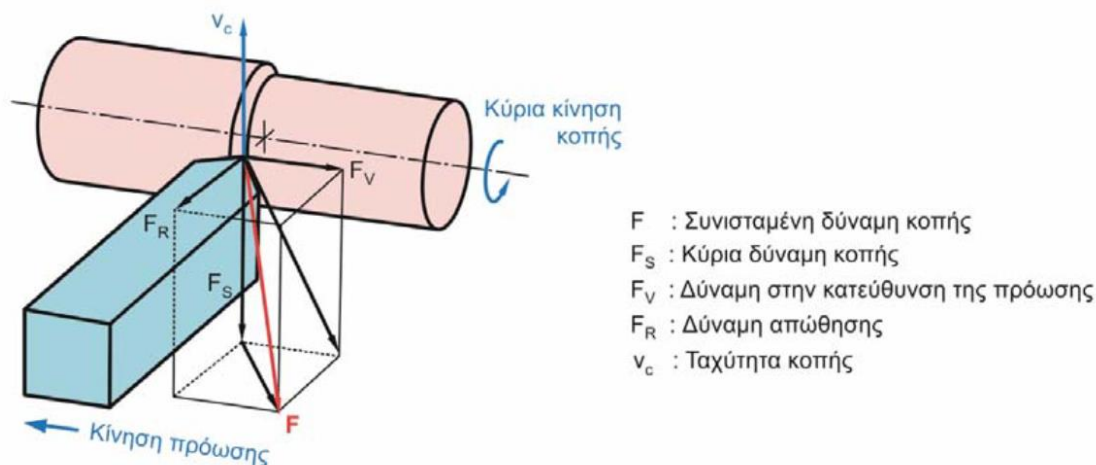
Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού (MRR) : είναι το γινόμενο της ταχύτητας κοπής, βάθους κοπής και πρόωσης και εκφράζει τον αφαιρούμενο όγκο ανά λεπτό κατεργασίας.

$$MRR = V_c \cdot f t \cdot 1000$$

3.1.6 Δυνάμεις κοπής

Στις κατεργασίες της κοπής μέσω εργαλειομηχανών ασκούνται στα τεμάχια δυνάμεις οι οποίες θα είναι ικανές να υπερνικήσουν την αντίσταση του κατεργαζόμενου τεμαχίου σε

πλαστική παραμόρφωση καθώς και την αντίσταση σχηματισμού της νεοκατεργασμένης επιφάνειας. Η γνώση και η κατανόηση των δυνάμεων κοπής στην τόνρευση είναι αρκετά σημαντική για μία σωστή κατεργασία κοπής. Με την γνώση των δυνάμεων γίνεται καλύτερη επιλογή παραγόντων μεθόδων και εργαλείων καθώς και έλεγχος της κατεργασίας.



Σχήμα 3.5: Συνιστώσες Δυνάμεις κοπής στη λοξή κοπή (Πηγή: Μηχανουργική τεχνολογία Α. Αντωνιάδης)

Για να υπολογίσουμε τις αναπτυσσόμενες αυτές δυνάμεις κοπής με τον τύπο του Kienzle είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την ειδική αντίσταση κοπής του εκάστοτε υλικού προς κατεργασία. Η ειδική αντίσταση κοπής προσδιορίζεται μέσω πειραμάτων και σχετικά τέτοια πειράματα έχουν γίνει για σχεδόν όλα τα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά. Ο τύπος είναι:

$$F_s = b \cdot K_{s1,1} \cdot h^{1-z}$$

Όπου b πλάτος αποβλήτου, h πάχος αποβλήτου, $K_{s1,1}$ ειδική αντίσταση κοπής, z σταθερά κατεργαζόμενου υλικού. Τέλος οι συνιστώσες δυνάμεις F_R (απώθησης) και F_v (κατεύθυνσης πρόωσης) υπολογίζονται και αυτές με τον τύπο του Kienzle.

$$F_R = b \cdot K_{R1,1} \cdot h^{1-y}$$

$$F_v = b \cdot K_{V1,1} \cdot h^{1-x}$$

3.2 Εξαρτήματα εργαλειομηχανής και στοιχεία με αντίκτυπο στην κατεργασιμότητα

3.2.1 Εργαλειομηχανή

Γενικά μια εργαλειομηχανή τόννευσης αποτελείται από:

- Το κιβώτιο ταχυτήτων που μεταφέρει την κύρια κίνηση κοπής που είναι η περιστροφή στο κατεργαζόμενο τεμάχιο.
- Τον κεντροφορέα ή κουκουβάγια που χρησιμοποιείται για την υποστήριξη τεμαχίων μεγάλου μήκους ή για ειδικές εργασίες στην τόννευση όπως διάτρηση και λείανση.
- Το εργαλειοφορείο που εκτελεί διάφορες ανεξάρτητες επιμέρους κινήσεις. Πάνω στο οποίο βρίσκεται ο εργαλειοδέτης που συγκρατεί το κοπτικό.
- Το τσοκ ή σφιγκτήρας είναι βιδωμένο στην κεφαλή της ατράκτου περιστρέφεται με αυτή και συγκρατεί το προς κατεργασία τεμάχιο.

Ένα σύγχρονο κέντρο τόννευσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.6: Σύγχρονο κέντρο τόννευσης (Πηγή: DMG MORI)

3.2.2 Στελέχη (μανέλες)

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω τα στελέχη πάνω στα οποία εδράζονται τα κοπτικά πλακίδια έχουν πολύ σημαντικό ρόλο για την επίτευξη μιας επιτυχημένης κατεργασίας κοπής στον τόρνο. Ανάλογα με την επιθυμητή κατεργασία που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε εκτός από την επιλογή του εργαλείου πρέπει να κάνουμε και την σωστή επιλογή στελέχους, έτσι ώστε να είναι εφικτή με την έννοια της προσβασιμότητας στο τεμάχιο η κατεργασία που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε.

Η τυποποίηση των συστημάτων συγκράτησης πλακιδίων τόννευσης γίνεται σύμφωνα με τα πρότυπα που προβλέπονται κατά ISO 5610. Τυποποίηση για **στελέχη εξωτερικής τόννευσης** αποτελείται από δέκα θέσεις (πχ DWLNR 25 25 X 06 JETI). Με την κάθε θέση να έχει την ακόλουθη σημασία:

1. Τύπος συγκράτησης πλακιδίου
2. Σχήμα πλακιδίου
3. Μορφή εργαλείου

4. Γωνία ελευθερίας εργαλείου
5. Κατεύθυνση κοπής
6. Ύψος στελέχους
7. Πλάτος στελέχους
8. Μήκος στελέχους
9. Μήκος κοπτικής ακμής
10. Κωδικός κατασκευαστή



Σχήμα 3.7: Στέλεχος-Μανέλα εξωτερικής τόρνευσης (Πηγή: Seco Tools)

Για **στελέχη εσωτερικής τόρνευσης** αποτελείται από δέκα θέσεις (πχ A20Q-PWLNR 06 R). Με την κάθε θέση να έχει την ακόλουθη σημασία:

1. Τύπος στελέχους
2. Διάμετρος στελέχους
3. Μήκος εργαλείου
4. Τύπος συγκράτησης πλακιδίου
5. Σχήμα πλακιδίου
6. Μορφή εργαλείου
7. Γωνία ελευθερίας εργαλείου
8. Κατεύθυνση κοπής
9. Μήκος κοπτικής ακμής
10. Κωδικός κατασκευαστή



Σχήμα 3.8: Στέλεχος-Μανέλα εσωτερικής τόρνευσης (Πηγή: Seco Tools)

Αξίζει να σημειωθεί, ότι για την αύξηση της αποδοτικότητας των εξαρτημάτων τους, οι εταιρίες στον τομέα της κοπής μετάλλου έχουν κατασκευάσει και τυποποιήσει τεχνολογίες που αφορούν στελέχη με εσωτερικές οπές για παροχή και επ' ακριβώς χορήγηση ψυκτικού (precision coolant) στην ζώνη κοπής. Το ψυκτικό υγρό σε αυτές τις τεχνολογίες εκτοξεύεται από ειδικά σχεδιασμένα άνω άκρα συγκράτησης πλακιδίων απευθείας στο σημείο της κόψης. Επίσης διατίθενται εδράσεις κοπτικών πλακιδίων που μπορούν να προσδεθούν εύκολα σε διαφορετικά μήκη στελεχών για πιο γρήγορη και αποτελεσματική κατεργασία. Αυτά τα καινοτόμα στελέχη με παροχή ψυκτικού καθώς και οι εδράσεις και τα ειδικά σχεδιασμένα άνω άκρα έχουν ειδικές κώδικες ονομασίες.

3.2.3 Ψυκτικά υγρά

Για την επίτευξη της βέλτιστης κατεργασιμότητας η επιλογή ψυκτικού είναι πολύ σημαντική. Όσο αφορά τους τρόπους ψύξης υπάρχει ένα πληθώρα διαφορετικών τύπων. Αυτοί είναι:

- Σαπουνόνερα: Είναι η πιο κοινή λύση. Είναι μίξεις νερού και λαδιού περιεκτικότητας λαδιού ανάμεσα στο 5 με 10%
- Λάδι
- Συμπιεσμένος αέρας για απομάκρυνση του αποβλήτου αλλά και ταυτόχρονο μικρό ποσοστό ψύξης (συνήθως δεν προσδίδει αποτελεσματική ψύξη)
- Συμπιεσμένος αέρας με ποσότητα λαδιού τεχνολογία, ελάχιστης δυνατής χρήσης ψυκτικού (MQL)
- Υγροποιημένο αέριο ως ψυκτικό για μεγάλη ψύξη (Cryogenic coolant) (πχ υγρό άζωτο)

Γενικά ως γενική χρήση ψυκτικού νοείται η χρήση σαπουνόνερων ή λαδιού.

Επιπροσθέτως, μεγάλη ποικιλία επιλογών διατίθενται για την επιλογή παροχής του ψυκτικού από διαφορετική θέση. Είναι δυνατή η παροχή ακριβείας, η συμβατική παροχή από σωλήνες, και πιο πρόσφατα με παροχή ψυκτικού από «κάτω» δηλαδή από την κατεύθυνση της επιφάνειας ελευθερίας του κοπτικού. Τέλος η επιλογή της πίεσης με την οποία παρέχετε το ψυκτικό υγρό μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα του.



Σχήμα 3.9: Τόρνευση με παροχή ψυκτικού ακριβείας (μέσο του στελέχους) (Πηγή: Sandvik Coromant)

4. ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

4.1 Γενικά κατεργασιμότητα υλικών ανά κατηγορία

4.1.1 Εισαγωγικά τις βέλτιστες συνθήκες κατεργασιμότητας

Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα κομμάτια της παρούσας εργασίας η κατεργασιμότητα είναι ένας σύνθετος όρος που έχει να κάνει τόσο με την εκπλήρωση μιας σωστής κατεργασίας κοπής όσον αφορά της μηχανικές και μηχανουργικές συνθήκες, όσο και με την οικονομικά συμφέρουσα περάτωση του συνόλου των επιθυμητών κατεργασιών.

Η κοπή στον τόρνο μπορεί να χωριστεί ανάλογα με το στάδιο κατεργασίας του τεμαχίου σε τρεις κατηγορίες. Οι τρεις αυτές κατηγορίες έχουν να κάνουν με είδος της κατεργασίας και πιο συγκεκριμένα αφορούν το στάδιο της κατεργασίας, δηλαδή εάν πρόκειται για κατεργασία εκχόνδρισης, μέτριας κατεργασίας κοπής ή για κατεργασία αποπεράτωσης. Όπως είναι λογικό οι ταχύτητες κοπής τα βάθη κοπής καθώς και τα στοιχεία του κοπτικού εργαλείου (το υλικό, το σχήμα, οι γωνίες κοπής, οι ιδιαίτερες σχεδιάσεις γρεζοθραυστών) διαφέρουν σε κάθε στάδιο έτσι ώστε να έχουμε την βέλτιστη κατεργασιμότητα σε κάθε επιμέρους κατεργασία της κοπής στον τόρνο.

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει αρχικά γενική αναφορά στην κατεργασιμότητα που παρουσιάζουν τα προς κατεργασία υλικά καταμελημένα ως προς τις ομάδες ISO 513. Θα αναφερθεί η γενική συμπεριφορά τους κατά την κοπή και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους. Έπειτα θα αναλυθούν μέσα από την παρουσίαση δεδομένων ερευνών και μελετών στοιχεία για την κατεργασιμότητα επιμέρους κατεργαζόμενων υλικών. Θα αναλυθούν οι ιδιαιτερότητες τους καθώς και τα στοιχεία που είναι σημαντικά για την αποδοτική και αποτελεσματική κοπή αυτών των υλικών. Ταυτοχρόνως θα παρουσιαστούν και συγκεκριμένα δεδομένα κοπής (ταχύτητα κοπής, βάθος κοπής, πρόωση) που θεωρούνται ιδανικά για τα εκάστοτε ζεύγη κατεργαζόμενων υλικών και υλικών κοπτικών εργαλείων για κατεργασίες τórνευσης. Τα στοιχεία αυτά αντλούνται από την διεθνή βιβλιογραφία καθώς και τις πληροφορίες που παρέχουν οι εταιρίες κατασκευαστές κοπτικών υλικών.

4.1.2 Κατεργασιμότητα χαλύβων (ISO P)

Η κατεργασιμότητα των τεμαχίων που ανήκουν στην κατηγορία ISO P βασίζεται ως επί το πλείστον στα στοιχεία κραμάτων, την θερμική κατεργασία και την προγενέστερη μηχανική κατεργασία που έχει υποστεί το τεμάχιο (π.χ. σφυρηλάτηση έλαση χύτευση κ.α.). Γενικά για τους χάλυβες ο έλεγχος αποβλήτου είναι σχετικά εύκολος και ομαλός. Οι χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα παράγουν μεγαλύτερο απόβλητο είναι κολλώδης και χρειάζονται αιχμηρές ακμές κοπής. Η σχετική δύναμη κοπής K_c κυμαίνεται ανάμεσα στα 1.400-3.100 N/mm². Οι δυνάμεις κοπής όπως και η ισχύς που απαιτείται για να κατεργαστούν παραμένει μεταξύ ενός περιορισμένου εύρους.

4.1.3 Κατεργασιμότητα ανοξείδωτων χαλύβων (ISO M)

Γενικά η κατεργασιμότητα των ανοξείδωτων χαλύβων διαφέρει ανάλογα με την χημική τους σύσταση και των προηγούμενων μηχανικών κατεργασιών που έχουν υποστεί. Η κατεργασιμότητα τους μειώνεται όσο μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε στοιχεία κραμάτων έχει το τεμάχιο προς κατεργασία. Τα τεμάχια ISO M δίνουν συνεχές απόβλητο το οποίο ανάλογα τον τύπο ανοξείδωτου χάλυβα μπορεί να είναι εύκολα ή δύσκολα διαχειρίσιμο. Η σχετική δύναμη κοπής K_c κυμαίνεται ανάμεσα στα 1.800–2.850 N/mm². Κατά την τórνευση οι υψηλές δυνάμεις κοπής έχουν σαν αποτέλεσμα σκληρύνσεις επιφανείας λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας.

Όσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα αζώτου (N) στην ωστενιτική δομή τόσο αυξάνεται η αντοχή και η αντίσταση στην διάβρωση μειώνοντας ωστόσο την κατεργασιμότητα και αυξάνοντας την σκλήρυνση που παρατηρείται κατά την διάρκεια της παραμόρφωσης. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες με προσθέσεις πυριτίου (Si) έχουν αυξημένη κατεργασιμότητα, ενώ η παρουσία άνθρακα άνω του 0.2 (wt%) παράγει σχετικά μεγάλη πλευρική φθορά στο εργαλείο κοπής. Τέλος το μολυβδαίνιο (Mo) και το άζωτο (N) μειώνουν την κατεργασιμότητα αλλά αυξάνουν την αντίσταση σε χημική φθορά και προδίδουν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.

4.1.4 Κατεργασιμότητα χυτοσιδήρων (ISO K)

Όσον αφορά την κατεργασιμότητα οι χυτοσίδηροι είναι ένα υλικό που προσδίδει κοντό μη συνεχές απόβλητο το οποίο είναι εύκολα διαχειρίσιμο στις περισσότερες συνθήκες. Η σχετική δύναμη κοπής κυμαίνεται ανάμεσα στα 790–1,350 N/mm². Η κατεργασία σε υψηλές ταχύτητες, ειδικά στους χυτοσίδηρους με εγκλείσματα άμμου δημιουργεί φθορά λόγω της τραχύτητας της επιφανείας. Οι NCI, CGI και ADI απαιτούν επιπλέον προσοχή σε σύγκριση με τον κανονικό GCI, λόγω των διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων τους καθώς και της παρουσίας γραφίτη.

Οι χυτοσίδηροι συχνά κατεργάζονται με κοπτικά αρνητικού τύπου, καθώς παρέχουν ισχυρές ακμές και ασφαλείς χρήσεις. Όσον αφορά τα κοπτικά τα υποστρώματα του καρβιδίου πρέπει να είναι σκληρά και οι επικαλύψεις πρέπει να είναι από παχύ τύπο οξειδίου του αλουμινίου, για καλή αντοχή στη φθορά από την τραχιά επιφάνεια. Οι χυτοσίδηροι παραδοσιακά επεξεργάζονται δίχως χρήση ψυκτικού υγρού, αλλά μπορούν επίσης να κατεργαστούν με παρουσία ψυκτικού υγρού, κυρίως για να περιοριστεί η μόλυνση από την σκόνη άνθρακα στο ελάχιστο.

4.1.5 Κατεργασιμότητα Μη σιδηρούχων μετάλλων (ISO N)

Τα ISO N μεταλλικά υλικά προσδίδουν μακρύ συνεχές απόβλητο και είναι σχετικά εύκολη η διαχείριση του ειδικότερα όταν είναι έντονα κραματοποιημένα. Το σκέτο αλουμίνιο είναι κολλώδες και χρειάζεται οξείες ακμές και υψηλή ταχύτητα κοπής. Η σχετική δύναμη κοπής κυμαίνεται ανάμεσα στα 350–700 N/mm². Επομένως οι δυνάμεις κοπής και η ισχύς για την κατεργασία τους είναι μικρή. Για την κατεργασία τους μπορούν γενικά να χρησιμοποιηθούν λεπτόκοκκα μη επικαλυμμένα κοπτικά καρβίδια όταν η περιεκτικότητα πυριτίου είναι κάτω του 7-8% και κοπτικά με ακμές πολυκρυσταλλικού διαμαντιού PCD για το αλουμίνιο, όταν αυτό έχει υψηλότερη περιεκτικότητα πυριτίου. Τέλος, το υπέρ εύτηκτο αλουμίνιο με υψηλότερη περιεκτικότητα πυριτίου Si> 12% παρουσιάζεται πολύ τραχύ και φθείρει αρκετά τα κοπτικά.

4.1.6 Κατεργασιμότητα Υπέρ-κραμάτων και Τιτανίου (ISO S)

Η κατεργασιμότητα των μεταλλικών υλικών της κατηγορίας ISO S, διαφέρει αρκετά λόγω της ποικιλομορφίας της χημικής και μεταλλουργικής φύσης των τεμαχίων που την απαρτίζουν. Γενικά χαρακτηριστικά τους είναι η δύσκολη διαχείριση του αποβλήτου το οποίο είναι μη συνεχές. Η σχετική δύναμη κοπής κυμαίνεται ανάμεσα στα 2.400–3.100 N/mm² για τα HRSA και στα 1.300–1.400 N/mm² για το τιτάνιο. Επομένως οι δυνάμεις κοπής και η ισχύς που είναι απαραίτητες για την κατεργασία είναι αρκετά μεγάλες.

4.1.7 Κατεργασιμότητα Υπέρσκληρων υλικών (ISO H)

Για τις μηχανικές κατεργασίες η κατηγορία ISO H είναι η λιγότερο δημοφιλής. Οι σκληρυμένοι χάλυβες απαντώνται συνήθως σε κατεργασίες φινιρίσματος. Η σχετική δύναμη κοπής κυμαίνεται ανάμεσα στα 2.550–4.870 N/mm² και ο έλεγχος αποβλήτου

πραγματοποιείται σε αποδεκτά πλαίσια. Ακόμα απαιτούνται υψηλές δυνάμεις κοπής και ισχύς για την τόννευση τους.

