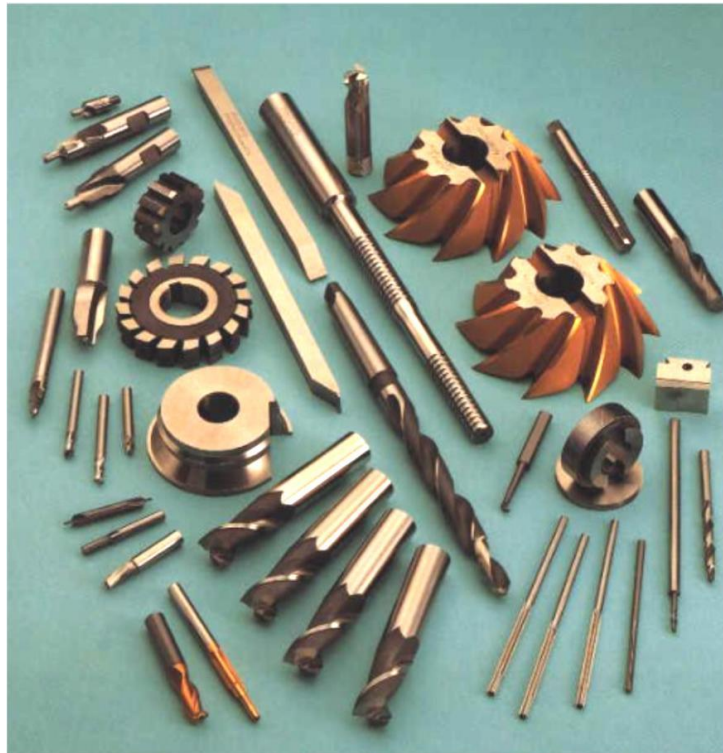




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία:

Κατεργασίες Κοπής από το Μακρόκοσμο στο Μικρόκοσμο και Υλικά Κοπτικών Εργαλείων τους



Επιβλέπων: Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Φοιτητής: Γιαννόπουλος Διονύσιος
Α.Μ: 02102604

Αθήνα, 2013

Αθήνα, Ιούλιος 2013

Περίληψη

Ο όρος κατεργασίες αποβολής υλικού, αναφέρεται στην προοδευτική αφαίρεση προκαθορισμένου όγκου υλικού υπό μορφή αποβλίττων (γρεζιών) με τη βοήθεια εργαλείου σε σχήμα σφήνας, με πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Σκοπός της κατεργασίας είναι να αποκτήσει το κατεργαζόμενο τεμάχιο επιθυμητή μορφή και διαστάσεις μέσα σε επιτρεπόμενα όρια ανοχών και ακόμη την απαραίτητη ποιότητα των τεχνολογικών επιφανειών, ώστε αυτό να μπορέσει να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις λειτουργικές απαιτήσεις κατά τη χρήση του, για την οποία και προορίζεται.

Η πλειοψηφία των βιομηχανικών εφαρμογών των κατεργασιών κοπής αφορά καθαρά μέταλλα, μεταλλικά κράματα, κεραμικά ή και άλλα υλικά και υλοποιείται με τη βοήθεια ειδικών μηχανών που προσφέρουν την απαιτούμενη ισχύ για την κατεργασία. Οι μηχανές αυτές ονομάζονται εργαλειομηχανές και κάθε μια από αυτές έχει διαφορετική φιλοσοφία υλοποίησης της κοπής, προσφέροντας συγκεκριμένη ανά κατεργασία κινηματική ανάμεσα στους δύο βασικούς παράγοντες της κοπής: το κοπτικό εργαλείο και το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Ένα βασικό κριτήριο για την ταξινόμηση των κατεργασιών κοπής είναι η μορφή του κοπτικού εργαλείου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθούμε σε κατεργασίες, όπως η τόννευση, η διάτρηση και το φρεζάρισμα τόσο στο μακρόκοσμο, αλλά κυρίως στο μικρόκοσμο, επισημαίνοντας τα χαρακτηριστικά τους, τις διαφορές τους, αλλά και μελλοντικές προοπτικές βελτίωσης και ανάπτυξής τους. Επίσης γίνεται εκτενής αναφορά σε όλες τις κύριες κατηγορίες των υλικών κατασκευής των κοπτικών εργαλείων.

Οι μικροκατεργασίες (μικροτόννευση, μικροφρεζάρισμα, μικροδιάτρηση) αποτελούν ένα ραγδαία αναπτυσσόμενο πεδίο εφαρμογής αλλά και έρευνας λόγω των διαρκώς αυξανόμενων απαιτήσεων για ολοένα και μικρότερες διαστάσεις σε εξαρτήματα και κατασκευές, που βρίσκουν εφαρμογή σε

*ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΑΚΡΟΚΟΣΜΟ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΟΣΜΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ
ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΤΟΥΣ*

τομείς όπως η βιομηχανία και η ιατρική. Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται οι μηχανισμοί αυτών των κατεργασιών και οι παράγοντες που τις επηρεάζουν σε επίπεδο μικροκλίμακας, παρουσιάζονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους και δίνονται παραδείγματα εφαρμογών. Τέλος, αναφέρονται οι τάσεις βελτιστοποίησης για την παραγωγή αλλά και τη χρήση των διαφόρων μικροεργαλείων.

Λέξεις κλειδιά: Κατεργασίες Αφαίρεσης Υλικού, Κοπή, Τόρνευση, Φρεζάρισμα, Διάτρηση, Υλικά Κατασκευής Εργαλείων, Μικροκοπή, Επίδραση Κλίμακας

Abstract

The term material removal process characterizes a group of technologies, whose aim is to remove the unwanted material from a workpiece.