Το υλικό του κοπτικού εργαλείου πρέπει να έχει καλή αντοχή στην πλαστική παραμόρφωση (σκληρότητα σε υψηλές θερμοκρασίες), χημική σταθερότητα (σε υψηλές θερμοκρασίες), μηχανική αντοχή και αντοχή στη φθορά από τραχύτητα. Τα κοπτικά CBN όπως και τσιμεντοειδή καρβίδια είναι αυτά που παρουσιάζουν αυτά τα χαρακτηριστικά και επομένως εφαρμόζονται σε τέτοιου είδους κατεργασίες. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται ενισχυμένα κεραμικά κοπτικά όταν δεν απαιτείται υψηλή ποιότητα επιφανείας και οι θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλές για τα κοπτικά CBN. Οι κατεργασίες τεμαχίων ISO H φθάνουν έως και σκληρότητες περίπου 60 HRC.

4.2 Κατεργασιμότητα επιμέρους υλικών

4.2.1 Χάλυβας - Απλός χάλυβας αποκοπής 11 SMn 30

Ο χάλυβας είναι το πιο δημοφιλές προς κατεργασία υλικό. Η κατεργασιμότητα των χαλύβων ποικίλει και ξεκινάει από εύκολα κατεργάσιμους χάλυβες και καταλήγει σε δύσκολους στην κατεργασία εργαλειοχάλυβες και κράματα χάλυβα. Γενικά η κατεργασιμότητα των χαλύβων μειώνετε ανάλογα με την αύξηση της αντοχής τους και ως συνέπεια χάλυβες με μεγάλη αντοχή εφελκυσμού να εμφανίζουν δυσκολίες στην κατεργασία τους.

Ο χάλυβας αποκοπής 11 SMn 30 είναι χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα με μαγγάνιο πυρίτιο και μέρος μαγνησίου και ψευδαργύρου. Είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό κατεργασιών με καλή συμπεριφορά ως μηχανικό κομμάτι περιστροφής στην αυτοκινητοβιομηχανία. Ακόμα χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εξαρτημάτων με λεπτά τοιχώματα και εφαρμογές που δεν απαιτούν θερμική αντίσταση. Παρουσιάζει καθαρό και λαμπερό χαλύβδινο χρώμα. Δεν είναι κατάλληλος για θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης και είναι για πληθώρα εταιριών του κλάδου της κοπής, το υλικό που αντιπροσωπεύει την κατηγορία P1. Όσον αφορά τα στοιχεία κραμάτωσης του 11 SMn 30 καθώς και τις μηχανικές του ιδιότητες αυτά παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Χάλυβας	C	Si	Mn	P	S
11 SMn 30	<0.014	≤0.05	0.9-1.3	<0.11	0.27-0.33

Σχήμα 4.1: Στοιχεία κραμάτωσης χάλυβα 11 SMn 30 (wt.%)

Χάλυβας	Σκληρότητα	Πυκνότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Μέτρο ελαστικότητας	Σημείο τήξης
11 SMn 30	107-169 HB	7.85g/cm ³	~650MPa	~210 GPa (25°C)	1480-1526°C

Σχήμα 4.2: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα 11 SMn 30

Παρακάτω θα γίνει παρουσίαση στοιχείων και ευρημάτων που προκύπτουν από την διεθνή βιβλιογραφία όσον αφορά τα βέλτιστα δεδομένα τόννευσης του χάλυβα 11 SMn 30.

Σε πείραμα που έγινε για την προσέγγιση των βέλτιστων συνθηκών κοπής του 11 SMn 30 κατά την στεγνή τόννευση σε εργαλειομηχανή CNC [7] έγινε χρήση της μεθόδου Taguchi για δεδομένα κοπής, ταχύτητα κοπής $V_c=135,180,225(\text{m/min})$, για προώσεις $f=0.1, 0.2, 0.3 (\text{mm/rev})$ και βάθη κοπής $a_p=0.5, 1, 1.5 (\text{mm})$, μετρήθηκαν τα μεγέθη ποιότητας κατεργασμένης επιφανείας R_a και R_z . Το κοπτικό πλακίδιο που χρησιμοποιήθηκε κωδικής ονομασίας κατά ISO CNMG 120408-49 είδους TN 2000 (καρβίδιο επικάλυψης CVD) κατασκευής της WIDIA.

Από τα πειραματικά στοιχεία και μετά την χρήση της μεθόδου Taguchi προκύπτουν τα παρακάτω βέλτιστα δεδομένα κοπής.

Βέλτιστες συνθήκες	$V_c (\text{m/min})$	$F (\text{mm/rev})$	$A_p (\text{mm})$
Min R_z & Min R_a	225	0.1	1.5

Σχήμα 4.3: Βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας χάλυβα 11 SMn 30 (Πηγή: Optimization of CNC Turning Parameters with Carbide Tool for Surface Roughness Analysis Using Taguchi Analysis Shunmugesh K., Panneerselvam K. and Pramod M. and Amal George² Vazhakulam, India 2014)

- Παρατηρήθηκε ακόμα ότι η παράμετρος με τον μεγαλύτερο αντίκτυπο στην ποιότητα κατεργαζόμενης επιφανείας είναι η πρόωση και έπειτα η ταχύτητα κοπής και το βάθος κοπής.

Σε παρόμοια έρευνα με χρήση του ίδιου κοπτικού πλακιδίου και χρήση της μεθόδου Taguchi grey (TGRA) [8] με πειραματικά δεδομένα, ταχύτητα κοπής $V_c=80,120,240(\text{m/min})$, για προώσεις $f=0.1, 0.2, 0.4 (\text{mm/rev})$ και βάθη κοπής $a_p=0.5, 1, 1.5 (\text{mm})$, μετρήθηκαν τα μεγέθη ποιότητας κατεργασμένης επιφανείας R_a , R_z και ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού MRR. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Βέλτιστες συνθήκες	$V_c (\text{m/min})$	$F (\text{mm/rev})$	$A_p (\text{mm})$	$R_a (\mu\text{m})$	$R_z (\mu\text{m})$	MRR (cm^3/min)
	240	0.1	1.5	1.9	7.4	32.2

Σχήμα 4.4: Βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας χάλυβα 11 SMn 30 (Πηγή: Multi-Objective Optimization of Machining Parameters during Dry Turning of 11SMn30 Free Cutting Steel Using Grey Relational Analysis Leeba Varghesea, Aravind Sb, Shunmugesh Kc, India)

- Από τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών είναι φανερό ότι για την βέλτιστη κατεργασιμότητα του χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα, με χρήση κοπτικού καρβιδίου με επικάλυψη CVD, πρέπει να γίνει χρήση υψηλής ταχύτητας κοπής σε συνδυασμό με μεγάλο βάθος κοπής και χαμηλή τιμή πρόωσης.

4.2.2 Κραματοποιημένος χάλυβας 42 CrMo 4, 1.7225

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει ανάλυση της κατεργασιμότητας του κραματοποιημένου χάλυβα EN-DIN 42 CrMo 4 (1.7225).



Σχήμα 4.5: Κραματοποιημένος χάλυβας 42CrMo4 (Πηγή: Linkun Metal Supermarkets)

Πρόκειται για κραματοποιημένο χάλυβα με χρώμιο (Cr) και μολυβδαίνιο (Mo) που είναι ευρέως χρησιμοποιούμενος στην αυτοκινητοβιομηχανία καθώς χρησιμοποιείται για την

κατασκευή εξαρτημάτων υψηλής αντοχής σε συμπιεστές, άξονες, γρανάζια και μπουλόνια. Επίσης χρησιμοποιείται σε εξαρτήματα για υπόγειες εφαρμογές, πράγμα που τον κάνει δημοφιλή για την πετρελαιοβιομηχανία. Τέλος συναντάτε και σε γεωργικά μηχανήματα με επιπλέον χαρακτηριστικό του να είναι επίσης η χαμηλή συγκολλητικότητα. Όσον αφορά τα στοιχεία κραμάτωσης του 42 CrMo 4 καθώς και τις μηχανικές του ιδιότητες αυτά παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Χάλυβας Επιβελτίωσης	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
42CrMo4	0.38-0.45	≤0.4	0.60-0.90	≤0.035	≤0.035	0.90-1.2	0.15-0.3

Σχήμα 4.6: Στοιχεία κραμάτωσης χάλυβα 42 CrMo 4 (%wt.)

Χάλυβας Επιβελτίωσης	Σκληρότητα	Πυκνότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Μέτρο ελαστικότητας	Σημείο τήξης
42CrMo4	290HB	7.85g/cm ³	655MPa	190-210 GPa (25°C)	1416°C

Σχήμα 4.7: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα 42 CrMo 4

Όσον αφορά τις κατηγοριοποιήσεις των εταιριών που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2, ο χάλυβας 42CrMo4 κατηγοριοποιείται:

- Στο cMC της Sandvik Coromant ως P2.1.Z.AN
- Στο SMG της Seco Tools στην υποκατηγορία P5
- Στο Beyond material group της Kennametal στην υποκατηγορία P5

Για βέλτιστη κατεργασιμότητα του χάλυβα 42 CrMo 4 σε κατεργασία αποπεράτωσης, προτείνονται κοπτικά τσιμεντοειδή καρβίδια με επικάλυψη CVD. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ονομαστικά τα δεδομένα κοπής για κυλινδρικά τεμάχια χάλυβα 42 CrMo 4 διαμέτρου 75mm και μήκους 93mm.

Προς κατεργασία τεμάχιο	Κατασκευαστής	Κωδικός κοπτικού	Αρχικές τιμές συνθηκών		
			Βάθος κοπής, mm	Πρόωση, mm/rev	Ταχύτητα κοπής, v_c , m/min
42 CrMo 4	Sandvik	GC4425	5	0.518	175
	Seco	TP0501	5	0.6	305

Σχήμα 4.8: Προτεινόμενα δεδομένα κοπής χάλυβα 42 CrMo 4 (Πηγή: Sandvik Coromant, Seco tools)

Στην συνέχεια θα γίνει παρουσίαση πειραματικών δεδομένων για την κατεργασία αποπεράτωσης χάλυβα 42 CrMo 4. [9] Κατά την πειραματική διαδικασία έγινε προσπάθεια εξακρίβωσης των δεδομένων βέλτιστης κατεργασιμότητας σε διαφορετικές ταχύτητες κοπής, με χρήση ή μη ψυκτικού υγρού, σε σκληρή τórνευση. Κατά το πείραμα έγινε κοπή αποπεράτωσης σε δοκίμια χάλυβα 42 CrMo 4, διαμέτρου 75mm και μήκους 93mm. Χρησιμοποιήθηκε τσιμεντοειδές καρβίδιο με τριπλή επικάλυψη CVD Ti(C,N)+Al₂O₃+TiN (TNMG 160404-LC 4315). Η κοπή έγινε σε ταχύτητες κοπής 60 και 120 m/min και σε δύο συνθήκες, χωρίς ύπαρξη ψυκτικού και με την χρήση ελάχιστης δυνατής ποσότητας ψυκτικού (συνθετικό λάδι και βάση το νερό σε συνδυασμό με

πεπιεσμένο αέρα 400kPa Quimatic Jet). Το βάθος κοπής ορίστηκε σε $a_p=0.3\text{mm}$ και η πρόωση σε $f=0.15\text{mm/rev}$. Τα στοιχεία κραμάτων του χάλυβα 42 CrMo 4 του πειράματος είναι (%wt.):

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	H	Άλλα
0.40	0.23	0.85	0.02	0.02	1.01	0.18	0.18	0.01	0.15	1.4	1.09

Σχήμα 4.9: Στοιχεία κραμάτων χάλυβα 42 CrMo 4 του πειράματος (Πηγή: Performance of ISO P and ISO S carbide tools in hard turning of AISI 4140 under dry and MQL conditions, Matheus S. Polly, Amália Mayrhofer André J. Souza, 2018)

Για την αξιολόγηση της κατεργασιμότητας στην κάθε μια από τις εκάστοτε 4 περιπτώσεις κοπής με το συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο σε διαφορετικές συνθήκες, έγινε καταγραφή της φθοράς της ακμής του κοπτικού εργαλείου (VB_c) κατά της αρχές ISO 3685, όπως επίσης της τραχύτητας κατεργασμένης επιφανείας (R_a) της ακτίνας κοπτικής ακμής και την διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου.

Ο χρόνος ζωής του κοπτικού πλακιδίου του πειράματος παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα συγκριτικά για τις 4 περιπτώσεις-συνθήκες κοπής της κατεργασίας:

Περίπτωση	Ψυκτικό	Ταχύτητα κοπής, v_c , m/min	Διάρκεια ζωής κοπτικού min
1	-	120	7.56
2	-	60	29
3	Ελάχιστη δυνατή ποσότητα ψυκτικού Quimatic Jet	120	17.7
4	Ελάχιστη δυνατή ποσότητα ψυκτικού Quimatic Jet	60	>63

Σχήμα 4.10: Παρατηρήσεις σε τόννευση αποπεράτωσης (Πηγή: Performance of ISO P and ISO S carbide tools in hard turning of AISI 4140 under dry and MQL conditions, Matheus S. Polly, Amália Mayrhofer André J. Souza, 2018)

Σημειώνεται ότι η διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου ορίστηκε ως ο χρόνος που χρειάστηκε το κοπτικό εργαλείο για να ξεπεράσει την τιμή φθοράς κοπτικής ακμής $VB_c^3=300\text{ }\mu\text{m}$. Επίσης το πείραμα έκανε χρήση του ελάχιστου δυνατού ψυκτικού υγρού (φιλοσοφία MQL: Minimum quantity Lubrication) και όχι υπερβολική χρήση ψυκτικού με πλημμύρισμα της ζώνης κοπής.

Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι σε τόννευση χωρίς την ύπαρξη ψυκτικού υγρού σε ταχύτητα κοπής 120m/min (περίπτωση 1) το τσιμεντοειδές καρβίδιο κοπής έχανε αρκετά γρήγορα την προστατευτική επικάλυψη CVD με αποτέλεσμα την πρόωρη καταστροφική φθορά του. Σε μικρότερη ταχύτητα κοπής (60m/min) χωρίς την ύπαρξη ψυκτικού (περίπτωση 2) το καρβίδιο εμφάνισε μεγαλύτερη αντοχή και σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, η μείωση της ταχύτητας κοπής στο 50% είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση διάρκειας ζωής του καρβιδίου κατά 283%. Αυτό το στοιχείο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την επίτευξη των βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας και πρέπει να ληφθεί υπόψη. Στην κοπή με ταχύτητα κοπής 120m/min και ύπαρξη ψυκτικού (περίπτωση 3) παρατηρήθηκε μικρότερη αύξηση διάρκειας ζωής του κοπτικού της τάξης του 134% από την αρχική περίπτωση 1. Αν και μικρότερη αύξηση διάρκειας ζωής του κοπτικού καρβιδίου, λόγω της αυξημένης ταχύτητας κοπής σε βιομηχανικό περιβάλλον οι συνθήκες της περίπτωσης 3 μπορούν να

χαρακτηριστούν ως συνθήκες υψηλής κατεργασιμότητας. Τέλος στην κοπή με ταχύτητα 60m/min και ύπαρξη ψυκτικού (περίπτωση 4) η οποία ήταν και η μόνη που η φθορά της κοπτικής ακμής του εργαλείου δεν ξεπέρασε την τιμή $VB_c^3=300 \mu\text{m}$ για όλο το μήκος κοπής ($L_f=3000\text{mm}$), με τελική τιμή $VB_c^3=175 \mu\text{m}$ και υπολογιζόμενη διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου μεγαλύτερη των 63 λεπτών. Είναι φανερό ότι η ύπαρξη ψυκτικού μειώνει τον συντελεστή τριβής και ψύχει την ζώνη κοπής, ως αποτέλεσμα έχουμε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του εργαλείου.

Όσον αφορά την ποιότητα κατεργαζόμενης επιφανείας παρατηρείτε ότι είναι συνδεδεμένη με την ακτίνα της κοπτικής ακμής και την τιμή της φθοράς του κοπτικού. Η μεγάλη φθορά οδηγεί σε αύξηση ακτίνας κοπτικής ακμής με πρόσκαιρη βελτίωση στην ποιότητα επιφανείας πριν την αχρήστευση του κοπτικού πλακιδίου. Για επίτευξη μίας σταθερής ποιότητας τραχύτητας επιφανείας σε συνδυασμό με δίκαιη διάρκεια ζωής του κοπτικού αποδεικνύεται σημαντικό οι μηχανισμοί που προκαλούν φθορά να έχουν την ίδια σταδιακή αύξηση (ρυθμός) με την αύξηση της ακτίνας κοπτικής ακμής του κοπτικού εργαλείου. Πέραν αυτού η κοπή στην μεγαλύτερη ταχύτητα ($V_c=120 \text{ m/min}$) έδωσε μικρότερη μέση τιμή τραχύτητας κατεργασμένης επιφανείας (R_a) και στις δύο περιπτώσεις 1 και 3. Αυτό έγινε λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας στην ζώνη κοπής που μειώνει την σκληρότητα του υλικού στο σημείο.

Συμπερασματικά το τσιμεντοειδές καρβίδιο με επικάλυψη CVD ολοκλήρωσε όλη την κατεργασία αποπεράτωσης ($L_f=3000\text{mm}$) μόνο στις συνθήκες κατεργασίας της περίπτωσης 4. Αν και οι απόλυτες τιμές τραχύτητας δεν ήταν οι μικρότερες στην κατεργασμένη επιφάνεια υπήρχε σταθερότητα σε αυτές ($R_a=2.32\pm0.54 \mu\text{m}$).

- Παρατηρούμε δηλαδή ότι αν και τα κοπτικά καρβίδια με επικαλύψεις CVD προτείνονται για τις κατεργασίες όλκιμων χαλύβων με σχετικά μικρή σκληρότητα, είναι τεράστιας σημασίας η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών κοπής (ψύξης ζώνης κοπής) για να έχουμε βέλτιστη κατεργασιμότητα. Αν στόχος ήταν η κατεργασία όλης της επιφάνειας με μία ακμή του κοπτικού πλακιδίου και η τιμή τραχύτητας ($R_a=2.32\pm0.54 \mu\text{m}$) ήταν αποδεκτή, θα επιλεγόντουσαν οι συνθήκες του πειράματος 4. Σε άλλες περιπτώσεις όπου το κόστος (επιπλέον ακμές κοπτικού) ή χρόνος (ταχύτητα κοπής) ήταν πιο σημαντικά στοιχεία θα επιλεγόντουσαν διαφορετικές συνθήκες.

4.2.3 Ανοξείδωτος χάλυβας - EN 1.4372 / AISI 201

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες είναι κράματα χαλύβων με τουλάχιστον 10.5% περιεκτικότητα χρωμίου με την ύπαρξη ή μη άλλων στοιχείων κραμάτωσης και μέγιστο το 1.2% περιεκτικότητας άνθρακα κατά μάζα. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες είναι γνωστοί για την αντίσταση σε οξείδωση η οποία και αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας τους σε χρώμιο. Η αντίσταση σε οξείδωση αυξάνεται περαιτέρω με την ύπαρξη νικελίου και μολυβδαινίου.

Ο ανοξείδωτος χάλυβας EN 1.4372 / AISI 201 χαρακτηρίζεται ως υλικό με σχετικά χαμηλό κόστος. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εσωτερικού χώρου που αφορούν εξοπλισμό εστίασης και εξαρτήματα εξοπλισμού υγείας. Σε εφαρμογές εξωτερικού χώρου βρίσκει εφαρμογές στα αυτοκίνητα, σε βαγόνια τρένων καθώς και σε περιφράξεις, πόρτες κ.α.