The majority of industrial applications of machining techniques utilizes alloys, ceramics and many other materials and get their energy through special equipment. These are well known as machine tools and each one of them provides different ways of cutting, providing specific kinetics for each of the two main cutting parameters: cutting tool and workpiece. The basic criteria for the classification of cutting processes is the form of the cutting tool.

In this diploma thesis, we focus our research in machining processes, as turning, drilling and milling, which are analyzed in macro and micro scale. Also their attributes, their differences, and their future developments are described. Furthermore, the main categories of manufacturing materials are presented.

Micromachining processes (microturning, microdrilling, micromilling) are a rapidly growing field of application and investigation because of the increasing demands for even smaller dimensions in components and structures that find implementation in areas such as industry and medicine. More specifically, the mechanisms of these treatments and the factors that impact at the microscale, with the features and application examples are given. Finally there is reference about optimization trends for their production and the use of various microtools.

Key words: *Machining of material removal, Cutting, Turning, Milling, Drilling, Tool Manufacturing Materials, Microcutting, Size Effect*

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Γενικά περί κατεργασιών	15
1.1 Εισαγωγή	15
1.2 Αρχές της κοπής	16
1.3 Γεωμετρία της κοπής	19
1.4 Συνθήκες κοπής	22
1.4.1 Θερμοκρασία κοπής.....	22
1.4.2 Δύναμη κοπής.....	23
1.4.3 Ακρίβεια της κατεργασίας.....	24
1.5 Βασικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού.....	25
1.5.1 Τόρνευση.....	25
1.5.2 Φρεζάρισμα.....	28
1.5.3 Διάτρηση.....	30
1.5.4 Λείανση.....	34
1.6 Μη συμβατικές κατεργασίες	35
1.7 Μετάβαση από τις κοπές μακροκλίμακας στις μικροκοπές 37	
1.8 Αρχές μικροκοπής	37
1.9 Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας και του λόγου α/r .	39
1.10 Επίδραση κλίμακας.....	42
1.11 Δυνάμεις κοπής.....	45
1.12 Εκτίμηση πρόωσης	47
1.13 Αστάθεια (Κραδασμοί)	48
1.14 Έλλειψη ζυγοστάθμισης.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μικροκατεργασίες	50
2.1 Μικρο-τόρνευση	50

2.1.1	Τραχύτητα επιφάνειας	54
2.1.2	Ρυθμός Αποβολής Υλικού	55
2.1.3	Φθορά του Εργαλείου.....	56
2.1.4	Δύναμη Κοπής.....	57
2.1.5	Μελλοντικές προοπτικές	59
2.2	Μικροδιάτρηση.....	60
2.2.1	Επίδραση κλίμακας κατά τη μικροδιάτρηση χάλυβα	60
2.3	Μικροφρεζάρισμα καθαρού χαλκού.	66
2.3.1	Δημιουργία αποβλίττου	67
2.3.2	Φθορά εργαλείου.....	68
2.3.3	Απόδοση του κοπτικού εργαλείου	73
2.3.4	Ανάλυση δύναμης κοπής μικροφρεζαρίσματος.....	74
2.4	Σχέση θερμοκρασίας κοπής και παραμέτρων κοπής για μικροφρεζάρισμα.....	76
2.4.1	Αριθμητική Προσομοίωση Πεπερασμένων Στοιχείων - Μέγεθος πλέγματος προσομοίωσης.....	76
2.4.2	Δημιουργία του δισδιάστατου μοντέλου.....	78
2.4.3	Παραμετρική ανάλυση προσομοίωσης	80
2.4.4	Πείραμα μέτρησης θερμοκρασίας κοπής μικροφρεζαρίσματος.....	84
2.4.5	Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα αποτελέσματα προσομοίωσης.....	86
2.5	Ποιότητα επιφάνειας στις μικροκατεργασίες.....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Υλικά κοπτικών εργαλείων		92
3.1	Εισαγωγή	92
3.2	Χάλυβας, ταχυχάλυβας και χυτά κράματα	97
3.3	Σκληρομέταλλα	100
3.3.1	Κατασκευή προϊόντων καρβιδίου.....	102

3.3.2	Ταξινόμηση των εργαλείων καρβιδίου	104
3.3.3	Εργαλεία επικαλυμμένου καρβιδίου.....	106
3.4	Κεραμικά και μεταλλοκεραμικά εργαλεία.....	111
3.5	Εργαλεία από διαμάντι, κυβικό βοριονιτρίτη και ενισχυμένους ινοκρυστάλλους	114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	Μικροεργαλεία και φθορά τους.....	126
4.1	Εισαγωγή στα Μικροεργαλεία	126
4.2	Μικρο-εργοστάσια	128
4.3	Χρόνος Ζωής Κοπτικών Εργαλείων	131
4.3.1	Υλικά τεμαχίου και εργαλείου.....	132
4.3.2	Συνθήκες κοπής.....	132
4.3.3	Γεωμετρική μορφή εργαλείου.....	133
4.3.4	Υγρό κοπής.....	134
4.4	Βιβλιογραφική ανασκόπηση φθοράς μικροεργαλείων	137
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:	Μελλοντικές Προοπτικές	142
Βιβλιογραφία.....		145

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Οι βασικοί συντελεστές της κοπής [10].....	17
Εικόνα 1.2: Ψευδόκοψη [10]	19
Εικόνα 1.3: Βασικές έννοιες της κοπής [3].....	21
Εικόνα 1.4: Κινηματική τórνευσης [10]	26
Εικόνα 1.5: Μέρη του τórνου [5].....	27
Εικόνα 1.6: Κινηματική της διάτρησης και είδη οπών [10]	31
Εικόνα 1.7: Σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού κάθετου δραπάνου, καθώς επίσης ένα πυργωτό δράπανο [10]	32
Εικόνα 1.8: Γεωμετρία ελικοειδούς δραπάνου [5].....	33
Εικόνα 1.9: Εφαρμογές λείανση [9]	35
Εικόνα 1.10: Διαμόρφωση κατεργαζόμενης επιφάνειας κατά τη μικροκοπή [37].....	38
Εικόνα 1.11: Πολύ μεγάλες τιμές για α/r με μικρές τιμές για r - Αρχικό στάδιο κοπής [15].....	40
Εικόνα 1.12: Μικρές τιμές για α/r με μεγαλύτερες τιμές για r - Αρχικό στάδιο κοπής [15].....	40
Εικόνα 1.13: Κρίσιμη τιμή για α/r - Αρχικό στάδιο κοπής [15].....	41
Εικόνα 1.14: Δυνάμεις μικροκοπής στην κατεύθυνση πρόωσης [16] ..	45
Εικόνα 1.15: Φθορά άκρων εργαλείων μακροκοπής με στρογγυλεμένη ακμή [88]	47
Εικόνα 1.16: Παραγωγή αποβλίττου (a) χωρίς δόνηση, (b) εξαναγκασμένη δόνηση (c) αναγεννητικός κραδασμός [81].....	48
Εικόνα 2.1: Μικροτόρνευση [48]	51
Εικόνα 2.2: Εγκάρσια τομή μιας κατεργασίας [54]	52
Εικόνα 2.3: Παράμετροι διαδικασίας που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της μικροτόρνευσης [48]	53

Εικόνα 2.4: Σχέση της ταχύτητας περιστροφής με την ποιότητα τη επιφάνειας με μεταβλητό βάθος κοπής, ρυθμό πρόωσης και ακτίνα άκρου του εργαλείου. [62]	54
Εικόνα 2.5: Επίδραση της ταχύτητας κοπής στη φθορά του άκρου του κοπτικού εργαλείου [68]	56
Εικόνα 2.6: Δυνάμεις κοπής σε σύγκριση με τη μεταβολή του βάθους κοπής [71].....	58
Εικόνα 2.7: Δυνάμεις κοπής σε σύγκριση με τη μεταβολή της πρόωσης [71].....	58
Εικόνα 2.8: Δυνάμεις κοπής σε σύγκριση με τη μεταβολή της ταχύτητας [71].....	59
Εικόνα 2.9: Γεωμετρία μικροδραπάνου ($d=100 \mu\text{m}$) [73].....	60
Εικόνα 2.10: Καμπύλες ροής και μικροδομή υλικών κατεργασίας [73]	61
Εικόνα 2.11: Πειραματική διάταξη δοκιμών μικροδιάτρησης [73]	62
Εικόνα 2.12: Σχέση πρόωσης με το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου [73].....	63
Εικόνα 2.13: Επίδραση της ταχύτητας κοπής με την πρόωση για μικροδιάτρηση χάλυβα [73]	64
Εικόνα 2.14: Η επίδραση κλίμακας στο υλικό κατεργασίας [73]	65
Εικόνα 2.15: Η επίδραση κλίμακας για τη γεωμετρία του δραπάνου [73].....	65
Εικόνα 2.16: Πειραματική διάταξη μικροφρεζαρίσματος καθαρού χαλκού [76].....	67
Εικόνα 2.17: (a) Διαμόρφωση σπειροειδούς αποβλίττου υπό ταχύτητα κοπής 75 m/min, πρόωση 350 mm/min και βάθος κοπής 0,15 mm (b) Θραύσματα αποβλίττων για ταχύτητα κοπής 75 m/min, πρόωση 350 mm/min και βάθος κοπής 0,15 mm [76].....	68
Εικόνα 2.18: (a) Συνήθως παρατηρούμενη φθορά άκρου κατά την κατεργασία καθαρού χαλκού, χρησιμοποιώντας εργαλείο ειδικών μικροκόκκων καρβιδίου, διαμέτρου 1 mm και έλικας 25° (b) Συνήθως	