Όσον αφορά τα στοιχεία κραμάτωσης του AISI 201 καθώς και τις μηχανικές του ιδιότητες αυτά παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Ανοξείδωτος χάλυβας	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
AISI 201	≤0.012	≤1.0	5.5-7.5	<0.045	≤0.15	16-18	3.5-5.5

Σχήμα 4.11: Στοιχεία κραμάτωσης ανοξείδωτου χάλυβα AISI 201 (wt%)

Ανοξείδωτος χάλυβας	Σκληρότητα	Πυκνότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Μέτρο ελαστικότητας
AISI 201	163 HB	7.86g/cm ³	~690MPa	197 GPa

Σχήμα 4.12: Μηχανικές ιδιότητες ανοξείδωτου χάλυβα AISI 201

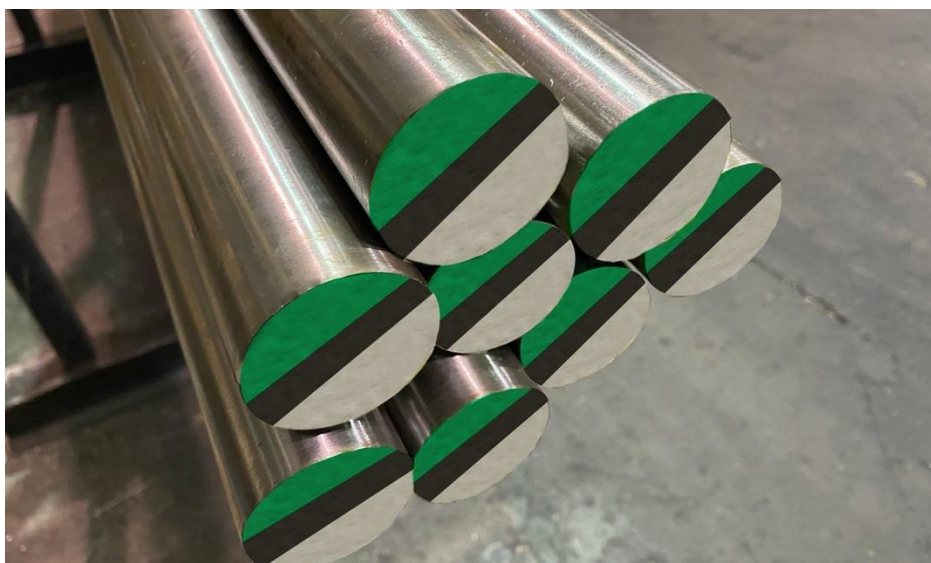
Σε πείραμα τόννευσης του AISI 201 [10] με χρήση τσιμεντοειδές καρβιδίου και εφαρμογή της μεθόδου Taguchi και της στατιστικής μεθόδου ANOVA έγινε προσέγγιση των βέλτιστων παραμέτρων τόννευσης που προσδίδουν την μικρότερη δύναμη κοπής. Τα δεδομένα κοπής που ελέγχθηκαν είναι, οι ταχύτητες κοπής $V_c=15,37,65,100(\text{m/min})$, για προώσεις $f=0.12, 0.14, 0.16, 0.18 (\text{mm/rev})$ και βάθη κοπής $a_p=0.2, 0.3, 0.4, 0.5 (\text{mm})$.

*Η ταχύτητα κοπής μετατράπηκε βάση του τύπου της παραγράφου 3.1.5 από rpm σε m/min

- Από το παραπάνω προέκυψε ότι οι μικρότερες δυνάμεις κοπής παρουσιάζονται κοντά στην μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής (εδώ ~100 m/min) και σε πρόωση ~0.14 (mm/rev). Το μικρότερο βάθος κοπής καθώς και η μικρότερη διάμετρος του δοκιμίου δίνουν επίσης μικρότερες δυνάμεις κοπής. [10]

4.2.4 Σκληρυμένος ανοξείδωτος χάλυβας 17-4 PH (1.4548)

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει ανάλυση της κατεργασιμότητας για τον σκληρυμένο ανοξείδωτο χάλυβα 17-4 PH (1.4548, X 5 Cr Ni Cu Nb 17 4 4).



Σχήμα 4.13: Σκληρυμένος ανοξείδωτος χάλυβας 17-4 PH (Πηγή: Impact Ireland Metals Ltd)

Ο PH (precipitation-hardening) ανοξειδωτος χάλυβας προϊόν σκλήρυνσης περιέχει περίπου 17% χρώμιο και 4% νικέλιο. Αυτοί οι ανοξειδωτοι χάλυβες αναπτύσσουν αρκετά υψηλή αντοχή σκληρότητα με πρόσθετα αλουμινίου τιτανίου νιόβιου βαναδίου και αζώτου. Ο 17-4 PH ανοξειδωτος χάλυβας έχει αρχικά ωστενιτική και μαρτενσιτική δομή. Έπειτα από θερμική κατεργασία και περί των 1040°C η ωστενιτική μετατρέπεται σε μαρτενσιτική και μετά από επακόλουθη σκλήρυνση γήρανσης στους 475°C φτάνει όριο διαρροής άνω των 1000MPa. Σε σύγκριση με τους υπόλοιπους ανοξειδωτους χάλυβες προσφέρουν γενικά τον καλύτερο συνδυασμό υψηλής αντοχής σκληρότητας και αντίστασης στην οξείδωση. Λόγο αυτών των χαρακτηριστικών έχουν ευρεία χρήση ως υλικό για εξαρτήματα αεροσκαφών, ως εξαρτήματα εφαρμογών πυρηνικής ενέργειας, σε μηχανές μεταποίησης τροφής και για γενικές εφαρμογές όπου χρειάζεται ανοξειδωτος χάλυβας με υψηλή αντοχή.

Όσον αφορά τα στοιχεία κραμάτωσης του 17-4 PH καθώς και τις μηχανικές του ιδιότητες αυτά παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Ανοξειδωτος Χάλυβας	Cr	Mn	Si	Ni	P	S	C	Cu	CB+Ta
17-4 PH	15-17.5	<1	<1	3-5	<0.04	<0.03	<0.07	3-3.5	0.15-0.45

Σχήμα 4.14: Στοιχεία κραμάτωσης ανοξειδωτου χάλυβα 17-4PH (%wt.)

Ανοξειδωτος Χάλυβας	Σκληρότητα	Πυκνότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Μέτρο ελαστικότητας	Σημείο τήξης
17-4 PH / 1.4548	348 HB	7.75g/cm ³	~1000MPa	190-210 GPa (25°C)	~1450°C

Σχήμα 4.15: Μηχανικές ιδιότητες ανοξειδωτου χάλυβα 17-4 PH

Όσον αφορά τις κατηγοριοποιήσεις των εταιριών που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2, ο ανοξειδωτος χάλυβας 17-4 PH κατηγοριοποιείται:

- Στο cMC της Sandvik Coromant ως P5.0.Z.PH
- Στο SMG της Seco Tools στην υποκατηγορία P12
- Στο Beyond material group της Kennametal στην υποκατηγορία P6

Για βέλτιστη (economy and MRR) τόννευση του ανοξειδωτου χάλυβα 17-4 PH κατά τις εταιρίες προτείνονται κοπτικά τσιμεντοειδή καρβίδια με επικάλυψη CVD. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ονομαστικά τα δεδομένα κοπής για κυλινδρικά τεμάχια ανοξειδωτου χάλυβα 17-4 PH διαμέτρου 35mm και μήκος 300mm.

Προς κατεργασία τεμάχιο	Κατασκευαστής	Κωδικός κοπτικού	Αρχικές τιμές συνθηκών		
			Βάθος κοπής, mm	Πρόωση, mm/rev	Ταχύτητα κοπής, v _c , m/min
17-4 PH / 1.4548	Sandvik	GC4425	2.5	0.518	76.5
	Seco	TP2501	2.5	0.460	160

Σχήμα 4.16: Προτεινόμενα δεδομένα κοπής ανοξειδωτου χάλυβα 17-4 PH (Πηγή: Sandvik Coromant, Seco tools)

Η κατεργασιμότητα του 17-4 PH SS ανοξειδωτου χάλυβα παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του κατεργαζόμενου υλικού. Η σύνθεση του παρουσιάζει υψηλή αντοχή και μικρή θερμική αγωγιμότητα. Ως αποτέλεσμα οι μεγάλες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην ζώνη κοπής δεν διοχετεύονται προς το τεμάχιο και έτσι αναπτύσσεται πολύ μεγάλη θερμοκρασία στο κοπτικό εργαλείο. Το κοπτικό εργαλείο υπόκεινται μεγάλη φθορά και κρίνεται απαραίτητη η επιλογή του σωστού τρόπου ψύξης της ζώνης κοπής.

Κατά την τόννευση ανοξειδωτου χάλυβα 17-4 PH SS με καρβίδιο επικάλυψης PVD (AlTiN) KC5010 (Kennametal) σε συνθήκες $V_c=78.5\text{m/min}$, $f=0.143\text{mm/rev}$, και βάθη κοπής $a_p=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\text{ mm}$ με διαφορετικούς τρόπους ψύξης, Cryogenic cooling (LN_2), Dry (No coolant), MQL cooling, Wet cooling, παρήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα: [11] Σε όλα τα βάθη κοπής η τόννευση του 17-4 PH SS με cryogenic cooling είχε καλύτερη απόδοση όσον αφορά την φθορά του κοπτικού εργαλείου, την ποιότητα κατεργασμένης επιφανείας καθώς και την μορφολογία του απόβλητου

- Τα καλύτερα χαρακτηριστικά επιφανείας στο κατεργαζόμενο τεμάχιο παρατηρήθηκαν με χρήση cryogenic cooling.
- Σε περιβαλλοντικό και υγειονομικό επίπεδο η χρήση cryogenic cooling ικανοποιεί τις απαιτήσεις. Οπότε και επιλέγεται ως η βέλτιστη μέθοδος ψύξης για τόννευση του 17-4 PH SS σε όλες τις συνθήκες που ερευνήθηκαν.

Στην συνέχεια της παραγράφου παρουσιάζεται προσέγγιση των βέλτιστων συνθηκών και δεδομένων τόννευσης ανοξειδωτου χάλυβα 17-4 PH SS με χρήση cryogenic cooling [11]. Οι παράγοντες της κοπής που εξετάστηκαν είναι , η ταχύτητα κοπής, το βάθος κοπής, η πρόωση, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού, η τραχύτητα κατεργασμένης επιφανείας και η φθορά του κοπτικού. Λόγο της πληθώρας των δεδομένων που εξετάστηκαν, για την επιλογή των βέλτιστων έγινε χρήση των μεθόδων βελτιστοποίησης Taguchi (TGRA) και Taguchi (T-TOPSIS). Οι βέλτιστες συνθήκες που δίνονται από την πρώτη αποδειχτήκαν και οι σωστότερες για την ζητούμενη κατεργασία.

Κατά την διάρκεια της κατεργασίας χρησιμοποιήθηκε cryogenic coolant με ρυθμό ροής 0.45kg/min σε σταθερή απόσταση 25mm από το κατεργαζόμενο υλικό. Με αυτά τα δεδομένα υπολογίστηκε ότι από το ακροφύσιο 1mm το υγρό άζωτο προσδόθηκε σε πίεση 3.5bar . Τα δοκίμια 17-4 PH SS που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διάμετρο 35mm και μήκος 300mm . Χρησιμοποιήθηκε κοπτικό καρβίδιο με επικάλυψη PVD (AlTiN) KC5010 (Kennametal) με κατά ISO ονομασία SNMG12048 MP. Και στέλεχος με κατά ISO ονομασία PSBNR 2020 K12. Η επιλογή του κοπτικού έγινε βάση της ονομαστικής πρότασης της εταιρίας Kennametal. Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα των περιπτώσεων που μελετήθηκαν.

No. Test	Δεδομένα κοπής			Πειραματικά αποτελέσματα		
	V_c (m/min)	F (mm/rev)	A_p (mm)	R_a (μm)	V_{Bc} (μm)	MRR(g/min)
1	25	0.048	0.2	1.16	25	2.23
2	25	0.143	0.6	1.40	32	9.21
3	25	0.238	1	2.21	106	17.35
4	85	0.048	0.6	0.99	74	10.89
5	85	0.143	1	1.17	85	31.58
6	85	0.238	0.2	1.87	123	42.78
7	132	0.048	1	0.97	79	21.9
8	132	0.143	0.2	1.08	103	36.52
9	132	0.238	0.6	1.62	153	68.42

Σχήμα 4.17: Δεδομένα κοπής και πειραματικά αποτελέσματα (Πηγή: Performance improvement of cryogenic turning process during machining of 17-4 PH stainless steel using multi objective optimization techniques Potta Sivaiaha, D. Chakradharb)

Από τα παραπάνω δεδομένα και έπειτα από την εφαρμογή των τεχνικών βελτιστοποίησης προκύπτουν τα εξής βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας του 17-4 PH SS:

Βέλτιστες συνθήκες	V_c (m/min)	F (mm/rev)	A_p (mm)
Taguchi (TGRA)	132	0.048	0.2
Taguchi (T-TOPSIS)	132	0.143	0.2

Σχήμα 4.18: Βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας 17-4 PH SS (Πηγή: Performance improvement of cryogenic turning process during machining of 17-4 PH stainless steel using multi objective optimization techniques Potta Sivaiaha, D. Chakradharb)

- Στα βέλτιστα δεδομένα της (TGRA) βρέθηκε μείωση της τραχύτητας της κατεργαζόμενης επιφανείας 30.55% και μείωση της πλευρικής φθοράς του εργαλείου 25%. Ωστόσο παρατηρήθηκε μείωση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού κατά 22.48%.
- Στα βέλτιστα δεδομένα της (T-TOPSIS) βρέθηκε αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού κατά 45.36% , χωρίς μείωση της τραχύτητας της κατεργαζόμενης επιφανείας και με αύξηση της πλευρικής φθοράς του κοπτικού κατά 27.16%
- Η φθορά του κοπτικού και ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού παρουσίασαν αύξηση κατά την αύξηση της ταχύτητας κοπής, της πρόωσης και του βάθους κοπής
- Η χρήση cryogenic coolant μειώνει την θερμοκρασία στην ζώνη κοπής λόγω των ιδιοτήτων του υγρού αζώτου και αυξάνει την κατεργασιμότητα
- **Τα βέλτιστα δεδομένα της (TGRA) προτείνονται για την βέλτιστη κατεργασιμότητα του 17-4 PH SS**

4.2.3 Χυτοσίδηρος – Φαιός χυτοσίδηρος EN-GJL-250

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει παρουσίαση των ιδιοτήτων στην κατεργασιμότητα του χυτοσιδήρου και εκτενέστερη αναφορά και προσέγγιση βέλτιστων δεδομένων κατεργασιμότητας για τον φαιό χυτοσίδηρο EN-GJL-250.

Ο χυτοσίδηρος είναι ένα πολύ δημοφιλές υλικό και συναντάτε σε πολλές εφαρμογές για διάφορα εξαρτήματα. Είναι πολύ κοινό κατεργαζόμενο υλικό και χαρακτηρίζεται από μεγάλη κατεργασιμότητα. Σε αντίθεση με τους χάλυβες η κατεργασιμότητα του σιδήρου ποικίλει ανάλογα με την ποιότητα κατασκευής του, δεδομένο που κάνει τις μηχανικές ιδιότητες των χυτοσιδηρών να διαφέρουν ανάμεσα στους προμηθευτές. Για αυτό τον λόγο συχνά οι προτάσεις για βέλτιστες τιμές κατεργασιμότητας έχουν μεγαλύτερα εύρη από ότι αυτά των χάλυβων. Οι χυτοσίδηροι τείνουν να είναι ψαθυροί και δεν έχουν την ολκιμότητα που εμφανίζουν οι χάλυβες. Ωστόσο αυτά τους τα χαρακτηριστικά τους κάνουν να δίνουν επιθυμητά μικρού μήκους απόβλητα κατά την κοπή.

Ο φαιός χυτοσίδηρος (GCI) χαρακτηρίζεται από την γραφική του δομή και έχει μικρότερη σκληρότητα από τον χάλυβα. Ωστόσο έχει καλή αντίσταση στην πλαστική παραμόρφωση και χρησιμοποιείται συχνά για εδράσεις, μπλοκ και περιβλήματα κιβωτίων.

Ο οζώδης χυτοσίδηρος (NCI) σε αντίθεση με τον φαιό χυτοσίδηρο είναι σκληρότερο υλικό και παρουσιάζει καλή αντοχή σε φορτίσεις κόπωσης. Οι μηχανικές του ιδιότητες παρομοιάζουν αυτές του απλού χάλυβα αλλά η κατεργασιμότητα του είναι ανώτερη. Χρησιμοποιείται για γρανάζια και άξονες.

Ο ελαστικός χυτοσίδηρος (MCI) κατασκευάζεται από μια μακροχρόνια θερμική κατεργασία (διάρκειας ημερών). Λόγο αυτού παράγεται ένα αρκετά σκληρότερο υλικό με μικρότερη ευθραυστότητα και αντοχή σε κρουστικά φορτία (σε σύγκριση με τους προηγούμενους). Αυτά του τα χαρακτηριστικά όμως τον καθιστούν περί του 10% χειρότερο στην κατεργασιμότητα. Χρησιμοποιείται για μικρά εξαρτήματα βαλβίδες και μικρές βάσεις.

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν ερευνητικά δεδομένα κοπής-τόρνευσης σε τεμάχιο από έναν από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους φαιούς χυτοσιδήρους (GCI), τον EN-GJL-250. Πρόκειται για υλικό που κατηγοριοποιείται σύμφωνα με τις εταιρίες του κλάδου κοπής ως K1 και είναι το χαρακτηριστικό-βασικό υλικό της κατηγορίας. Χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία για κατασκευή πιστονιών, μπλοκ και δισκοφρένων καθώς και ως μηχανικό εξάρτημα για αντήλεις και γρανάζια. Παρουσιάζει καλή κατεργασιμότητα και αντοχή αλλά το κύριο χαρακτηριστικό του είναι η δυνατότητα να απορροφά αποτελεσματικά κραδασμούς. Η χημική του σύσταση καθώς και οι μηχανικές του ιδιότητες παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Φαιός χυτοσίδηρος (GCI)	Fe	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Ti	Co
EN-GJL-250	92.35	4	2.1	0.76	0.11	0.03	0.13	0.015	0.003

Σχήμα 4.19: Στοιχεία κραμάτωσης φαιού χυτοσιδήρου EN-GJL-250 (%wt.)

Φαιός χυτοσίδηρος (GCI)	Σκληρότητα	Πυκνότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Μέτρο ελαστικότητας
EN-GJL-250	180-240 HB	7.20g/cm ³	250MPa	110 GPa

Σχήμα 4.20: Μηχανικές ιδιότητες φαιού χυτοσιδήρου EN-GJL-250

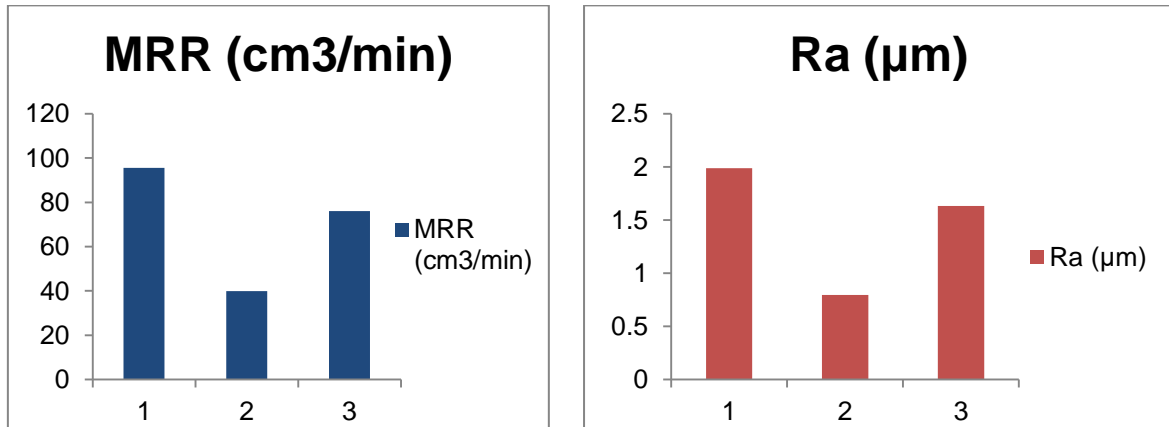
Σε έρευνα τόννευσης τεμαχίων EN-GJL-250 με χρήση κοπτικών πλακιδίων CBN (CBN με επικάλυψη TiN/PVD, CBN7050) [12] έγινε προσέγγιση των βέλτιστων παραμέτρων τόννευσης. Για να γίνει αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε πειραματική διαδικασία με χρήση της μεθόδου Taguchi, στατιστικών μεθόδων και μεθόδων βελτιστοποίησης με κριτήρια την βέλτιστη τιμή τραχύτητας επιφανείας Ra, τον μέγιστο ρυθμό αφαίρεσης υλικού MRR, της μικρότερες τιμές δυνάμεων κοπής Fx, Fy, Fz και καταναλωμένης ισχύς Pc. Τα δοκίμια σιδήρου είχαν διάμετρο 90mm και μήκος 400mm. Τα πειραματικά δεδομένα που εξετάστηκαν είναι στο εύρος: Vc=194-546 (m/min), για προώσεις f=0.08-0.28 (mm/rev) και βάθη κοπής ap=0.3-1.2 (mm).