παρατηρούμενη φθορά άκρου κατά την κατεργασία καθαρού χαλκού, χρησιμοποιώντας εργαλείο ειδικών μικροκόκκων καρβιδίου, διαμέτρου 1 mm και έλικας 30° [76]	70
Εικόνα 2.19: Επίδραση βάθους κοπής για ταχύτητα κοπής 40 mm/min και πρόωσης 350 mm/min για έλικα 30° [76].....	71
Εικόνα 2.20: Επίδραση βάθους κοπής για ταχύτητα κοπής 40 mm/min και πρόωσης 350 mm/min για έλικα 25° [76].....	71
Εικόνα 2.21: Επίδραση του βάθους κοπής υπό διάφορες ταχύτητες κοπής για πρόωση 200 mm/min [76]	72
Εικόνα 2.22: Επίδραση της γωνίας έλικας για βάθος κοπής 0,15 mm από ταχύτητα κοπής 40m/min και πρόωση 350 mm/min [76].....	73
Εικόνα 2.23: Δυνάμεις κοπής υπό ταχύτητα κοπής 75 m/min, πρόωση 350 m/min και βάθος κοπής 0,25 mm [76].....	75
Εικόνα 2.24: Απλοποιημένο μοντέλο δοκιμής [79]	77
Εικόνα 2.25: Εργαλείο μικροφρεζαρίσματος όπως φαίνεται από μικροσκόπιο [79].....	78
Εικόνα 2.26: Πρώτο βήμα της προσομοίωσης [79].....	79
Εικόνα 2.27: Διάγραμμα δύναμης κοπής ως προς το χρόνο [79].....	80
Εικόνα 2.28: Τάση της θερμοκρασίας κοπής για διαφορετικές ταχύτητες κοπής [79].....	81
Εικόνα 2.29: Τάση της φθοράς για διαφορετικές ταχύτητες κοπής [79]	82
Εικόνα 2.30: Τάση της θερμοκρασίας κοπής για διαφορετικές προώσεις [79].....	83
Εικόνα 2.31: Τάση της φθοράς για διαφορετικές προώσεις [79]	84
Εικόνα 2.32: Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα και σχήμα κατεργασίας, (α) Μικροφρεζομηχανή, (b) Κοπτικό εργαλείο μικροάκρου ,(c) Σχήμα κατεργασίας [79]	85
Εικόνα 2.33: Θερμοκρασίες κοπής που πάρθηκαν από βίντεο [79]	86

Εικόνα 2.34: Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωση και των πειραμάτων υπό διαφορετικές ταχύτητες κοπής [79]	87
Εικόνα 2.35: Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραμάτων υπό διαφορετικές προώσεις [79]	88
Εικόνα 2.36: Τυπικές επιφανειακές προεξοχές ύστερα από μικροφρεζάρισμα (υλικό κατεργασίας: κράμα NiTi με μνήμη σχήματος) [89].....	89
Εικόνα 2.37: Δημιουργία αποβλίττου κατά τη μικροδιάτρηση (διάμετρος 250 μm), (a) απόβλιττο εντός των ορίων των κόκκων (b) απόβλιττο κατά μήκος των ορίων των κόκκων (c) απόβλιττο πάνω σε ένα μικρό κόκκο (d) όρια κόκκων τα οποία ακολουθούν την τοπολογία του αποβλίττου	91
Εικόνα 3.1: Σκληρότητα του υλικού του κοπτικού εργαλείου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [16]	94
Εικόνα 3.2: Εύρος ιδιοτήτων διαφόρων ομάδων κοπτικών εργαλείων [33].....	95
Εικόνα 3.3: Σύγκριση μεταξύ των βασικών κατηγοριών υλικών κοπτικών εργαλείων [33]	96
Εικόνα 3.4: Κοπτικά εργαλεία από ταχυχάλυβα [18]	98
Εικόνα 3.5: Μονάδα φυσικής εναπόθεσης ατμών [35]	99
Εικόνα 3.6: Κοπτικά εργαλεία από καρβίδιο του βολφραμίου [35] ...	101
Εικόνα 3.7: Αναμειγμένη κόνη καρβιδίου του βολφραμίου [21]	103
Εικόνα 3.8: Εξαρτήματα επικαλυμμένου καρβιδίου για τόννευση χυτοσιδήρου υψηλής ταχύτητας [36]	107
Εικόνα 3.9: Κοπτικό εργαλείο καρβιδίου με επικάλυψη νιτρικού τιτανίου [22]	108
Εικόνα 3.10: Διάγραμμα σύνθεσης διαμαντιού – Το νικέλιο χρησιμοποιείται ως καταλύτης [121]	116
Εικόνα 3.11: Μετατροπή της εξαγωνικής διάταξης των ατόμων του γραφίτη σε κυβική διάταξη διαμαντιού [122].....	116

Εικόνα 3.12: Σύνθεση πολυκρυσταλλικού διαμαντιού [123].....	117
Εικόνα 3.13: Μικροδομή πολυκρυσταλλικού διαμαντιού [124]	118
Εικόνα 3.14: Εικόνα 2.30: Τυπική γεωμετρία εργαλίου μονοκρυσταλλικού διαμαντιού [125]	119
Εικόνα 3.15: Διάφοροι τύποι κοπτικών εργαλείων διαμαντιού [120]	119
Εικόνα 3.16: Μικροδομές των πολυκρυσταλλικών υλικών κυβικού βοριονιτρίτη [127].....	121
Εικόνα 3.17: Διάρκεια ζωής εργαλείων κυβικού βοριονιτρίτη σε διαφορετικές ταχύτητες κοπής [128]	122
Εικόνα 3.18: Ρυθμός προόδου της φθοράς του εργαλείου [1]	124
Εικόνα 3.19: Φθαρμένη κοπτική ακμή εργαλείου κυβικού βοριονιτρίτη στα 240 m/min: (a) BZN 6000 (χαμηλού ποσοστού CBN) και (b) BZN 8100 (υψηλού ποσοστού CBN) [128].....	124
Εικόνα 3.20: Λειαντικοί τροχοί και εργαλεία απόξεσης από διαμάντι και κυβικό βοριονιτρίτη [23]	125
Εικόνα 4.1: Μικροεργαλείο φρεζαρίσματος άκρου καρβιδίου του βολφραμίου με δύο αυλακώσεις [16]	127
Εικόνα 4.2: Εικόνα μικροεργαλείων από ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης [121]	128
Εικόνα 4.3: (a) μικροεργοστάσιο (b) μηχανήματα μινιατούρων 2 ^{ης} γενιάς (c) εμπορικά διαθέσιμη μηχανή μινιατούρων (d) μηχανή μινιατούρων (e) μικροεργοστάσιο (f) μικροεργαλείο [36, 24].....	129
Εικόνα 4.4: Πειράματα φρεζαρίσματος μικροάκρου υπό συνθήκες ελάχιστης ποσότητας λίπανσης και ξηρές συνθήκες (υλικό κατεργασίας: NiTi κράμα με μνήμη σχήματος, ταχύτητα κοπής: $V_c=33$ m/min, βάθος κοπής: $a_p=10\mu\text{m}$, πλάτος κοπής $a_e=40\mu\text{m}$, πρόωση $f_z=12$ μm , επιστοιχειωμένο καρβίδιο με επένδυση TiAlN, $d=400$ μm) [89] ..	136
Εικόνα 4.5: Φρεζάρισμα μικροάκρου υπό παροχή ξηρού πάγου (υλικό κατεργασίας: NiTi κράμα με μνήμη σχήματος, ταχύτητα κοπής: $V_c=19$ m/min, βάθος κοπής: $a_p=10\mu\text{m}$, πλάτος κοπής $a_e=10\mu\text{m}$, πρόωση $f_z=20$ μm , επιστοιχειωμένο καρβίδιο με επένδυση TiAlN, $d=400$ μm ,	

*ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΑΚΡΟΚΟΣΜΟ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΟΣΜΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ
ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΤΟΥΣ*

απόσταση ακροφυσίου: 80mm, διακοπτόμενη παροχή ξηρού πάγου)
[89]..... 137

Εικόνα 4.6: Επίδραση κλιμάκωσης στη γεωμετρία του εργαλείου και
στη φθορά (υλικό κατεργασίας: 40CrMnMo7, 50 HRC, ταχύτητα κοπής
 $V_c=200/100$ m/min, βάθος/ πλάτος κοπής: $a_p= a_e =0.04*d$, πρόωση
 $f_z=0.01*d$, υλικό εργαλείου επιστοιχειωμένο καρβίδιο με επένδυση
TiAlN,d=400 μ m) [89]..... 139

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1 Μη συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες.....	37
Πίνακας 2.1: Ακρίβεια προσομοίωσης σε σχέση με το μέγεθος του πλέγματος [79].....	77
Πίνακας 3.1: Ιδιότητες υλικών κοπτικών εργαλείων [1]	96
Πίνακας 3.2: Χρώμα διαφόρων τύπων επικαλύψεων καρβιδίων [23]	110

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Γενικά περί κατεργασιών

1.1 Εισαγωγή

Ως συμβατική κατεργασία ορίζεται η πρόσδοση επιθυμητής μορφής σε ένα μεταλλικό κομμάτι, μέσω μηχανικής αφαίρεσης του πλεονάζοντος υλικού με τη βοήθεια κοπτικού εργαλείου.

Οι κατεργασίες μπορούν να ταξινομηθούν κατά DIN στις εξής κατηγορίες:

- 1) Αρχέγονες κατεργασίες: το υλικό αρχικά δεν έχει συγκεκριμένο σχήμα, αλλά αποκτά καθορισμένη γεωμετρία μετά από τη μορφοποίηση (χύτευση, κνιομεταλλουργία).
- 2) Διαμορφώσεις: διακρίνονται σε διαμορφώσεις του συμπαγούς υλικού (σφυρηλάτηση, έλαση, διέλαση, ολκή, κλπ.) και σε διαμορφώσεις του επιπέδου ελάσματος (κάμψη, απότμηση, βαθεία κοίλανση, κλπ.). Το βασικό τους χαρακτηριστικό είναι η πλαστική παραμόρφωση και η διατήρηση της μάζας του υλικού.
- 3) Κοπές ή κατεργασίες αποβολής υλικού: σε αυτές τις κατεργασίες, η μορφοποίηση επιτυγχάνεται με συνδυασμό πλαστικής παραμόρφωσης σε διάτμηση και αποβολή υλικού (τόρνευση, διάτρηση, φρεζάρισμα, λείανση, κλπ.).
- 4) Επιφανειακές κατεργασίες: οι κατεργασίες αυτές δεν επιφέρουν αλλαγή στο σχήμα του τεμαχίου αλλά μεταβάλλουν τις ιδιότητες της κατεργασμένης επιφάνειας, όσον αφορά στην ενίσχυση και την προστασία της. Διακρίνονται σε θερμικές, θερμοχημικές και επικαλύψεις.
- 5) Κατεργασίες σύνδεσης: διακρίνονται σε μεταλλουργικές συνδέσεις (συγκολλήσεις) και μηχανικές συνδέσεις (κοχλιώσεις, ηλώσεις, κλπ.).

Μια διαφορετική ταξινόμηση μπορεί να επιτευχθεί με κριτήριο την εφαρμοζόμενη θερμοκρασία κατεργασίας, λαμβάνοντας υπ' όψιν δύο χαρακτηριστικές θερμοκρασίες του υλικού που κατεργαζόμαστε, τη θερμοκρασία τήξης T_M και τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης T_r (0.4 - 0.5 T_M). Διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες κατεργασιών:

- 1) Ψυχρές κατεργασίες: πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_e .

2) Θερμές κατεργασίες: πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες ανάμεσα στη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης και τη θερμοκρασία τήξης του κατεργαζόμενου υλικού.