Έπειτα από την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων προέκυψαν τα βέλτιστα δεδομένα που παρουσιάζονται παρακάτω.

NO	Βέλτιστες συνθήκες	V _c (m/min)	F (mm/rev)	Ap (mm)	Ra (μm)	MRR (cm ³ /min)
1	Max MRR	546	0.2	0.9	1.988	95.65

2	Min Ra	522	0.08	0.9	0.796	39.85
3	Συνδυασμός (1+2)	546	0.156	0.9	1.634	76.09

Σχήμα 4.21: Βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας φαιού χυτοσιδήρου EN-GJL-250 (Πηγή: Coated CBN cutting tool performance in green turning of gray cast iron EN-GJL-250: modeling and optimization Salim Chihaoui & Mohamed Athmane Yallese & Salim Belhadi & Ahmed Belbah & Khaoula Safi & Abdelkrim Haddad, 2020)



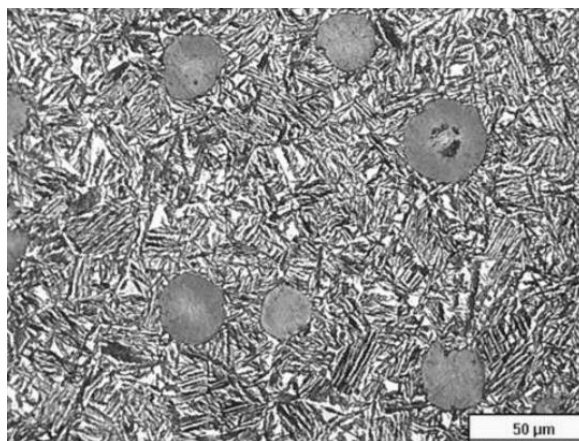
Σχήμα 4.22: Τιμές ρυθμού αφαίρεσης υλικού και τραχύτητας επιφανείας για τα παραπάνω δεδομένα (Πηγή: Coated CBN cutting tool performance in green turning of gray cast iron EN-GJL-250: modeling and optimization Salim Chihaoui & Mohamed Athmane Yallese & Salim Belhadi & Ahmed Belbah & Khaoula Safi & Abdelkrim Haddad, 2020)

Επιπλέον προσεγγίστηκαν τα βέλτιστα δεδομένα για μικρότερη κατανάλωση ενέργειας (μικρότερη καταναλωμένη ισχύ) και ως συνέπεια μικρότερες δυνάμεις κοπής τα οποία είναι:

- Ταχύτητα κοπής $V_c=546(\text{m/min})$, πρόωση $f=0.08(\text{mm/rev})$, βάθος κοπής $A_p=0.03(\text{mm})$. Με αυτά τα δεδομένα κοπής ή κατανάλωση είναι $P_c=214.4(\text{W})$ και η δύναμη κοπής $F_z=29(\text{N})$.

4.2.3 Ανοπτημένος όλκιμος σίδηρος (ADI)

Ο Ανοπτημένος όλκιμος σίδηρος (ADI) είναι όλκιμος σίδηρος που έχει υποστεί ανόπτηση για βελτίωση των μηχανικών του ιδιοτήτων. Αυτή η διαδικασία αυξάνει αρκετά την αντοχή του υλικού καθώς και την αντίσταση σε φθορά. Επιπλέον προσδίδει στο υλικό ηχομονωτικές δυνατότητες. Αυτές οι αυξημένες δυνατότητες του ADI μπορούν να επιτευχθούν με χαμηλό κόστος καθώς η ανόπτηση του δεν είναι εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία. Στον τομέα της κατεργασιμότητας όμως ο ADI διαφέρει από τον απλό όλκιμο σίδηρο και συγκρίνεται με ρυθμούς αφαίρεσης υλικού του σκληρυμένου χάλυβα 36CrNiMo4 | 1.6511. [13]



Σχήμα 4.23: Μικροδομή ADI (Grade 1) (Πηγή: [14] Designing with Austempered Ductile Iron (ADI) J. R. Keough and K. L. Hayrynen, Applied Process Inc. Technologies Division, Livonia, MI, G. L. Pioszak, University of Michigan)

Οι μηχανικές ιδιότητες των ADI διαφέρουν ανάλογα με τις παραμέτρους της διαδικασίας ανόπτησης που έχουν υποστεί. Επομένως χωρίζονται σε 5 υποκατηγορίες-κλάσεις. Όσον αφορά τα στοιχεία κραμάτωσης των ADI καθώς και τις μηχανικές του ιδιότητες αυτά κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές που παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Ανοπτημένοι όλκιμοι σίδηροι	C	Si	Mn	Mg	P	S	Cu	Fe
ADI	3.2- 3.7	2.2- 2.8	0.1- 0.2	0.03- 0.04	0.005- 0.04	0.005- 0.02	<0.4	Bal

Σχήμα 4.24: Στοιχεία κραμάτωσης ανοπτημένων όλκιμων σιδήρων (ADI) (%wt.)

Ανοπτημένοι όλκιμοι σίδηροι (ADI)	Σκληρότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Ποσοστό επιμήκυνσης
	240-504 HB	750- 1600MPa	1-11 %

Σχήμα 4.25: Μηχανικές ιδιότητες ανοπτημένων όλκιμων σιδήρων (ADI)

Παρουσίαση περίπτωσης: ονομαστικών βέλτιστων συνθηκών (economy, MRR) για τόννευση του ανοπτημένου όλκιμου σιδήρου (ADI) κατηγορίας-κλάσης “Grade 3” (EN 1561, EN-JS1120) και μηχανικές ιδιότητες:

EN-JS1120/ EN-GJS- 1200-2	Σκληρότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Ποσοστό επιμήκυνσης	Πυκνότητα
	388 HB	1200MPa	2 %	7.1 g/cm ³

Σχήμα 4.26: Μηχανικές ιδιότητες EN-JS1120

Για τόννευση δοκιμίου EN-JS1120 διαμέτρου 60mm δίνεται ονομαστικά από την Seco tools :

Προς κατεργασία τεμάχιο	Κατασκευ αστής	Κωδικός κοπτικού	Αρχικές τιμές συνθηκών		
			Βάθος κοπής, mm	Πρόωση, mm/rev	Ταχύτητα κοπής, v _c , m/min

EN-JS1120/ EN-GJS-1200-2	Seco	TK1501	1	0.8	145
-----------------------------	------	--------	---	-----	-----

Σχήμα 4.27: Προτεινόμενα δεδομένα κοπής EN-JS1120 (Πηγή: Seco tools)

Όσον αφορά τις κατηγοριοποιήσεις των εταιριών που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2, ο όλκιμος σιδήρος EN-GJS-1200-2 κατηγοριοποιείται:

- Στο cMC της Sandvik Coromant ως K5.2.C.NS
- Στο SMG της Seco Tools στην υποκατηγορία K5
- Στο Beyond material group της Kennametal στην υποκατηγορία K3

Στην συνέχεια της παραγράφου παρουσιάζεται προσέγγιση των βέλτιστων συνθηκών και δεδομένων τórνευσης ανοπτημένου όλκιμου σιδήρου (ADI) με χρήση κοπτικού πλακιδίου βολφραμίου. [15] Οι παράγοντες της κοπής που εξετάστηκαν είναι , η ταχύτητα κοπής, το βάθος κοπής, η πρόωση, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού και η τραχύτητα κατεργασμένης επιφανείας. Για την εξακρίβωση των βέλτιστων συνθηκών έγινε χρήση της μεθόδου βελτιστοποίησης Taguchi καθώς και της στατιστικής μεθόδου ANOVA. Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα των περιπτώσεων που μελετήθηκαν. *Η ταχύτητα κοπής μετατράπηκε βάση του τύπου της παραγράφου 3.1.5 από rpm σε m/min.

No. Test	Δεδομένα κοπής			Πειραματικά αποτελέσματα	
	V _c (m/min)	F (mm/rev)	Ap (mm)	Ra (μm)	MRR(g/min)
1	94.2	0.5	0.051	0.50	38.68
2	94.2	0.75	0.102	0.66	80.47
3	94.2	1	0.159	0.84	122.21
4	145.1	0.75	0.051	0.72	23.18
5	145.1	1	0.102	0.88	79.15
6	145.1	0.5	0.159	1.01	132.12
7	226.2	1	0.051	1.01	10.90
8	226.2	0.5	0.102	1.25	52.96
9	226.2	0.75	0.159	1.43	58.27

Σχήμα 4.28: Δεδομένα κοπής και πειραματικά αποτελέσματα (Πηγή: Optimization of turning process parameters in machining of heat treated ductile iron bar using Taguchi technique. K.Ramesha, S. Prathap Singha, K.Gnanasekarana, A.Sathish Kumara, India)

Με την ανάλυση των παραπάνω πειρατικών αποτελεσμάτων προκύπτει ότι οι βέλτιστες συνθήκες τórνευσης για αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού και μείωση της τραχύτητας κατεργασμένης επιφανείας αντίστοιχα είναι:

Βέλτιστες συνθήκες	V _c (m/min)	F (mm/rev)	Ap (mm)
Max MRR	94.2	0.5	0.159
Min Ra	145.1	1	0.051

Σχήμα 4.29: Βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας ανοπτημένου όλκιμου σιδήρου (ADI) (Πηγή: Optimization of turning process parameters in machining of heat treated ductile iron bar using Taguchi technique. K.Ramesha, S. Prathap Singha, K.Gnanasekarana, A.Sathish Kumara, India)

- Στην περίπτωση μεγιστοποίησης του ρυθμού αφαίρεσης υλικού παρατηρείται ότι η πρόωση έχει το μεγαλύτερο αντίκτυπο της τάξης του 70.32%

- Στην περίπτωση μείωσης της τραχύτητας της κατεργασμένης επιφανείας η ταχύτητα κοπής είχε τον μεγαλύτερο αντίκτυπο με ποσοστό 56.45%

4.2.4 Μη σιδηρούχα μεταλλικά υλικά

Τα μη σιδηρούχα μεταλλικά υλικά όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό δεν περιέχουν σίδηρο (Fe). Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα οι μηχανικές τους ιδιότητες, η κατεργασιμότητα, καθώς και το κόστος τους να διαφέρει από τα σιδηρούχα υλικά. Έχουν στην πλειοψηφία τους μικρότερη αντοχή από τους χάλυβες (εκτός από χαλκούς υψηλής αντοχής). Ωστόσο μπορούν να κατεργαστούν πιο εύκολα γρήγορα και οικονομικά. Ως μη σιδηρούχο υλικό το αλουμίνιο είναι αρκετά ελαφρύ και οικονομικό στην κατεργασία του. Ο χαλκός και ο ορείχαλκος είναι υλικά με την μεγαλύτερη κατεργασιμότητα της κατηγορίας και χαρακτηρίζονται για την εξαιρετική τους αγωγιμότητα. Ο ψευδάργυρος εμφανίζει μεγάλη αντοχή στην διάβρωση.

4.2.5 Αλουμίνιο-Κράματα αλουμινίου

Πιο συγκεκριμένα το αλουμίνιο είναι ένα από τα πιο δημοφιλή προς κατεργασία υλικά σήμερα. Είναι μαλακό, μη μαγνητικό και όλκιμο μέταλλο. Το αλουμίνιο έχει το ένα τρίτο της πυκνότητας του χάλυβα αλλά είναι αρκετά ανθεκτικό. Αυτή η πολύ καλή σχέση βάρους αντοχής το κάνει ιδανικό για χρήσεις σε πληθώρα εφαρμογών καθημερινών εφαρμογών αλλά και σε πιο ειδικευμένες εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία και στον τομέα της αεροδιαστημικής. Ακόμα, παρουσιάζει ηλεκτρική αγωγιμότητα και έχει αντοχή σε διάβρωση και σε γρατσουνιές. Η κατεργασιμότητα του είναι εύκολη επειδή είναι μαλακό υλικό και δημιουργεί εύκολα απόβλητο. Επίσης είναι φθινό υλικό στην αγορά αλλά και στην κατεργασία καθώς χρειάζεται μικρή ενέργεια για να κοπεί. Τέλος παραμορφώνεται ελάχιστα κατά την κατεργασία και έτσι μπορούν να επιτευχθούν πολύ ακριβείς κοπές από τα μηχανήματα CNC. Αρνητικό του είναι το χαμηλό σημείο τήξης που το καθιστά ακατάλληλο για εφαρμογές σε περιβάλλοντα υψηλών θερμοκρασιών. Παρόλα αυτά, το αλουμίνιο δεν κατεργάζεται συνεχώς στην καθαρή του μορφή καθώς πληθώρα κραμάτων αλουμινίου παρουσιάζουν ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες. Κράματα με μαγγάνιο, χαλκό και μαγνήσιο είναι τα πιο κοινά. Τέλος συνθετικά υλικά (MCC) αλουμινίου σε συνδυασμό με καρβίδιο του πυριτίου (SiC/Al) απαντώνται όλο και πιο συχνά σε εξαρτήματα προηγμένης τεχνολογίας στην αεροδιαστημική σε κάτοπτρα laser και σε έδρανα δορυφόρων. Αυτά τα συνθετικά εμφανίζουν εξαιρετικά αυξημένες μηχανικές ιδιότητες οι οποίες μάλιστα μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα με τις ανάγκες, τροποποιώντας τα σωματίδια ενίσχυσης από SiC. Οι αυξημένες μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου συνθετικού υλικού αλλάζουν σημαντικά τα στοιχεία κατεργασιμότητας του υλικού.

4.3.6 Κράμα αλουμινίου 7075 και MCC

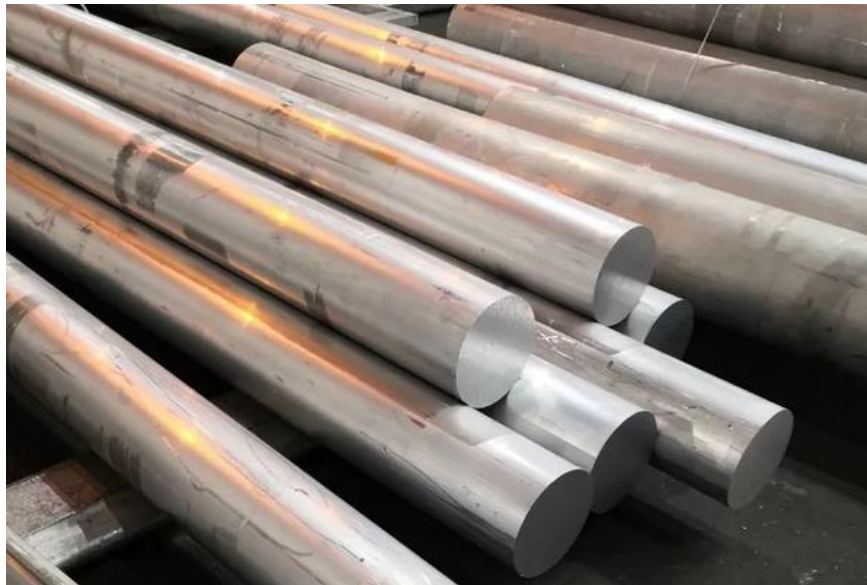
Παρακάτω παρουσιάζεται προσέγγιση των βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας για το κράμα αλουμινίου 7075 Al alloy (DIN AlZnMgCu 1.5 / EN AW – 7075 / 3.4365) και το συνθετικό υλικό 7075 Al alloy + 10% (wt%) SiC.

Κράμα αλουμινίου	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
7075	0.4	0.5	1.2-2	0.3	2.1-2	0.18-0.28	5.1-6.1	0.2	Bal

Σχήμα 4.30: Στοιχεία κραμάτωσης 7075 Al alloy (%wt.)

Κράμα αλουμινίου	Σκληρότητα	Πυκνότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Μέτρο ελαστικότητας	Σημείο τήξης
7075	<158 HB	2.81g/ cm ³	572MPa	71.7 GPa	477°C

Σχήμα 4.31: Μηχανικές ιδιότητες 7075 Al alloy



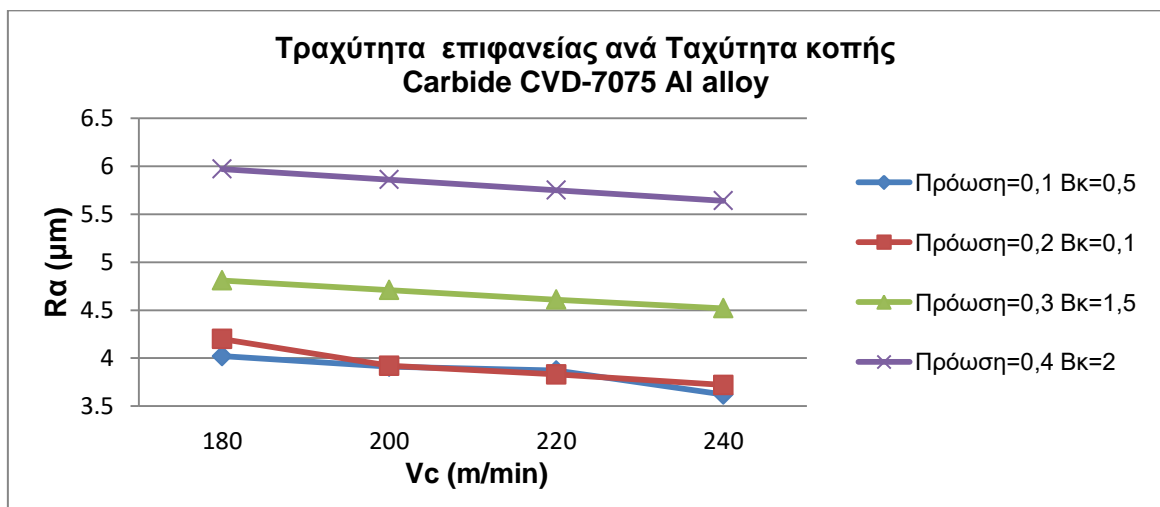
Σχήμα 4.32: 7075 Al (Πηγή: greek.aluminium-bar.com)

Κατά την πειραματική διαδικασία [16] έγινε τόννευση δοκιμών 7075 Al alloy και 7075 Al alloy + 10% (wt%) SiC διαμέτρου 27mm και μήκους 100mm. Λόγο προγενέστερων ερευνών εξετάστηκαν κοπτικά πολυκρυσταλλικού διαμαντιού (PCD) χωρίς επικάλυψη λόγω των της καλής κατεργασιμότητας που εμφανίζουν με το κράμα και κοπτικά τσιμεντοειδή καρβίδια (WC-Co) με επικάλυψη CVD (TiN) λόγω του φθηνότερου κόστους τους. Οι κωδικοί των κοπτικών είναι: PCD Insert VCMW 160404 FN, Carbide insert CNMG 120408EM grade 6630 με κατάλληλα στελέχη συγκράτησης: PCLNL 2525 M12 KT 809 , SVJBL 2525 M16 WIDAX αντίστοιχα.

Υλικό	Δεδομένα κοπής			Carbide CVD	PCD
	F (mm/rev)	Ap (mm)	V _c (m/min)	Ra (μm)	Ra (μm)
7075 Al alloy	0.1	0.5	180	4.02	2.73
			200	3.91	2.61
			220	3.87	2.52
			240	3.62	2.40
	0.2	1	180	4.20	2.84
			200	3.92	2.73
			220	3.83	2.62
			240	3.72	2.51
	0.3	1.5	180	4.81	3.22
			200	4.71	3.11
			220	4.61	2.99
			240	4.52	2.88
	0.4	2	180	5.97	3.63
			200	5.86	3.52
			220	5.75	3.43
			240	5.64	3.32
7075 Al alloy + 10% (wt%) SiC	0.1	0.5	180	4.33	2.84
			200	4.17	2.74
			220	4.07	2.65
			240	3.93	2.51

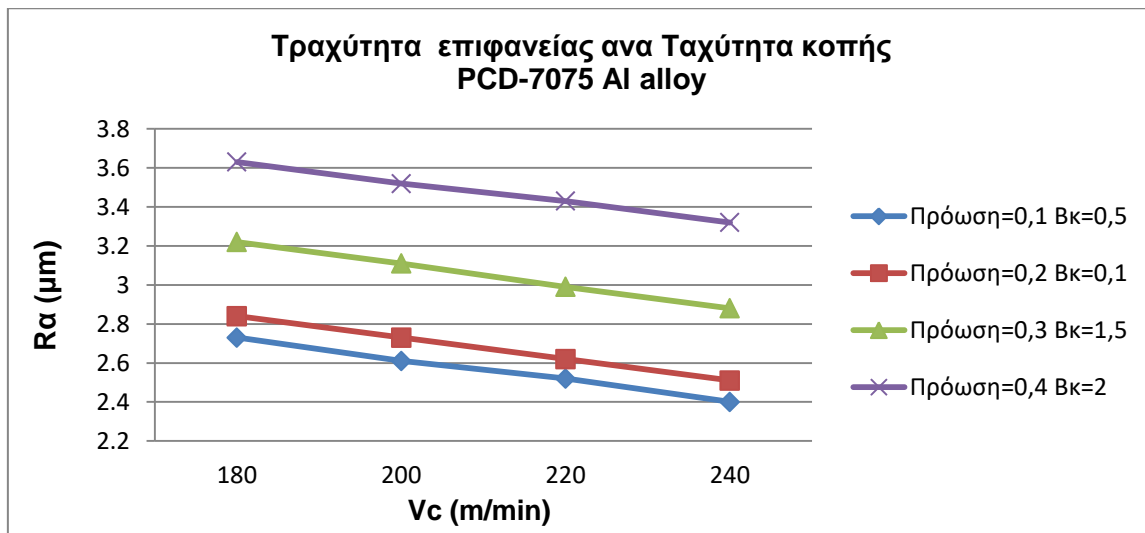
	0.2	1	180	4.44	2.94
			200	4.29	2.84
			220	4.18	2.74
			240	4.05	2.62
	0.3	1.5	180	5.35	3.54
			200	5.23	3.44
			220	5.13	3.32
			240	5.02	3.21
	0.4	2	180	6.22	3.99
			200	6.13	3.85
			220	6.02	3.73
			240	5.91	3.61

Σχήμα 4.33: Δεδομένα κοπής και πειραματικά αποτελέσματα (Πηγή: Effect of machining parameters on surface roughness and tool wear for 7075 Al alloy SiC composite, Rajesh Kumar Bhushan & Sudhir Kumar & S. Das, 2010 India)



Σχήμα 4.34: Τραχύτητα επιφανείας ανά Ταχύτητα κοπής CVD-7075 Al alloy (Πηγή: Effect of machining parameters on surface roughness and tool wear for 7075 Al alloy SiC composite, Rajesh Kumar Bhushan & Sudhir Kumar & S. Das, 2010 India)

Όπως φαίνεται από το παραπάνω γράφημα κατά την τόννευση του κράματος 7075 AL alloy με χρήση του τσιμεντοειδούς καρβιδίου, καλύτερες τιμές τραχύτητας επιφανείας επιτυγχάνονται σε μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής ενώ αρνητικά στην τραχύτητα επιδρούν η μεγαλύτερη πρόωση και το βάθος κοπής. Το ίδιο ισχύει και για το πολυκρυσταλλικό διαμάντι. Στην περίπτωση του κοπτικού από διαμάντι όμως οι τιμές τραχύτητας επιφανείας εμφανίζονται αρκετά ανώτερες γεγονός που αποδεικνύει την σαφέστατα καλύτερη κατεργασιμότητα του υλικού με κοπτικά PCD.



Σχήμα 4.35: Τραχύτητα επιφανείας ανά ταχύτητα κοπής PCD-7075 Al alloy (Πηγή: Effect of machining parameters on surface roughness and tool wear for 7075 Al alloy SiC composite, Rajesh Kumar Bhushan & Sudhir Kumar & S. Das, 2010 India)

Όσον αφορά την πλευρική φθορά (Flank wear) των δύο κοπτικών κατά την συνεχόμενη κοπή 7 λεπτών του συνθετικού 7075 Al alloy + 10% (wt%) SiC παρατηρήθηκαν μέγιστες τιμές $\max V_b=0.0102\text{mm}$ για το κοπτικό από PCD και $\max V_b=0,54\text{mm}$ για τα κοπτικά από τσιμεντοειδές καρβίδιο. Στην περίπτωση του τσιμεντοειδές καρβιδίου η τιμή $V_b=0,54\text{mm}$ το καθιστά κατά ISO 3685 άνω του ορίου πλευρικής φθοράς για συνέχιση της κατεργασίας γεγονός που αποδεικνύει την μικρή διάρκεια ζωής των κοπτικών (WC-Co) κατά την κατεργασία του συνθετικού αλουμινίου.

Τελικά δεδομένα κατεργασιμότητας 7075 Al alloy και του συνθετικό υλικό 7075 Al alloy + 10% (wt%) SiC :

- Η τιμή της επιφανειακής τραχύτητας μετά από τόννευση του κράματος αλουμινίου είναι μικρότερη από αυτή του συνθετικού αλουμινίου τόσο για το κοπτικό καρβίδιο όσο και για το PCD.
- Η φθορά και των δύο τύπων κοπτικών είναι μικρότερη κατά την τόννευση του κράματος σε σύγκριση με την τόννευση του συνθετικού
- Η φθορά του PCD είναι μικρότερη από του καρβιδίου κατά την τόννευση του συνθετικού
- Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι οι βέλτιστες τιμές κατεργασιμότητας του συνθετικού 7075 Al alloy + 10% (wt%) SiC είναι

7075 Al alloy + 10% (wt%) SiC	Είδος	V_c (m/min)	F (mm/rev)	A_p (mm)
WC-Co CVD	Βέλτιστη τραχύτητα επιφανείας	180-220	0.1-0,3	0.5-1.5
	Βέλτιστες τιμές φθοράς εργαλείου	<200	0.1	0.5
PVD	Γενική	>220	<0.2	<0.1

Σχήμα 4.36: Βέλτιστα στοιχεία κατεργασιμότητας 7075 Al alloy + 10% (wt%) SiC (Πηγή: Effect of machining parameters on surface roughness and tool wear for 7075 Al alloy SiC composite, Rajesh Kumar Bhushan & Sudhir Kumar & S. Das, 2010 India)

Στην συνέχεια θα γίνει παρουσίαση των βέλτιστων δεδομένων κατεργασιμότητας (economy and MRR) για τόννευση, που προτείνουν οι εταιρείες κατασκευαστές κοπτικών για το 7075 Al alloy και δοκίμιο διαμέτρου 27mm και μήκους 100mm-μείωση διαμέτρου κατά 10mm.

Προς κατεργασία τεμάχιο	Κατασκευαστής	Κωδικός κοπτικού	Αρχικές τιμές συνθηκών		
			Βάθος κοπής, mm	Πρόωση, mm/rev	Ταχύτητα κοπής, v_c , m/min
7075 Al alloy / 3.4365	Sandvik	U.C. H10	2.5	0.554	276
	Seco	U.C. 883	2.5	0.8	200

Σχήμα 4.37: Προτεινόμενα δεδομένα κοπής 7075 Al alloy (Πηγή: Sandvik Coromant, Seco tools)

Όσον αφορά τις κατηγοριοποιήσεις των εταιριών που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2, το κράμα αλουμινίου 7075

- Στο cMC της Sandvik Coromant ως N1.3.C.AG
- Στο SMG της Seco Tools στην υποκατηγορία N1
- Στο Beyond material group της Kennametal στην υποκατηγορία N1

4.2.7 Κράματα ορειχάλκου

Τα κράματα ορειχάλκου χαρακτηρίζονται από υψηλή δυνατότητα κατεργασίας. Παρουσιάζουν υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, αντίσταση στην οξείδωση και εξαιρετικά καλές αντιβακτηριδιακές ιδιότητες. Για αυτά τους τα χαρακτηριστικά τα κράματα ορειχάλκου είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα σε πολλούς κλάδους, όπως στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας, των ηλεκτρονικών και της υγείας. Για να αύξηση της κατεργασιμότητας των κραμάτων ορειχάλκου είναι κοινή η χρήση μόλυβδου (Pb), ο οποίος προσδίδει εξαιρετική αποκόλληση αποβλήτου, χαμηλή φθορά κοπτικού και ευπροσάρμοστα δεδομένα κοπής. Για τα κράματα ορειχάλκου με πυρίτιο η φθορά κοπτικού είναι μεγαλύτερη, ενώ σε άλλες περιπτώσεις κραμάτων ορειχάλκου με μικρή περιεκτικότητα μόλυβδου υπάρχει σχηματισμός αποβλήτων μεγάλου μήκους κατά την τόννευση, σε συνδυασμό με μεγάλες θερμοκρασίες στην ζώνη κοπής και υψηλά φορτία. Η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών και δεδομένων κοπής είναι κρίσιμη διαδικασία ώστε να επιτευχθεί η καλή κατεργασιμότητα που γενικά εμφανίζουν τα κράματα ορειχάλκου.

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν οι συνθήκες κατεργασιμότητας του κράματος ορειχάλκου CuZn39Pb3 (CW614N-brass 583). Το συγκεκριμένο κράμα θεωρείται ως το ορόσημο όσον αφορά την κατεργασιμότητα κραμάτων ορειχάλκου και παρουσιάζει εξαιρετική κατεργασιμότητα. Είναι ιδανικό για κατεργασίες σε εργαλειομηχανές και για αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται σε πληθώρα εξαρτημάτων και μικρο-εξαρτημάτων που παράγονται από αυτές. Επιπλέον χρησιμοποιείται και σε εφαρμογές όπου η ηλεκτρική του αγωγιμότητα δεν είναι ζητούμενη. Η αντοχή του χαρακτηρίζεται ως μέτρια ενώ η αντίσταση σε οξείδωση καλή. Οι μηχανικές του ιδιότητες όπως και τα στοιχεία κραμάτωσης του παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Κράμα ορειχάλκου	Ni	Fe	Al	Cu	Pb	Sn	Others	Zn
CuZn39Pb3	<0.3	<0.3	<0.5	57-59	2.5-3.5	<0.3	0.2	Bal

Σχήμα 4.38: Στοιχεία κραμάτων CuZn39Pb3 (%wt.)

Κράμα ορειχάλκου	Σκληρότητα	Πυκνότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Μέτρο ελαστικότητας	Σημείο τήξης
CuZn39Pb3	130 HB	8.5 g/ cm ³	~400MPa	96 GPa	890°C

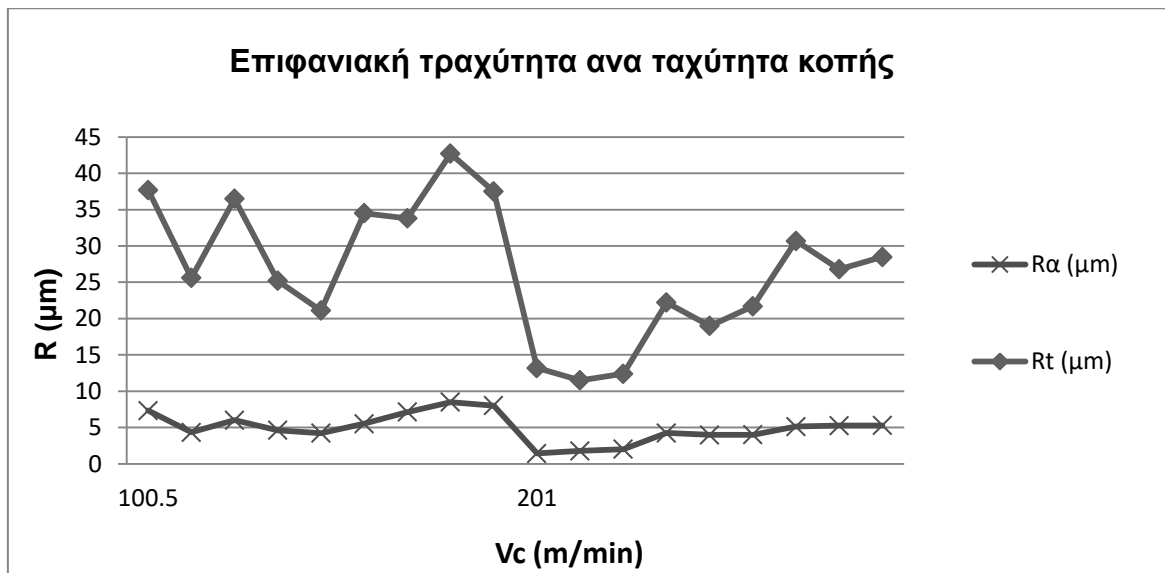
Σχήμα 4.39: Μηχανικές ιδιότητες CuZn39Pb3

Για την καταγραφή των βέλτιστων δεδομένων κατεργασιμότητας [17] χρησιμοποιήθηκε τυπικός τόννος, κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 40mm και μήκους 150mm . Η κοπή έγινε σε μήκος 20mm και έγινε χρήση κοπτικού τσιμεντοειδή καρβιδίου με επικάλυψη CVD της Seco tools με κωδικό TNMG 160404 – MF2 τύπου TP 2000. Για εξακρίβωση των βέλτιστων στοιχείων κατεργασιμότητας έγινε χρήση της μεθόδου βελτιστοποίησης Taguchi σε πίνακα 18 περιπτώσεων (ταχύτητα κοπής, βάθος κοπής και πρόωση) καθώς και στατιστικών μεθόδων παλινδρόμησης. Τα μεγέθη που μετρήθηκαν είναι η ολική τραχύτητα επιφανείας (Rt), η μέση τραχύτητα επιφανείας (Ra), και η κύρια δύναμη κοπής (Fc). Τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζονται παρακάτω.

No. Test	Δεδομένα κοπής			Πειραματικά αποτελέσματα		
	V _c (m/min)	F (mm/rev)	Ap (mm)	Ra (μm)	Rt (μm)	Fc(N)
1	100.5	0.10	1.5	7.34	37.7	200
2	100.5		1	4.33	25.6	160
3			0.5	6.02	36.5	90
4		0.18	1.5	4.62	25.2	130
5			1	4.23	21.1	120
6			0.5	5.52	34.5	80
7		0.33	1.5	7.14	33.8	165
8			1	8.51	42.7	160
9			0.5	8.02	37.5	100
10	201	0.10	1.5	1.44	13.2	160
11	201		1	1.78	11.5	130
12			0.5	2.03	12.4	85
13		0.18	1.5	4.24	22.2	170
14			1	3.99	19.0	150
15			0.5	4.00	21.7	100
16		0.33	1.5	5.13	30.7	190
17			1	5.26	26.8	150
18			0.5	5.28	28.5	110

Σχήμα 4.40: Δεδομένα κοπής και πειραματικά αποτελέσματα (Πηγή: Experimental investigation of machinability parameters in turning of CuZn39Pb3 brass alloy N.M. Vaxevanidis, A. Fountas, A. Koutsomichalis, J.D. Kechagias, 2018 Greece)

*Η ταχύτητα κοπής μετατράπηκε βάση του τύπου της παραγράφου 3.1.5 από rpm σε m/min



Σχήμα 4.41: Τιμές τραχύτητας επιφανείας ανά ταχύτητα κοπής (Πηγή: Experimental investigation of machinability parameters in turning of CuZn39Pb3 brass alloy N.M. Vaxevanidis, N.A. Fountas, A. Koutsomichalis, J.D. Kechagias, 2018 Greece)

Όπως παρατηρείται από το γράφημα η ταχύτητα κοπής είναι ο βασικός παράγοντας που παίζει ρόλο στην τραχύτητα επιφανείας, τόσο στην μέση όσο και στην ολική τιμή.

Ακόμα παρατηρείται από τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα ότι βέλτιστοι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την κατεργασία του κράματος ορειχάλκου CuZn39Pb3 για βέλτιστη τραχύτητα επιφανείας είναι ($V_c=201$, $F=0.10$, $A_p=1-1.5$)

Για ελαχιστοποίηση της δύναμης κοπής παρατηρείται ότι πρέπει να γίνει χρήση μικρών τιμών πρόωσης και βάθους κοπής με βέλτιστες συνθήκες τις ($V_c=100.5$, $F=0.18$, $A_p=0.5$) και ($V_c=201$, $F=0.10$, $A_p=0.5$). Βέβαια αυτές οι τιμές θα δίνουν και αναμενόμενα μικρές τιμές ρυθμού αφαίρεσης υλικού.

Τα πειραματικά δεδομένα μετά από ανάλυση παλινδρόμησης έδειξαν ότι το βάθος κοπής είναι ο κυρίαρχος παράγοντας (73,61%) για την κύρια δύναμη κοπής, η ταχύτητα κοπής καθώς και η τιμή της πρόωσης έχουν παρόμοια ποσοστά σημαντικότητας όσον αφορά την ποιότητα επιφανείας με 38.85% και 32.25% αντίστοιχα.

4.2.8 Υπέρ κράματα ανθεκτικά στην υψηλή θερμοκρασία (HRSA)

Αμέσως από την δημιουργία τους αρκετά χρόνια πριν, η κατεργασία τους αποτελούσε πρόκληση για τους μηχανικούς. Η ανάπτυξη όμως των τεχνικών και των μεθόδων κατεργασίας κάνει στο σήμερα δυνατή, οικονομική και αποδοτική την διαχείρισή τους.

Τα (HRSA) είναι μία ομάδα υλικών τα οποία εμφανίζουν εξαιρετική αντοχή και αντίσταση φθοράς ακόμα και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Αυτές τους οι ιδιότητες τα κάνουν ιδανικά για χρήση σε περιβάλλοντα με υψηλές θερμοκρασίες και απαιτήσεις χημικής σταθερότητας. Χρησιμοποιούνται σε μηχανές jet, εξοπλισμό για εξόρυξη και μεταφορά ορυκτών καυσίμων καθώς και ιατρικά μοσχεύματα.

Χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες ανάλογα με το κύριο στοιχείο κράματός τους. Και οι τρεις υποκατηγορίες μοιράζονται εξαιρετική θερμική και χημική αντοχή, με την κάθε υποκατηγορία να είναι καλύτερη ή χειρότερη σε επιμέρους ιδιότητες, γεγονός που την καθιστά βέλτιστη για διαφορετικές εφαρμογές

Οι τρεις κατηγορίες είναι: τα υπέρ κράματα βασισμένα στο νικέλιο (Ni), εκείνα στον σίδηρο (Fe) και εκείνα στο κοβάλτιο (Co). Τα πιο δημοφιλή (HRSA) κατασκευάζονται από λίγες εταιρίες και πρόκειται για τυποποιημένες ονομασίες και αποκλειστικότητα κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, τα Inconel/ Incoloy/ Nimonic/ Monel/ Udimet της Special Metals Corporations, τα Hasteloy/ Haynes/ Ultimet της Haynes International, τα Stellite της Kennametal και τα Wspaloy της Raytheon Technologies.