3) Ημίθερμες κατεργασίες: συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και περιορίζουν τα μειονεκτήματα των δύο προηγούμενων κατηγοριών, ενώ λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασίες ανάμεσα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του κατεργαζόμενου υλικού.

Οι κατεργασίες κοπής, από την βιομηχανική επανάσταση και μετά όπου πήραν μορφή που μοιάζει πολύ με τη σημερινή, ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των κατεργασιών μορφοποίησης μεταλλικών προϊόντων και ειδικότερα, στις κατεργασίες αφαιρέσεως μετάλλου. Με τις κατεργασίες κοπής δίνουμε σε ένα μεταλλικό κομμάτι την επιθυμητή μορφή, μέσω μηχανικής αφαίρεσης του πλεονάζοντος υλικού με τη βοήθεια του κοπτικού εργαλείου. Η ευρεία χρήση των κατεργασιών κοπής στην βιομηχανία μέχρι σήμερα έγκειται καθαρά στο συγκριτικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν προς τις άλλες κατεργασίες μορφοποίησης, ειδικά με την εμφάνιση των εργαλειομηχανών CNC . Αυτό το πλεονέκτημα αφορά την ακρίβεια των διαστάσεων, την δυνατότητα απόδοσης μορφής υψηλής στάθμης και την καλύτερη τραχύτητα επιφανείας στο κατεργαζόμενο κομμάτι, με το ανάλογο βέβαια παραγωγικό κόστος.

Οι κατεργασίες κοπής ομαδοποιούνται ανάλογα με τη μορφή του κοπτικού εργαλείου, δηλαδή αν έχει γεωμετρικώς καθορισμένη μορφή ή μη. Διακρίνονται οι κατεργασίες απλής σημειακής επαφής (στην αποβολή υλικού μετέχει μόνο μία κόψη του κοπτικού εργαλείου) όπως η τórνευση και το πλάνισμα και αυτές με πολλαπλή σημειακή επαφή όπως το φρεζάρισμα και η διάτρηση. Τέλος η κάθε κατεργασία χωρίζεται επίσης σε κατηγορίες, ανάλογα με το είδος των τεχνικών επιφανειών των τεμαχίων που αναφέρεται (επιπέδων, κυλινδρικών, ειδικής μορφής κλπ). [1, 3, 4]

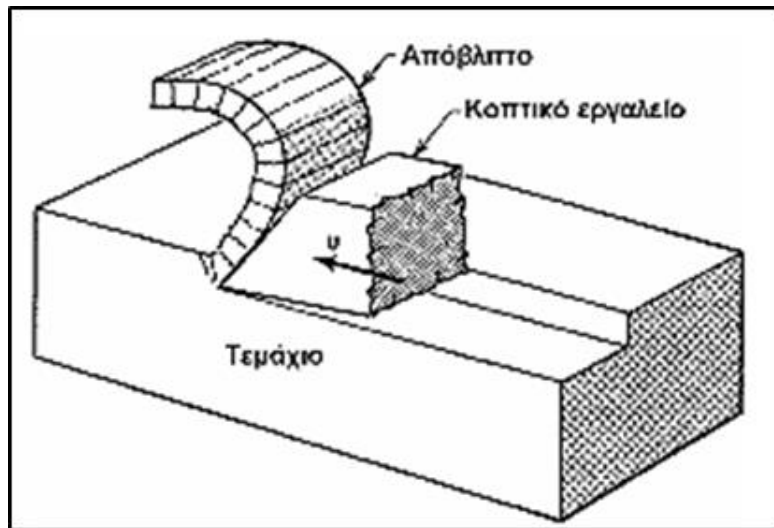
1.2 Αρχές της κοπής

Οι βασικοί συντελεστές που παίζουν σημαντικό ρόλο στην κοπή είναι (Εικόνα 1.1):

- Κατεργαζόμενο τεμάχιο (ΤΕ)
- Κοπτικό εργαλείο (ΚΕ)

- Απόβλιττο (το αφαιρούμενο υλικό)

Το ΚΕ κινείται σε σχέση προς το ΤΕ σε συγκεκριμένη κατεύθυνση (διεύθυνση κοπής) με ταχύτητα u , ενώ συγχρόνως σχηματίζεται το απόβλιττο που κινείται επί του ΚΕ μετά από ισχυρή πλαστική παραμόρφωσή του.



Εικόνα 1.1: Οι βασικοί συντελεστές της κοπής [10]

Κατά την κοπή συναντάμε δύο κινήσεις:

❖ Η Πρωτεύουσα ή Κύρια κίνηση παρέχεται από την εργαλειομηχανή στο τεμάχιο ή το εργαλείο και εξασφαλίζει τοπική σχετική κίνηση του ενός ως προς το άλλο. Αποτέλεσμα αυτής της κίνησης, κατά την οποία απορροφάται και το μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος κοπής, είναι είτε η προσέγγισή τεμαχίου και εργαλείου, είτε η αφαίρεση υλικού.

❖ Η Δευτερεύουσα ή κίνηση Πρόωσης σε συνδυασμό με την κύρια αποδίδει σε ορισμένο μήκος του τεμαχίου την κατεργασμένη επιφάνειά του.

Οι κινήσεις αυτές ποικίλουν στις διάφορες εργαλειομηχανές. Για παράδειγμα κατά την τόννευση η κύρια κίνηση παρέχεται στο τεμάχιο που περιστρέφεται ενώ το εργαλείο εκτελεί την δευτερεύουσα καθώς μετατίθεται ευθύγραμμα.