Λόγο της ικανότητας αυτών των κραμάτων να αποδίδουν κοντά στο σημείο τήξης των βασικών τους μετάλλων η κατεργασιμότητα τους ποικίλει, αλλά χαρακτηρίζεται γενικά ως μικρή. Χρειάζεται περίπου διπλή ισχύς για την κατεργασία ενός HRSA από ότι ενός ελαφρώς κραματοποιημένου χάλυβα. Το ίδιο ισχύει και για την ειδική δύναμη κοπής που αυξάνεται κατά περίπου 80%. Η μικρή θερμική αγωγιμότητα των HRSA έχει ως αποτέλεσμα η απαγωγή θερμότητας από την ζώνη κοπής να γίνεται ως επί το πλείστον προς το κοπτικό εργαλείο και η ιδιαίτερη αντοχή του κατεργαζόμενου υλικού σε συνδυασμό με τα υψηλά ποσά ενέργειας δημιουργεί στο κοπτικό πληθώρα ειδών φθοράς που οδηγούν σε αστοχίες. Τα HRSA πρέπει να κατεργάζονται από κοπτικά με θετικές γωνίες κοπής.

4.2.9 HRSA- Κράμα Inconel 625

Το Inconel 625 (DIN NiCr22Mo9Nb) είναι HRSA με βάση το νικέλιο Ni. Είναι ανάμεσα στα πιο σκληρά και ανθεκτικά HRSA πράγμα που το κάνει δύσκολα κατεργάσιμο. Δημιουργήθηκε την δεκαετία του 1960 με σκοπό την χρήση του σε αγωγούς ατμού και έχει υποστεί αλλαγές στην κραμάτωση του μέχρι σήμερα. Έχει εφαρμογές σε υποθαλάσσια εξαρτήματα, εξαρτήματα διαχείρισης χημικών εξατμίσεις μηχανών jet και φούρνους βρασμού.

Inconel 625	Ni	Cr	Mo	Fe	Al	Ti	C	Others
	58-61	20-23	8-10	<5	<0.4	<0.4	<0.1	~2

Σχήμα 4.42: Στοιχεία κραμάτωσης Inconel 625 (%wt.)

Inconel 625	Σκληρότητα	Πυκνότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Μέτρο ελαστικότητας	Σημείο τήξης
	271 HB	8.44 g/cm ³	~700-1600MPa	205,8 GPa	~1350°C

Σχήμα 4.43: Μηχανικές ιδιότητες Inconel 625

Έχει ερευνηθεί ότι για την κατεργασιμότητα του Inconel 625 κοπτικά τσιμεντοειδή καρβίδια με επικάλυψη τύπου PVD TiAlN παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση [18]. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βέλτιστες συνθήκες κατεργασιμότητας που προέκυψαν μετά την χρήση της μεθόδου Taguchi για τόννευση δοκιμών Inconel 625 διαμέτρου 30mm και μήκους 400mm με την χρήση κοπτικού CNMG 120408UP KCM25 της Kennametal και στελέχους PCLNR 2525 M12. Για ταχύτητες κοπής $V_c=75,85,95(m/min)$, για προώσεις $f=0.103, 0.146, 0.205 (mm/rev)$ και βάθη κοπής $a_p=0.2, 0.25, 0.3 (mm)$ μετρήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα μέσης τραχύτητας επιφανείας R_a και δύναμης κοπής F_y .

Από τα πειραματικά αποτελέσματα [19] και έπειτα από χρήση της μεθόδου Taguchi προκύπτουν ως βέλτιστοι παράμετροι κατεργασίας του κράματος Inconel 625 για ποιότητα επιφανείας και μικρότερη δύναμη κοπής οι :

Δεδομένα	$V_c (m/min)$	$F (mm/rev)$	$A_p (mm)$	$F_y (N)$	$R_a (\mu m)$
----------	---------------	--------------	------------	-----------	---------------

κατεργασιμότητας					
Inconel 625	75	0.103	0,2	157.62	0.217

Σχήμα 4.44: Βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας Inconel 625 (Πηγή: Optimization of Machining Parameter in Turning Inconel 625 Satyanarayana Kosarajua, Vijay Kumar Mb, Sateesh Nc, 2017 India)

Από την στατιστική ανάλυση της παραπάνω έρευνας προκύπτει ότι η ταχύτητα κοπής είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για την κατεργασιμότητα του Inconel 625. Μικρή ταχύτητα κοπής δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα ενώ η μικρή αύξηση του βάθους κοπής και της πρόωσης δεν αλλάζει δραματικά την ποιότητα της κόψης και θα μπορούσε να είναι καλή εναλλακτική για αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού αν οι τιμές της Ra ήταν εντός των επιθυμητών πλαισίων.

4.2.10 HRSA- Κράμα Incoloy 800

Το Incoloy 800 (DIN X10NiCrAlTi3220) είναι HRSA με βάση τον σίδηρο Fe. Τα HRSA βασισμένα στον σίδηρο είναι μία οικονομική εναλλακτική εκείνων βασισμένα στο νικέλιο. Έχουν παρόμοιες αλλά ελαφρά κατώτερες δυνατότητες από τα προηγούμενα αλλά διατίθενται σε πολύ μικρότερο κόστος. Χρησιμοποιούνται σε λιγότερο κρίσιμες εφαρμογές όπου χρειάζονται αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες και η κατεργασιμότητα τους είναι ανώτερη από εκείνη των κραμάτων κοβαλτίου και νικελίου. Χρησιμοποιείται σε εναλλάκτες θερμότητας, θερμικά στοιχεία και σωληνώσεις πυρηνικών εργοστασίων.

Incoloy 800	Fe	Ni	Cr	Fe	Al	Ti	Mn	Others
	>39.5	30-35	19-23	<5	<0.6	<0.6	<1.5	Rest

Σχήμα 4.45: Στοιχεία κραμάτωσης Incoloy 800 (%wt.)

Incoloy 800	Σκληρότητα	Πυκνότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Μέτρο ελαστικότητας	Σημείο τήξης
	271 HB	7.94 g/cm ³	600-1100MPa	196,5 GPa	~1385°C

Σχήμα 4.46: Μηχανικές ιδιότητες Incoloy 800

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν τα δεδομένα βέλτιστης κατεργασιμότητας του κράματος Incoloy 800 [20], ιδιαίτερη βάση έχει δοθεί στην επιλογή του κατάλληλου τρόπου ψύξης της ζώνης κοπής καθώς όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των HRSA καθιστά την ψύξη της ζώνης κοπής αρκετά δύσκολη. Κατά την παρακάτω μελετήθηκαν 4 συνθήκες όσον αφορά τον τρόπο ψύξης. Τόρνευση δίχως ψυκτικό, τόρνευση με ελάχιστη δυνατή ποσότητα ψυκτικού (MQL1=150ml/h και MQL2=230ml/h) και ψύξη με πλημμύρισμα της ζώνης κοπής (600ml/h). Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Taguchi για τόρνευση δοκιμών Incoloy 800 διαμέτρου 32mm και μήκους 200mm με την χρήση κοπτικού τσιμεντοειδές καρβιδίου χωρίς επικάλυψη CNMG-120408 της Seco Tools και στελέχους PCLNR-2020-M12. Για ταχύτητες κοπής $V_c=40,50,60$ (m/min), για προώσεις $f=0.033, 0.066, 0.132$ (mm/rev) και βάθη κοπής $a_p=0.5, 0.75, 1$ (mm) μετρήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα μέσης τραχύτητας επιφανείας Ra και της πλευρικής φθοράς του εργαλείου VBc.

No.Test	Δεδομένα κοπής		
	V_c (m/min)	V_c (m/min)	V_c (m/min)

1	40	0.033	0.5
2	40	0.066	0.75
3	40	0.132	1
4	50	0.033	1
5	50	0.066	0.5
6	50	0.132	0.75
7	60	0.033	0.75
8	60	0.066	1
9	60	0.132	0.5

Σχήμα 4.47: Πειραματικά δεδομένα κοπής Incoloy 800 (Πηγή: An Experimental Investigations in Turning of Incoloy 800 in Dry, MQL and Flood Cooling Conditions Kamal Kishore Joshi, Ramanuj kumar, Anurag, 2018, India)

No.Test	Μέση επιφανειακή τραχύτητα Ra (μm)				Πλευρική φθορά εργαλείου VBc (mm)			
	Dry	MQL1	MQL2	Flood	Dry	MQL1	MQL2	Flood
1	2.99	2.41	2.4	2.72	0.123	0.134	0.133	0.136
2	3.7	3.43	3.4	3.3	0.135	0.131	0.13	0.132
3	4.2	4.11	4.1	4.05	0.144	0.136	0.133	0.139
4	3.29	3.19	3.19	3.2	0.151	0.146	0.144	0.149
5	3.7	3.52	3.5	3.53	0.166	0.158	0.156	0.161
6	4.3	4.19	4.15	4.2	0.143	0.136	0.135	0.14
7	2.7	2.46	2.42	2.6	0.184	0.176	0.175	0.177
8	3.36	3.2	3.1	3.3	0.167	0.16	0.158	0.163
9	4.6	3.8	3.7	4	0.171	0.165	0.163	0.169

Σχήμα 4.48: Πειραματικά αποτελέσματα κοπής Incoloy 800 (Πηγή: An Experimental Investigations in Turning of Incoloy 800 in Dry, MQL and Flood Cooling Conditions Kamal Kishore Joshi, Ramanuj kumar, Anurag, 2018, India)

- Από την έρευνα προκύπτει ότι τα τσιμεντοειδή καρβίδια για τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν δεν παρουσίασαν πρόωρες αστοχίες σε καμία περίπτωση με τιμές του VBc<0.3mm σε όλες τις περιπτώσεις.
- Η χρήση της τεχνικής ψύξης MQL2 έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα ενώ η στεγνή τόννευση έδωσε τον μεγαλύτερη τιμή πλευρικής φθοράς κοπτικού (0.184mm) και σε σχέση με τις άλλες τεχνικές ήταν η χειρότερη
- Με της μεθόδου Taguchi και των μοντέλων παλινδρόμησης διαπιστώθηκε αύξηση της πλευρικής φθοράς του κοπτικού κατά την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Το κοπτικό τσιμεντοειδές καρβίδιο επιτυγχάνει την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του με την χρήση της MQL2 ψύξης
- Η μέση τιμή τραχύτητας της κατεργασμένης επιφανείας επηρεάζεται στο μέγιστο από την πρόωση με χειρότερη τιμή κατά την στεγνή τόννευση (4.60μm) και καλύτερη (3.70μm) με χρήση MQL2.
- Η ταχύτητα κοπής είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει το αποτέλεσμα ακολουθούν η πρόωση και το βάθος κοπής. Τα βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας που προκύπτουν για την τόννευση του Incoloy 800 είναι

Δεδομένα κατεργασιμότητας	V _c (m/min)	F (mm/rev)	A _p (mm)
Incoloy 800	40	0.033	0,75

Σχήμα 4.49: Βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας Incoloy 800 (Πηγή: An Experimental Investigations in Turning of Incoloy 800 in Dry, MQL and Flood Cooling Conditions Kamal Kishore Joshi, Ramanuj kumar, Anurag, 2018, India)

4.2.10 HRSA- Stellite ® alloy 6

Το Stellite 6 είναι HRSA με βάση το κοβάλτιο. Τα υπέρ κράματα με βάση το κοβάλτιο είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη αντοχή στην φθορά καθώς και χημική σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές στην αεροδιαστημική βιομηχανία λόγω του υψηλού τους σημείου τήξης. Ακόμα βρίσκονται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, σε εργοστάσια ενέργειας, χημικό και ιατρικό εξοπλισμό.



Σχήμα 4.50: Stellite ® 6 (Πηγή: htscoatings.com)

Παρακάτω παρουσιάζονται η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες του Stellite 6.

Stellite 6	C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe	Ni	W	Mo	Co
	1.11	0.57	1.2	0.004	0.001	28.25	1.89	2.32	15.04	1.17	Bal

Σχήμα 4.51: Στοιχεία κραμάτωσης Stellite ® 6 (%wt.)

Stellite 6	Σκληρότητα	Πυκνότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Μέτρο ελαστικότητας	Σημείο τήξης
	277-373 HB	8.03 g/cm ³	970 MPa	209 GPa	~1300°C

Σχήμα 4.52: Μηχανικές ιδιότητες Stellite ® 6

Για την εύρεση των βέλτιστων δεδομένων κατεργασιμότητας της τόννευσης του Stellite ® 6 πραγματοποιήθηκε σχετική έρευνα. [21] Στην παρακάτω έρευνα χρησιμοποιήθηκαν η μέθοδος DOE καθώς και στατιστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης για εύρεση των βέλτιστων συνθηκών κοπής (ANOVA). Το κοπτικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν κατασκευής της Sandvik επικάλυψης PVD (Ti,Al) με διαφορετικές ακτίνες κοπτικής ακμής r (0.2 , 0.4 , 0.8). Για ταχύτητες κοπής $V_c=30,55,80$ (m/min), για προώσεις $f=0.08$, 0.12 , 0.16 (mm/rev) και βάθη κοπής $a_p=0.15$ 0.35 0.45 (mm) μετρήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα μέσης

τραχύτητας επιφανείας Ra, της δύναμης κοπής Fz, του ρυθμού αφαίρεσης υλικού MRR και της καταναλωμένης ισχύς Pc.

Έπειτα από χρήση των στατιστικών μοντέλων βελτιστοποίησης και του μοντέλου παλινδρόμησης προκύπτουν τα παρακάτω βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας για το Stellite ® 6.

NO	Βέλτιστες συνθήκες	r (mm)	V _c (m/min)	F (mm/rev)	Ap (mm)	Ra (μm)	MRR (cm ³ /min)
1	Max MRR	0.6	80	0.160	0.45	1.257	5.580
2	Min Ra	0.67	80	0.083	0.45	0.360	3.097
3	Συνδυασμός (1+2)	0.86	80	0.160	0.45	1.074	5.526

Σχήμα 4.53: Βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας Stellite ® 6 (Πηγή: Modeling and optimization of the turning parameters of cobalt alloy (Stellite 6) based on RSM and desirability function Riadh Saidi & Brahim Ben Fathallah & Tarek Mabrouki & Salim Belhadi & Mohamed Athmane Yaltese, 2018)

Εκτός των παραπάνω παρατηρείται ακόμα ότι:

- Ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την δύναμη κοπής Fz είναι το βάθος κοπής με ποσοστό 76.03%
- Ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα επιφανείας είναι η πρόωση f με ποσοστό 50.05%
- Όσον αφορά την καταναλωμένη ισχύ και τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού, το βάθος κοπής είναι ο παράγοντας με τον μεγαλύτερο αντίκτυπο
- Για την καταναλωμένη ισχύ Pc οι κύριοι παράγοντες είναι η ταχύτητα κοπής Vc και το βάθος κοπής Ap
- Η ακτίνα κοπής του κοπτικού εργαλείου r δεν επηρεάζει την καταναλωμένη ισχύ Pc

4.2.11 Τιτάνιο-Κράματα τιτανίου

Το τιτάνιο (Ti) είναι ένα ακριβό και απαιτητικό υλικό για κατεργασία. Αν και δεν είναι το πιο δημοφιλές υλικό προς κατεργασία, λόγω του κόστους αγοράς και κατεργασίας του είναι αρκετά σημαντικό υλικό λόγω των σημαντικών ιδιοτήτων του. Είναι ένα από τα πιο ελαφριά μεταλλικά στοιχεία ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει μεγάλη αντοχή και αντίσταση στην φθορά. Είναι ανθεκτικότερο από τα περισσότερα κράματα χαλύβων και σχεδόν τόσο ελαφρύ όσο το αλουμίνιο. Ακόμα, το τιτάνιο έχει πολύ μικρή θερμική αγωγιμότητα με αποτέλεσμα όπως και στα HRSA η θερμότητα από την ζώνη κοπής να απάγεται μόνο προς το κοπτικό και όχι στο απόβλητο ή το προς κατεργασία τεμάχιο. Επιπλέον, έχει υψηλή ευκαμψία και επομένως λυγίζει εύκολα υπό τις δυνάμεις κοπής, γεγονός που πρέπει να παρθεί υπόψη για την επίτευξη των τελικών διαστάσεων των προϊόντων. Τις ήδη καλές μηχανικές ιδιότητες του τιτανίου βελτιώνουν τα κράματα τιτανίου. Τα κράματα τιτανίου χωρίζονται σε 4 υποκατηγορίες:

- Καθαρό τιτάνιο (Στην πραγματικότητα πρόκειται για κράμα με περιεκτικότητα τιτανίου 99.5%-99.8% και μικρές προσθήκες σιδήρου και άνθρακα)
- Άλφα κράματα με αλουμίνιο, οξυγόνο και άζωτο
- Βήτα κράματα με μολυβδαίνιο σίδηρο χρώμιο και μαγγάνιο
- Μίξη α+β με μίξη των προηγούμενων 2 υποκατηγοριών

Η μίξη α+β σε απαρτίζεται σε μεγάλο ποσοστό από το Ti-6Al-4V που είναι το πιο κοινό κράμα τιτανίου αυτή την στιγμή σε χρήση. Χρησιμοποιείται στον τομέα της αεροδιαστημικής, της υγείας αλλά και σε εφαρμογές γενικής χρήσης. Η σχέση αντοχής-βάρους του κράματος σε συνδυασμό με την αντίσταση σε φθορά και όλα αυτά στο 60% της πυκνότητας του χάλυβα το κάνουν ιδανικό για την κατασκευή τοιχωμάτων.

Στην κατεργασιμότητα του το τιτάνιο έχει μικρό εύρος για το οποίο κατεργάζεται ιδανικά. Γενικά μικρή ταχύτητα κοπής κοντά στα 60m/min για εκχόνδριση και περίπου 180-240m/min για αποπεράτωση. Καίριας σημασίας κατά την κατεργασία του είναι η διαχείριση της θερμότητας στην ζώνη κοπής. Ενώ ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του υλικού είναι η τάση να «ξεκολλάει» το κοπτικό πλακίδιο από το στέλεχος συγκράτησης, επομένως σημαντικός είναι και ο κατάλληλος τρόπος δέσης του πλακιδίου στο στέλεχος για την κοπή τεμαχίων τιτανίου ή κραμάτων τιτανίου.

4.2.12 Κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V

Παρακάτω θα γίνει ανάλυση των βέλτιστων συνθηκών κατεργασιμότητας του Ti-6Al-4V.

Ti-6Al-4V	Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
	87.6-91	5.5-6.75	3.5-4.5	<0.4	<0.2	<0.08	<0.05	<0.015

Σχήμα 4.54: Στοιχεία κραμάτωσης Ti-6Al-4V (%wt.)

Ti-6Al-4V	Σκληρότητα	Πυκνότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Μέτρο ελαστικότητας	Σημείο τήξης
	277 HB	4.43 g/cm ³	1130MPa	105-120 GPa	1674°C

Σχήμα 4.55: Μηχανικές ιδιότητες Ti-6Al-4V

Οι βέλτιστες συνθήκες κατεργασιμότητας προσεγγίστηκαν σε έρευνα [22] που έγινε κατά την τόννευση με χρήση CNC (Sinumerik 828d) σε κυλινδρικά δοκίμια Ti-6Al-4V διαμέτρου 20mm και μήκους 60mm. Έγινε χρήση κοπτικού τσιμεντοειδές καρβιδίου με επικάλυψη CVD Ti (C, N) + Al₂O₃ + Ti και ονομασίας CNMG 12 04 08 4325. Για ταχύτητες κοπής V_c=62.83 , 125.66 , 188.50 (m/min), για προώσεις f=0.015 , 0.03 , 0.06 (mm/rev) και βάθη κοπής a_p=0.1 0.2 0.3 (mm) μετρήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα μέσης τραχύτητας επιφανείας Ra ρυθμός αφαίρεσης υλικού MRR και πάχος απόβλητου.

Μετά την καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων και ανάλυση τους προκύπτει ότι:

- Το βάθος κοπής είναι το βασικό στοιχείο ως προς την απόδοση της κατεργασίας
- Οι διαφορές στο πάχος απόβλητου προκύπτουν σε υψηλές τιμές πρόωσης και υψηλές ταχύτητες κοπής. Τα περισσότερα απόβλητα είναι συνεχείς και μεγάλου μήκους.
- Βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας από την πειραματική κατεργασία:

Δεδομένα κατεργασιμότητας	V _c (m/min)	F (mm/rev)	A _p (mm)	Ra (μm)	MRR (mm ³ /min)	Chip Thickness (mm)
Ti-6Al-4V	62.83	0.06	0.3	2.432	30.12	0.340

Σχήμα 4.56: Βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας Ti-6Al-4V (Πηγή: Studies on the selection of cutting parameters of Ti-6Al-4V alloy turning operation using principal component analysis Geetika k.Salwan Rayapati Subbarao 2021, India)

*Η ταχύτητα κοπής μετατράπηκε βάση του τύπου της παραγράφου 3.1.5 από rpm σε m/min

Σημειώνεται ότι η βέλτιστη ταχύτητα κοπής που βρέθηκε κατά την έρευνα είναι κοντά σε αυτή που αναφέρεται γενικά για τα κράματα του τιτανίου (~60m/min) στο τέλος της προηγούμενης παραγράφου 4.2.11.

Σε παρεμφερή έρευνα [23] σε Ti-6Al-4V με κοπτικό τσιμεντοειδές καρβίδιο με επικάλυψη τιτανίου (CCMT120412-MM VP15TF) εντοπίστηκαν ως βέλτιστα δεδομένα κοπής, τόσο για βέλτιστη ποιότητα επιφανείας όσο και για ελάχιστη φθορά εργαλείου τα:

Δεδομένα κατεργασιμότητας	V_c (m/min)	F (mm/rev)	A_p (mm)
Ti-6Al-4V	45	0.05	0.5

Σχήμα 4.57: Βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας Ti-6Al-4V (Πηγή: Influence of Cutting Parameter and Multi-Objective Optimization on Turning Titanium Alloy J B Saedon¹, M F Othman¹, M.S, Meon¹, N. H. Mohamad Nor¹, H. Husain¹ and S. Shawa, Malaysia)

Τέλος η χρήση cryogenic ψύξης έδειξε μεγάλη βελτίωση στην κατεργασιμότητα του Ti-6Al-4V σε σύγκριση με απλή υγρή ψύξη. Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής εργαλείου κατά 125% σε υψηλές ταχύτητες κοπής, μείωση κατανάλωσης ενέργειας κατά 23.4%, μείωση τιμών τραχύτητας επιφανείας κατά 22.1%, μείωση κόστους κατεργασίας κατά 27% και μείωση των εκπομπών άνθρακα κατά 22% σε υψηλές ταχύτητες κοπής. [24]

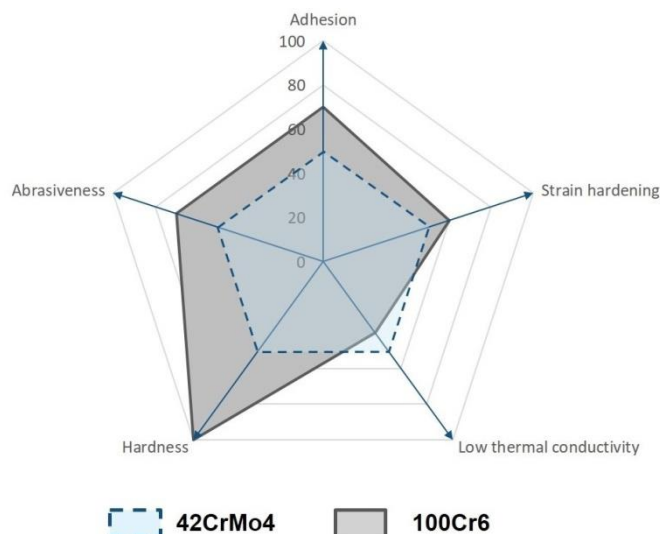
4.2.13 Υπέρ σκληρά υλικά

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι σκληρυμένοι χάλυβες με σκληρότητα > 419–745 HB και οι σκληροί τύποι χυτοσιδήρου ~ 400-600 HB. Οι σκληρότητα αυτών των υλικών τα κάνει πολύ δύσκολα προς κατεργασία. Κατά την κατεργασία τους παράγεται πολύ μεγάλο ποσό θερμότητας και επίσης είναι πολύ τραχιά για την κοπτική ακμή. Σημειώνεται ότι σε αυτή την κατηγορία μπορούν να βρεθούν και υλικά της κατηγορίας ISO P όταν αυτά υποστούν θερμική κατεργασία που αυξάνει τις μηχανικές τους ιδιότητες. Οι σκληρυμένοι χάλυβες είναι μέταλλα τα οποία υπόκεινται μεγάλες καταπονήσεις και σκληρές συνθήκες. Χρησιμοποιούνται σε εξαρτήματα αυτοκινήτων και ιδιαιτέρως σε εξαρτήματα φορτηγών. Ακόμα, σε σκληρά εργαλεία, μύτες τρυπανιών και μαχαίρια. Τα προτερήματα τους είναι η μεγάλη αντοχή στην φθορά και στην τριβή, κατά συνεχείς καταπονήσεις. Έχουν επίσης αυξημένη αντοχή στην οξείδωση και στην διάβρωση αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των απλών χαλύβων. Κατά την κατεργασιμότητα τους μεγάλα μηχανικά φορτία παρατηρούνται. Γενικά για την κατεργασιμότητα τους χρησιμοποιούνται ειδικά καρβίδια ή πολυκρυσταλλικά διαμάντια σε χαμηλές με μέτριες προώσεις και βάθη κοπής. Τέλος η ταχύτητα κοπής πρέπει να επιλέγεται με βάση την ισορροπία διάρκεια ζωής εργαλείου ποιότητα επιφανείας.

4.3.13 Χάλυβας εδράνων κύλισης DIN 100Cr6

Πρόκειται για σκληρυμένο χάλυβα που χρησιμοποιείται για ρουλεμάν φτιαγμένο για αντοχή στην τριβή από κύλιση και εφαρμογές υψηλής κόπωσης. Κυρίως μικρά και μετρίου μεγέθους εξαρτήματα εδράνων κύλισης είναι φτιαγμένα από 100Cr6. Ακόμα χρησιμοποιείται για γενικές εφαρμογές σε εξαρτήματα που απαιτούν μέγιστη αντοχή

εφελκυσμού και σκληρότητα. Παρακάτω παρουσιάζεται γράφημα που συγκρίνει τις ιδιότητες του 100Cr6 με τον χάλυβα 42CrMo4 (παράγραφος 4.3.1)



Σχήμα 4.58: Σύγκριση χαρακτηριστικών 42CrMo4 με 100Cr6 (Πηγή: Seco tools)

Παρακάτω θα γίνει ανάλυση των βέλτιστων συνθηκών κατεργασιμότητας του 100Cr6.

100Cr6	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Others
	0.9-1.05	0.15-0.35	0.25-0.45	<0.03	<0.025	1.35-1.65	<0.3	<0.3

Σχήμα 4.59: Στοιχεία κραμάτωσης Ti-6Al-4V (%wt.)

100Cr6	Σκληρότητα	Πυκνότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Μέτρο ελαστικότητας	Σημείο τήξης
	658-695 HB	7.8 g/ cm ³	830-1470MPa	210 GPa	1424°C

Σχήμα 4.60: Μηχανικές ιδιότητες Ti-6Al-4V

Με έρευνα [25] που έγινε για τόννευση με χρήση CNC τόννου σε δοκίμια 100Cr6 σε σχήμα σωλήνα εξωτερικού διαμέτρου 60mm, εσωτερικού διαμέτρου 19mm και μήκους 500mm έγινε προσέγγιση των βέλτιστων δεδομένων κατεργασίας. Ακόμα, έγινε χρήση τριγωνικών κοπτικών της Sandvik Coromant CC650 (Al₂O₃), CC670 (whisker) CB7020 (PCBN) και κοπτικού De Beers DBN45 (PCBN). Για διαφορετικές τιμές ταχύτητας κοπής (V_c), πρόωσης (f), και βάθους κοπής (a_p), μετρήθηκαν η μέση τιμή τραχύτητας επιφανείας (Ra), το πλάτος πλευρικής φθοράς του κοπτικού (VB_c) και υπολογιστικά και ο χρόνος ζωής κοπτικού (t). Προέκυψαν οι παρακάτω βέλτιστες συνθήκες για όλα τα κοπτικά που χρησιμοποιήθηκαν:

Βέλτιστες συνθήκες	V _c (m/min)	F (mm/rev)	Ap (mm)
Μέγιστη Δ. ζωής εργαλείου	100	0.06	0.25
Min Ra	* 116-130	0.06-0.09	-

Σχήμα 4.61: Βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας 100Cr6 (Πηγή: Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools Gabriel C. Benga , Alexandre M. Abrao, 2003)

*Για το κοπτικό CC670 η ταχύτητα κοπής για βέλτιστη ποιότητα επιφανείας είναι $V_c \sim 100 \text{ m/min}$

Σημαντικές παρατηρήσεις:

- Τα PCBN κοπτικά παρέχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από ότι τα κεραμικά κατά την κατεργασία του 100Cr6, για ταχύτητες ανάμεσα στα 100 με 180 m/min και προώσεις μεταξύ 0.06 και 0.22 mm/rev.
- Η ταχύτητα κοπής είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την διάρκεια ζωής όλων των κοπτικών που μελετήθηκαν κατά την κατεργασία του 100Cr6.
- Η πρόωση είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα επιφανείας για όλα τα είδη των κοπτικών που μελετήθηκαν κατά την κατεργασία του 100Cr6.
- Το CC670 (whisker) δεν είναι κατάλληλο για την κατεργασία του 100Cr6 καθώς εμφάνισε την μικρότερη διάρκεια ζωής από τα υπόλοιπα.

Σε παρόμοια έρευνα με χρήση κοπτικών CBN με επικάλυψη TiN και TiAlN καθώς και CBN χωρίς επικάλυψη παρατηρήθηκε ότι κατά την τόννευση 100Cr6 τα κοπτικά χωρίς επικάλυψη παρουσίασαν ίδιες φθορές κρατήρα σε σύγκριση με τα επικαλυμμένα. Τα κοπτικά με τεχνολογία γρεζοθραυστών παρουσίασαν την ίδια απόδοση με εκείνα χωρίς επικάλυψη αλλά είχαν μικρότερη διάρκεια ζωής. Τέλος η επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων κοπής για τόννευση 100Cr6 πρέπει να γίνεται με ισορρόπηση της διάρκειας ζωής του κοπτικού αντί της παραγωγικότητας. [26]

4.3 Δυνατότητες εργαλείων κοπής

4.3.1 Τσιμεντοειδή καρβίδια (Cemented Carbides)

Τα τσιμεντοειδή καρβίδια έχουν χαρακτηριστικά συνθετικού υλικού. Συνθέτονται από σκληρά καρβίδια και καρβονιτρίδια μετάλλων της τέταρτης και της έκτης υποομάδας του περιοδικού πίνακα με συγκολλητικά μέταλλα κυρίως το κοβάλτιο και το νικέλιο. Τα τσιμεντοειδή καρβίδια συγκρατούν την σκληρότητα τους σε υψηλές θερμοκρασίες λόγω των ιδιοτήτων των καρβιδίων. Για αυτό τον λόγο είναι και το πιο δημοφιλές υλικό κοπτικών εργαλείων μετάλλου. Σήμερα κυρίως τρεις τύποι τσιμεντοειδών καρβιδίων χρησιμοποιούνται. Τσιμεντοειδή καρβίδια με κοβάλτιο (WC-Co), καρβίδια με βολφράμιο και κυβικά καρβίδια όπως TaC, NbC, TiC με συγκολλητικό από κοβάλτιο (WC-(Ti,Ta,Nb)C-Co) και τα cermet's που είναι βασισμένα σε τσιμεντοειδή καρβίδια από καρβίδιο του τιτανίου. Όσον αφορά στις δυνατότητες τους μεγάλη σημασία έχει ο τύπος επικάλυψης που φέρουν. Οι τύποι είναι οι :

- PVD, Physical Vapor Deposition, (Φυσικής εναπόθεσης ατμού)
- CVD, Chemical Vapor Deposition, (Χημικής εναπόθεσης ατμού)

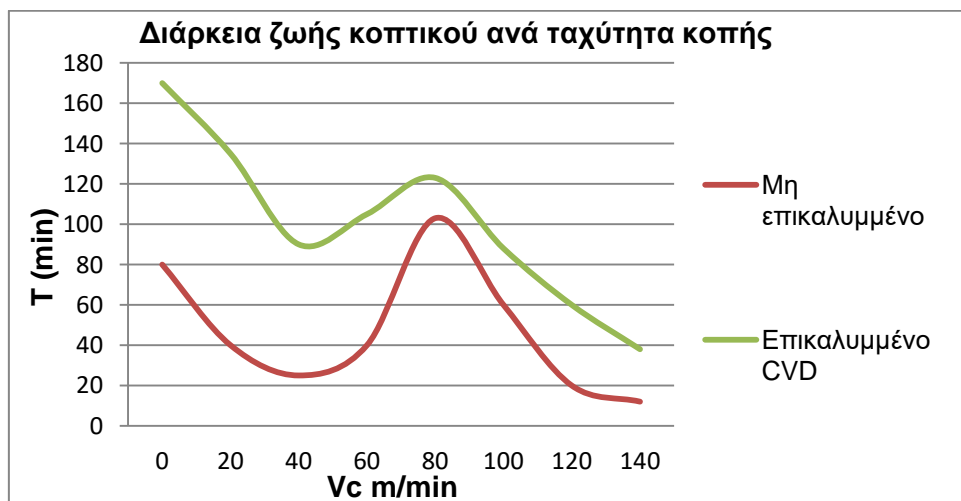
Σε έρευνα [27] που έγινε τórνευση σε χάλυβα C45 με τσιμεντοειδή καρβίδια των ακόλουθων τύπων:

1. P20 χωρίς επικάλυψη
2. P20 PVD (TiN) πάχους 2μm
3. P20 CVD (TiN) πάχους 10μm
4. P20 PVD (TiN και AlTiSiN) πάχους 2 και 2.5μm αντίστοιχα

Προκύπτει ότι κατά την χρήση μη επικαλυμμένων καρβιδίων η καλύτερη ποιότητα επιφανείας δίνετε στην κοπή με χαμηλές ταχύτητες (~20m/min) αλλά η διάρκεια ζωής του εργαλείου είναι πολύ μικρή. Η διάρκεια ζωής του μη επικαλυμμένου καρβιδίου είναι η μεγαλύτερη σε ταχύτητα 60 ή 100 m/min. Ακόμα σε ταχύτητες <100m/min μειώνονται οι δυνάμεις κοπής αλλά και η διάρκεια ζωής του εργαλείου κοπής.

Τα επικαλυμμένα καρβίδια εμφανίζουν καλύτερες τιμές διάρκειας ζωής και ποιότητας επιφανείας σε όλο το εύρος ταχυτήτων. Καλύτερο καρβίδιο για την κατεργασία του χάλυβα C45 αναδείχθηκε το (3) επικάλυψης CVD.

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η διαφορά στην διάρκεια ζωής ανάμεσα στο επικαλυμμένο CVD και το επικαλυμμένο καρβίδιο (Ar=0.5mm).



Σχήμα 4.62: Διάρκεια ζωής κοπτικού ανά ταχύτητα κοπής (Πηγή: Evaluation of performance of uncoated cemented carbide cutting tools at longitudinal turning at cutting velocity 3–500 m/min and influence of coating, Karol Vasilko a, Zuzana Murcinková , Jaromír Murcinko, 2021 Slovak Republic)

Σε όλο το εύρος ταχυτήτων κοπής το επικαλυμμένο καρβίδιο παρουσίασε κατά μέσο όρο αύξηση κατά 260% της διάρκειας ζωής του σε σχέση με την διάρκεια ζωής του καρβιδίου χωρίς επικάλυψη.

4.3.2 Κεραμικά

Τα κεραμικά κοπτικά υλικά έχουν αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες και χρησιμοποιούνται στην κατεργασία σκληρών και χημικά σταθερών μετάλλων. Οι ιδιότητες των κεραμικών τους επιτρέπουν να κατεργάζονται μέταλλα σε υψηλές ταχύτητες κοπής και σε στεγνή τόννευση καθώς η μείωση της θερμοκρασίας δεν είναι απαραίτητη λόγω της αντοχής τους. Συγκριτικά όμως με τα τσιμεντοειδή καρβίδια που έχουν ένα μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών ακόμα και σε χαμηλότερες ταχύτητες κοπής, τα κάνουν λιγότερο δημοφιλή. Τα είδη κεραμικών κοπτικών είναι 5:

- Κεραμικά οξειδία με βάση το αλουμίνιο (Al_2O_3) και με πρόσθεση ζirkονίων (ZrO_2)
- Κεραμικά μίξης με κυβικά καρβίδια $TiC, Ti(C,N)$
- Whisker κεραμικά με ίνες πυριτίου ($SiCw$)
- Κεραμικά με νιτρίδια του πυριτίου (Si_3N_4)
- Sialon

Για τόννευση σκληρυμένου χάλυβα DIN CK45 με χρήση κεραμικού οξειδίου Al_2O_3 με επικάλυψη CVD (W, Ti) καταγράφηκαν οι βέλτιστοι παράγοντες γεωμετρίας κοπής για το κοπτικό. [28] Τα δεδομένα κοπής ήταν σταθερά με ταχύτητα κοπής 120m/min πρόωση 0.15mm/rev και βάθος κοπής 0.2mm και έγινε χρήση της μεθόδου Taguchi.

Al_2O_3	W	Al	Ti	O	C	Mg	Ni
	46.31	21.27	12.26	17.77	2.23	0.07	0.09

Σχήμα 4.63: Χημική σύσταση κοπτικού Al_2O_3 (%wt.)

Οι βέλτιστες γεωμετρίες κοπής ανά λόγο αέρα-κοπής είναι:

Βέλτιστη γεωμετρία	Ακτίνα ακμής r_c (mm)	Γωνία ακμής K_r (°)	Γωνία ελευθερίας γ (°)
Λόγος 0.044	0.6	60	-6
Λόγος 0.093	0.4	45	-6
Λόγος 0.205	0.4	-8	45

Σχήμα 4.64: Βέλτιστη γεωμετρία κοπής χάλυβα DIN CK45 με κοπτικό κεραμικό Al_2O_3 (Πηγή: Optimization of geometry parameters for ceramic cutting tools in intermittent turning of hardened steel, Xiaobin Cui a, Jingxia Guo, Jianxin Zheng, 2016 China)

4.3.3 Πολυκρυσταλλικά κυβικά βοριονιτρίδια (P)CBN

Τα κοπτικά (P)CBN είναι το δεύτερο πιο σκληρό υλικό γνωστό στον άνθρωπο μετά το διαμάντι. Ο τρόπος κατασκευής τους μοιάζει με αυτόν της κατασκευής του συνθετικού διαμαντιού και οι κοπτικές τους δυνατότητες είναι περίπου ίδιες με αρκετά λιγότερο κόστος. Οι κατασκευαστές PCBN προσφέρουν ειδικά προϊόντα για κάθε εφαρμογή με

σκοπό την οικονομική τους προσαρμοστικότητα ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε κατεργασίας κοπής. Διατίθενται επίσης και με επικαλύψεις τύπου PVD.

Η κύρια εφαρμογή τους είναι για το φινίρισμα τόννευσης σκληρυμένου χάλυβα άνω των 419 HB. Σε σκληρότητα άνω των 552 Hb τα κοπτικά CBN είναι το μοναδικό κοπτικό εργαλείο που μπορεί να αντικαταστήσει τις παραδοσιακές μεθόδους. Για σκληρότητες μικρότερες των 419 HB οι χάλυβες περιέχουν μεγαλύτερη ποσότητα φερρίτη η οποία έχει αρνητική επίπτωση στο CBN πράγμα που επιταχύνει την φθορά του. Επιπλέον τα CBN μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατεργασίες αποπεράτωσης υψηλών ταχυτήτων σε γκρι-χυτοσίδηρο.