Η αφαίρεση του υλικού στις εργαλειομηχανές επιτυγχάνεται μέσω της διαφορετικής κινηματικής του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, με καθορισμένο βάθος (το οποίο ονομάζεται **βάθος κοπής**) και προδιαγεγραμμένη ταχύτητα εισχώρησης.

Με κριτήριο την εντατική κατάσταση του τεμαχίου διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες κατεργασιών:

- 1) Επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση: η ροή του υλικού είναι ίδια σε κάθε επίπεδο κάθετο προς έναν από τους άξονες του συστήματος αναφοράς (x, y, z), δηλαδή είναι ανεξάρτητη της τρίτης διάστασης.
- 2) Επίπεδη εντατική κατάσταση: αναφερόμενοι στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων όπως και προηγουμένως, η ροή του υλικού δεν είναι πια ανεξάρτητη από την τρίτη διάσταση, αλλά δεν υπάρχει τάση κατά τον άξονα αυτόν.
- 3) Αξονοσυμμετρική πλαστική παραμόρφωση: υφίσταται αξονοσυμμετρία της ροής του υλικού. Το σύστημα αναφοράς είναι σε κυλινδρικές συντεταγμένες (r, θ, z) και όσον αφορά στην εντατική κατάσταση, οι τάσεις κατά τους άξονες r και θ είναι ίσες, αλλά διαφορετικές από την τάση κατά τον άξονα z .
- 4) Τρισδιάστατη πλαστική παραμόρφωση: ανεξάρτητα από το είδος του συστήματος αναφοράς (καρτεσιανό ή κυλινδρικό), η εντατική κατάσταση χαρακτηρίζεται από διαφορετικές τιμές των τριών κύριων τάσεων, δηλαδή οι σ_1, σ_2 και σ_3 διαφέρουν μεταξύ τους. [2, 3, 10]

Το υλικό του τεμαχίου που απομακρύνεται λέγεται **απόβλιττο** (γρέζι) και μπορεί, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες κατεργασίας και το υλικό του τεμαχίου, να έχει διάφορες μορφές.

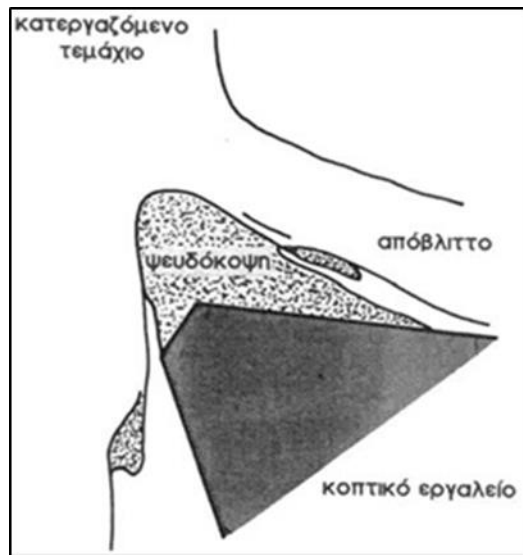
Σύμφωνα με την κατάταξη του Ernst υπάρχουν 3 είδη αποβλίττου:

- Ασυνεχές απόβλιττο
- Συνεχές απόβλιττο
- Συνεχές απόβλιττο με ψευδοακμή

Σε περιπτώσεις που το συνεχές απόβλιττο αποκτά μεγάλο μήκος (ιδίως στην κατεργασία όλκιμων υλικών), με αποτέλεσμα να επιφέρει δυσκολίες αλλά

και κινδύνους κατά την ώρα όπως κατεργασίας, χρησιμοποιούνται κατάλληλες διαμορφώσεις του κοπτικού εργαλείου που ονομάζονται **γρεζοθραύστες**. Ένα φαινόμενο που σχετίζεται με την δημιουργία του συνεχούς αποβλίττου είναι και η δημιουργία όπως **ψευδόκοψης**.

Κατά την διαδικασία δημιουργίας του αποβλίττου, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί στην κόψη του εργαλείου η ψευδόκοψη. Πρόκειται για σφηνοειδές, ασύμμετρο σώμα από ισχυρά παραμορφωμένο και σκληρυμένο υλικό του τεμαχίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2. Στην εικόνα αυτή διακρίνονται η κοπτική ακμή του εργαλείου που έχει μορφή σφήνας, το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το απόβλιττο που παράγεται και η ψευδόκοψη ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο. Η ψευδόκοψη αυτή δημιουργείται από επάλληλα στρώματα υλικού του τεμαχίου, που προσκολλώνται στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου. [1,2]



Εικόνα 1.2: Ψευδόκοψη [10]

1.3 Γεωμετρία της κοπής

Διακρίνουμε τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά (Εικόνα 1.3):

- **Επιφάνεια αποβλίττου:** Είναι η επιφάνεια της σφήνας, πάνω στην οποία ολισθαίνει το απόβλιττο κατά την κίνησή του.
- **Ελεύθερη επιφάνεια:** Είναι η επιφάνεια της σφήνας που αντικρίζει την κατεργασμένη επιφάνεια.

*ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΑΚΡΟΚΟΣΜΟ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΟΣΜΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ
ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΤΟΥΣ*

•*Κόψη*: Είναι η ακμή της σφήνας που προκύπτει ως τομή των δύο παραπάνω επιφανειών.

•*Γωνία αποβλίττου, γ*: Σχηματίζεται από την επιφάνεια αποβλίττου και το κάθετο επίπεδο στην κατεργασμένη επιφάνεια που διέρχεται από την κόψη του ΚΕ. Μπορεί να είναι θετική, αρνητική ή μηδενική.