Παρακάτω παρουσιάζεται έρευνα για τις εξακρίβωση της συμπεριφοράς κοπτικών PCBN κατά την τόννευση σκληρυμένου χάλυβα DIN 36CrNiMo4 (54-56 HRC) ανάλογα με τα δεδομένα κοπής. Χρησιμοποιήθηκαν μέτρια (150m/min) και υψηλή ταχύτητα κοπής (300m/min) για σκληρή τόννευση, ενώ η πρόωση και το βάθος κοπής ήταν σταθερά για όλη την κατεργασία. [29] Χρησιμοποιήθηκαν τα κοπτικά πλακίδια:

Τύπος	Περιεκτικότητα CBN	Μέσο μέγεθος κόκκων CBN	Συγκολλητική ουσία
PCBN-L	10.50%	11. < 2 μ m	TiC
PCBN-H	14.85%	15. < 2 μ m	Co-W-A

Σχήμα 4.65: Σύσταση κοπτικών PCBN υψηλής και χαμηλής περιεκτικότητας (Πηγή: The effect of High Speed Machining on the Crater Wear Behaviour of PCBN Tools in Hard Turning. S. Gordona, P.Phelana, C. Lahiffb, 2019 Ireland)

Παρατηρήθηκε ότι:

- Τα κοπτικά PCBN-L με μικρότερη περιεκτικότητα CBN παρουσίασαν καλύτερη διάρκεια ζωής για **συνεχή τόννευση** και για τις δύο ταχύτητες κοπής με τα PCBN-H να είναι κατά μικρό ποσοστό χειρότερα.
- Τα κοπτικά PCBN-L επηρεάζονται περισσότερο κατά την αλλαγή της ταχύτητας κοπής, έτσι κατά την μη συνεχή τόννευση παρουσιάζουν μικρότερη διάρκεια ζωής. Ο διπλασιασμός της ταχύτητας κοπής μειώνει την διάρκεια ζωής 6 φορές. Αυτό το γεγονός δεν ισχύει για τα PCBN-H που για την ίδια αλλαγή ταχύτητας χάνουν μόνο το μισό της διάρκειας ζωής τους.
- Τα PCBN-L έχουν αύξηση της φθοράς κρατήρα και πλευρικής φθοράς ανάλογη με την αύξηση της ταχύτητας κοπής
- Τα PCBN-H έχουν ελάχιστη αύξηση της πλευρικής φθορά στον διπλασιασμό της ταχύτητας κοπής και όχι την δραματική αύξηση που παρατηρείται στα PCBN-L. Η φθορά κρατήρα είναι μικρότερη για τις μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής στα PCBN-H

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τα PCBN-L πρέπει να χρησιμοποιούνται σε μικρότερες ταχύτητες κοπής (150m/min) και για συνεχή τόννευση. Ενώ τα PCBN-H σε μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής και είναι ιδανικά για μη συνεχή τόννευση.

4.3.4 Πολυκρυσταλλικό διαμάντι PCD

Τα κοπτικά PCD είναι συνθετικά κατασκευασμένα διαμάντια τα οποία προσεγγίζουν αρκετά την σκληρότητα των μονοκρυσταλλικών διαμαντιών που συναντώνται στην φύση. Η τεράστια τους σκληρότητα τους δίνει την δυνατότητα να κατεργαστούν πολύ σκληρά και δύσκολα στην κοπή υλικά.

Οι εφαρμογές των PCD είναι περιορισμένες σε μη σιδηρούχα υλικά όπως σε αλουμίνια υψηλής περιεκτικότητας πυριτίου, σύνθετα μεταλλικά υλικά τύπου (MMC). Ακόμα τα PCD σε κοπή βυθισμένη σε ψυκτικό μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές υπέρ φινιρίσματος τιτανίου.

Παρακάτω παρουσιάζεται έρευνα για τις εξακρίβωση της συμπεριφοράς κοπτικών PCD κατά την τόννευση β-κράματος τιτανίου (DIN Ti5Al5V5Mo3Cr) ανάλογα με τα δεδομένα κοπής. Χρησιμοποιήθηκαν ταχύτητες κοπής (100 – 250 m/min), προώσεων (0.1–0.2 mm/rev) και βάθους κοπής ($a_p=0.5\text{mm}$), για φινίρισμα με χρήση ψυκτικού. [30] Χρησιμοποιήθηκαν τα κοπτικά πλακίδια:

Τύπος	Περιεκτικότητα Co	Μέγεθος κόκκων (μm)	Σκληρότητα HV3 (Gpa)
1	8.23%	4 και 25 διτροπικός	63.82
2	11.62%	5 μονού	53.73
3	15%	0.6-1.6 μονού	50.3

Σχήμα 4.66: Σύσταση κοπτικών PCD (Πηγή: Influence of characteristic properties of PCD grades on the wear development in turning of β -titanium alloy (Ti5Al5V5Mo3Cr) M. Ibrahim Sadik, Ernesto Coronel, Martina Latteman, 2019 Sweden)

Παρατηρήθηκε ότι:

- Για την τόννευση φινιρίσματος του β-κράματος τιτανίου το PCD τύπου 3 είναι το καταλληλότερο κοπτικό
- Μείωση της απόδοσης των PCD όταν η ταχύτητα κοπής ξεπερνά τα 200m/min και την τιμή πρόωσης 0.15mm/rev.
- Το κοπτικό 2 είχε την μεγαλύτερη πλευρική φθορά ενώ το υλικό 3 την μικρότερη
- Η κύρια φθορά που παρατηρήθηκε στα εργαλεία ήταν η φθορά κόψης (notch wear)

4.4 Κατάλογοι εργαλείων

4.4.1 Seco Tools

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κωδικοί τύποι των κοπτικών της Seco tools:

Είδος	Επικάλυψη	Ονομασία
Τσιμεντοειδή καρβίδια Cemented Carbide	CVD	TP0501,TP1501,TP2501,TP3501 TP25,TP200,TP40,TH1500 TM1501,TM2501,TM3501 TK0501,TK1501
	PVD	TH100,TS200,TS2050,TS2500 CP200,CP500,CP600
	Χωρίς επικάλυψη	HX,KX,883,890
Cermet	Χωρίς επικάλυψη	TP1020,TP1030
Ceramics	Χωρίς επικάλυψη	CS100,CS300,CW100
PCBN	Χωρίς επικάλυψη	CBN010,CBN150,CBN170 CBN200,CBN300,CBN500 CBN600
	PVD	CBN060K,CBN170C,CBN300P, CK2065,CBN400C,CHO550, CH2540,CH3515
PCD	Χωρίς επικάλυψη	PCD20,PCD30,PCD30M

Σχήμα 4.67: Κοπτικά εργαλεία Seco Tools (Πηγή:Seco tools)

4.4.2 Sandvik Coromant

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κωδικοί τύποι των κοπτικών της Sandvik Coromant:

Είδος	Επικάλυψη	Ονομασία
Τσιμεντοειδή καρβίδια Cemented Carbide	CVD	GC4305, GC4315,GC4325 GC4425,GC4415,GC4335,GC205 GC2015,GC2220,GC3210,GC322 5 S205,S05F
	PVD	GC2035,CD10,GC1525,GC1105 GC1115,GC1125
	Χωρίς επικάλυψη	H10,H13A
Cermet	Χωρίς επικάλυψη	CT5015
Ceramics	Χωρίς επικάλυψη	Silicon nitride CC6190 Sailon CC6160,CC6065,CC6060,CC616 5 Whisker CC670 Al₂O₃ CC650,CC6050
PCBN	Χωρίς επικάλυψη	CB7015,CB7105 Solid CB7925,CB7015,CB7025,CB7525
	PVD	CB7125,CB7115,CB7135
PCD	Χωρίς επικάλυψη	CD05,CD10

Σχήμα 4.68: Κοπτικά εργαλεία Sandvik Coromant (Πηγή:Sandvik Coromant)

4.4.2 Kennametal

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κωδικοί τύποι των κοπτικών της Kennametal:

Είδος	Επικάλυψη	Ονομασία
Τσιμεντοειδή καρβίδια Cemented Carbide	CVD	KCP05B,KCP05,KCPK05,KCP10B, KCP10,KCP25B,KCP25,KCP30B, KCP30,KCP40B,KCP40,KCK05B,KCK05 KCK15B,KCK15,KCK20B,KCK20,KCM15 B KCM15,KCM25B,KCM25,KCM35B, KCM35
	PVD	KS510,KCU10,KCU25,KC5010 KC5025,KC5410
	Χωρίς επικάλυψη	K313,K68
Cermet	PVD	K315,KTP10
Ceramics	Χωρίς επικάλυψη	KYK10,KYK25,KY3500,KY1615,KY525, KY530
PCBN	Χωρίς επικάλυψη	Tipped KB1345,KB5630 Solid KBK45,KB1340,KBH20,KBH10,KB5630 KB1630
PCD	Χωρίς επικάλυψη	KD1400,KD1405,KD1425

Σχήμα 4.69: Κοπτικά εργαλεία Kennametal (Πηγή: Kennametal)

5. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε αρχικά καταγραφή των κατηγοριών στις οποίες ανήκουν τα προς κατεργασία μεταλλικά τεμάχια κατά ISO 513. Αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά των υλικών για τα οποία είναι δυνατή η εν λόγω ομαδοποίηση και αναφέρθηκαν τα υλικά ανά κατηγορία. Στην συνέχεια έγινε καταγραφή και ανάλυση των υλικών των κοπτικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται για κατεργασίες κοπής. Μαζί με την ανάλυση των υλικών των κοπτικών εργαλείων έγινε αναφορά στον τύπο και την γεωμετρία τους καθώς και την τυποποίησή τους. Στην συνέχεια έγινε παρουσίαση της διαδικασίας της τόννευσης, τα στοιχεία της εργαλειομηχανής, την γεωμετρία της κοπής και την μαθηματική της μελέτη. Στο κύριο μέρος της εργασίας αρχικά παρουσιάστηκε με σύντομο τρόπο η κατεργασιμότητα για κάθε ομάδα υλικού κατά ISO 513 και στην συνέχεια έγινε πιο εκτενείς αναφορά στα προς κατεργασία υλικά. Τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν αντλήθηκαν από την βιβλιογραφία και είναι αποτελέσματα πραγματικών πειραμάτων με τα συγκεκριμένα τεμάχια και υλικά κοπτικών εργαλείων που αναφέρονται. Μελετήθηκαν διάφορες ταχύτητες κοπής, τιμές πρόωσης και βάθος κοπής από τις οποίες έγινε η επιλογή της εκάστοτε βέλτιστης τιμής δεδομένων κατεργασιμότητας. Επιπλέον για αρκετές περιπτώσεις έγινε αναφορά στις βέλτιστες προτάσεις κατεργασιμότητας από τις εταιρείες παραγωγούς κοπτικών εργαλείων. Ακόμα παρουσιάστηκαν αποτελέσματα που αφορούν τις ικανότητες κοπής που εμφανίζουν οι ομάδες κοπτικών εργαλείων.

Η κατεργασιμότητα είναι ένας σύνθετος όρος που προϋποθέτει τόσο το άρτιο τελικό αποτέλεσμα όσο και την οικονομικότερη λύση που το προσδίδει στον επιθυμητό βαθμό. Στα δεδομένα βέλτιστης κατεργασιμότητας η ισορροπία αυτών είναι το ζητούμενο και αυτό παρουσιάζεται στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αριστομένης Θ. Αντωνιάδης, 'Μηχανουργική Τεχνολογία', Εκδόσεις Τζιόλα, 3^η έκδοση 2017
- [2] Τσουρβελούδης Ν., Νικολός Ι. Τεχνολογίες Παραγωγής, 2014, Πρώτη έκδοση
- [3] Sandvik Coromant
- [4] Seco Tools
- [5] Kennametal
- [6] ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΙΧΑΗΛ ΔΑΡΙΒΙΑΝΑΚΗ, Πειράματα φθοράς κοπτικών εργαλείων σε κατεργασία τórνευσης χάλυβα Ck45
- [7] Optimization of CNC Turning Parameters with Carbide Tool for Surface Roughness Analysis Using Taguchi Analysis Shunmugesh K., Panneerselvam K. and Pramod M. and Amal George² Vazhakulam, India 2014
- [8] Multi-Objective Optimization of Machining Parameters during Dry Turning of 11SMn30 Free Cutting Steel Using Grey Relational Analysis Leeba Varghesea, Aravind Sb, Shunmugesh Kc, India
- [9] Performance of ISO P and ISO S carbide tools in hard turning of AISI 4140 under dry and MQL conditions, Matheus S. Polly, Amália Mayrhofer André J. Souza, 2018
- [10] Analysis of Effects of Machining Parameters on Cutting Force Components in Turning AISI 201 Stainless Steel Using Cemented Carbide Cutting Tool Insert Toukir Ahmed, Nripon Mollick, Shahed Mahmud, Tareq Ahmad, Bangladesh
- [11] Performance improvement of cryogenic turning process during machining of 17-4 PH stainless steel using multi objective optimization techniques Potta Sivaiaha, D. Chakradharb
- [12] Coated CBN cutting tool performance in green turning of gray cast iron EN-GJL-250: modeling and optimization Salim Chihaoui & Mohamed Athmane Yallese & Salim Belhadi & Ahmed Belbah & Khaoula Safi & Abdelkrim Haddad, 2020
- [13] AUSTEMPERED DUCTILE IRON MACHINING Jozef Pilc - Michal Sajgalik – Jozef Holubjak - Marianna Piesova – Lucia Zauskova - Ondrej Babik - Viktor Kuzdak - Jozef Rakoci
- [14] Designing with Austempered Ductile Iron (ADI) J. R. Keough and K. L. Hayrynen, Applied Process Inc. Technologies Division, Livonia, MI, G. L. Pioszak, University of Michigan
- [15] Optimization of turning process parameters in machining of heat treated ductile iron bar using Taguchi technique. K.Ramesha, S. Prathap Singha, K.Gnanasekarana, A.Sathish Kumara, India
- [16] Effect of machining parameters on surface roughness and tool wear for 7075 Al alloy SiC composite, Rajesh Kumar Bhushan & Sudhir Kumar & S. Das, 2010 India
- [17] Experimental investigation of machinability parameters in turning of CuZn39Pb3 brass alloy N.M. Vaxevanidis, N.A. Fountas, A. Koutsomichalis, J.D. Kechagias, 2018 Greece
- [18] P.C. Jindal, A.T. Santham, Schleinkofer and A.F. Shuster, "Performance of PVD TiN, TiCN and TiAlN coated cemented carbide tools in turning", International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, vol.17, pp.163-170, 1999. {625 INCONEL}
- [19] Optimization of Machining Parameter in Turning Inconel 625 Satyanarayana Kosarajua, Vijay Kumar Mb, Sateesh Nc, 2017 India
- [20] An Experimental Investigations in Turning of Incoloy 800 in Dry, MQL and Flood Cooling Conditions Kamal Kishore Joshi, Ramanuj kumar, Anurag, 2018, India
- [21] Modeling and optimization of the turning parameters of cobalt alloy (Stellite 6) based on RSM and desirability function Riadh Saidi & Brahim Ben Fathallah & Tarek Mabrouki & Salim Belhadi & Mohamed Athmane Yallese, 2018

- [22] Studies on the selection of cutting parameters of Ti-6Al-4V alloy turning operation using principal component analysis Geetika k.Salwan Rayapati Subbarao 2021, India
- [23] Influence of Cutting Parameter and Multi-Objective Optimization on Turning Titanium Alloy J B Saedon¹, M F Othman¹, M.S, Meon¹, N. H. Mohamad Nor¹, H. Husain¹ and S. Shawa, Malaysia
- [24] Comprehensive analysis of tool wear, tool life, surface roughness, costing and carbon emissions in turning Ti–6Al–4V titanium alloy: Cryogenic versus wet machining, Chetan Agrawal , Jwalant Wadhwa , Anjali Pitroda , Catalin Iulian Pruncu , Murat Sarikaya , Navneet Khanna, 2021
- [25] Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools Gabriel C. Benga , Alexandre M. Abrao, 2003
- [26] Hard turning of tempered DIN 100Cr6 steel with coated and no coated CBN inserts Gustavo de Siqueira Galoppi , Marco Stipkovic Filho , Gilmar Ferreira Batalha, 2006 Brazil
- [27] Evaluation of performance of uncoated cemented carbide cutting tools at longitudinal turning at cutting velocity 3–500 m/min and influence of coating, Karol Vasilko a, Zuzana Murcinková , Jaromír Murcinko,2021 Slovak Republic
- [28] Optimization of geometry parameters for ceramic cutting tools in intermittent turning of hardened steel, Xiaobin Cui a, Jingxia Guo, Jianxin Zheng, 2016 China
- [29] The effect of High Speed Machining on the Crater Wear Behaviour of PCBN Tools in Hard Turning. S. Gordona, P.Phelana, C. Lahiffb, 2019 Ireland
- [30] Influence of characteristic properties of PCD grades on the wear development in turning of β -titanium alloy (Ti5Al5V5Mo3Cr) M. Ibrahim Sadik, Ernesto Coronel, Martina Latteman, 2019 Sweden
- [31] <https://www.machiningdoctor.com/machinability/steel/>
- [32] <https://matmatch.com/materials/minfm64445-en-10277-3-grade-11smn30-cold-drawn>
- [33] <https://metinvestholding.com/en/products/steel-grades/42crmo4>
- [34] <https://www.otaisteel.com/aisi-4140-steel-42crmo4-scm440/>
- [35] <https://www.acerinox.com/en/productos/stainless-steel-grade/EN-1.4372---AISI-201-00001/>
- [36] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6780>
- [37] <https://www.upmet.com/products/stainless-steel/17-4-ph>
- [38] <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/metals-what-are-metals/stainless-steel/ph-stainless-steel/>
- [39] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6778>
- [40] <https://www.machiningdoctor.com/machinability/cast-iron/>
- [41] <https://www.walze-coswig.com/hand-mould-casting/material-information>
- [42] <https://www.appliedprocess.com/document-category/austempered-ductile-iron/>
- [43] http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=1551
- [44] <https://xometry.eu/en/cnc-machining-of-aluminium/>
- [45] <https://www.shapesbyhydro.com/en/expert-thoughts/three-factors-affect-aluminiums-machinability/>
- [46] <https://www.meusburger.com/EN/GB/material-grades/34365-aluminium-zinc-alloy>
- [47] <http://www.matweb.com>
- [48] http://www.steelnumber.com/en/steel alloy composition_eu.php?name_id=1356
- [49] <https://www.elcas.nl/en/brass/bar>
- [50] <https://www.americanmachinist.com/cutting-tools/article/21893818/tips-for-machining-super-alloys>
- [51] <https://www.machiningdoctor.com/machinability/superalloys-hrsa/>
- [52] <https://www.machiningdoctor.com/mds/?matId=5580>
- [53] <https://www.machiningdoctor.com/mds/?matId=4340>
- [54] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9517>
- [55] <https://www.alloywire.us.com/products/incoloy-800/>
- [56] <https://www.machiningdoctor.com/mds/?matId=4960#general-infomation>
- [57] <https://htscoatings.com/pages/stellite-6>

- [58] <https://www.machiningdoctor.com/machinability/titanium/>
- [59] <https://www.industr.com/en/eight-tips-on-machining-titanium-and-its-alloys-2528572>
- [60] <https://www.machiningdoctor.com/mds/?matId=6670>
- [61] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9299>
- [62] https://www.cobanengineering.com/Metal-Cutting-Technology/Work_Parts_Material-2.asp
- [63] <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/100cr6/>
- [64] <https://www.secotools.com/article/118886?language=en>
- [65] <https://www.nextgentooling.com/technical/five-types-of-cermamic-cutting-tools>
- [66] <https://www.jainprecisiontools.com/what-are-pcd-pcbn-cutting-tools.html>
- [67] <https://cuttingtools.ceratizit.com/gb/en/machining-know-how/milling/productoverview/pcd-milling-tools.html>