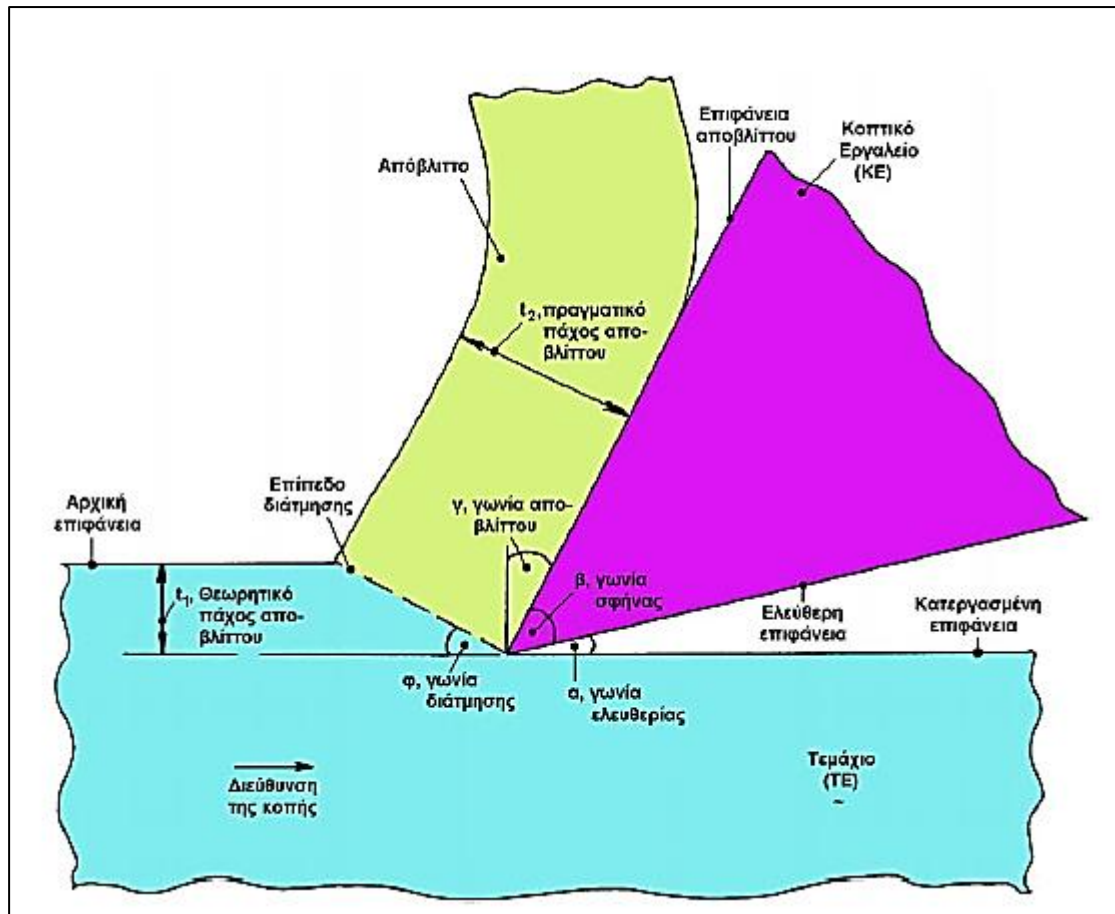
•*Γωνία ελευθερίας, α*: Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια του ΚΕ και την κατεργασμένη επιφάνεια.

•*Γωνία σφήνας, β*: Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια και από την επιφάνεια αποβλίττου.

Ισχύει :

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

Η γωνία αποβλίττου «γ» είναι η σημαντικότερη απ' όλες. Όσο μεγαλώνει, τόσο μικραίνει η δύναμη κοπής αλλά εξασθενεί η ακμή και επέρχεται γρηγορότερα στόμωση του εργαλείου. Όσο σκληρότερο είναι το υλικό λοιπόν, τόσο η γωνία αποβλίττου πρέπει να είναι μικρότερη. Παράλληλα πρέπει να αναφέρουμε και τη ζώνη διάτμησης, η οποία είναι μια στενή περιοχή όπου το υλικό υφίσταται εφελκυσμό και παραμορφώνεται πλαστικά.



Εικόνα 1.3: Βασικές έννοιες της κοπής [3]

Για διάφορα υλικά, είναι γνωστό πως τα πιο μαλακά κατεργαζόμενα υλικά, απαιτούν πιο αιχμηρή κόψη του κοπτικού σφήνα ενώ τα σκληρά υλικά απαιτούν στιβαρότερο και άρα πιο χοντρό σφήνα. Συνολικά μπορεί να παρατηρηθεί πως όσο πιο μαλακό είναι ένα υλικό, τόσο οι γωνίες κοπής του κοπτικού εργαλείου πρέπει να τείνουν αντίστοιχα σε :

- αύξηση της γωνίας ελευθερίας α
- μείωση της γωνίας σφήνας β
- αύξηση της γωνίας αποβλίττου γ [1, 2, 3, 8]

1.4 Συνθήκες κοπής

Οι παράγοντες κοπής παρουσιάζουν αρκετές ιδιαιτερότητες, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά την κοπή. Αν και έχουν ήδη αναφερθεί οι βασικές παράμετροι κοπής, όπως τα χαρακτηριστικά στοιχεία, οι γωνίες και τα εργαλεία, αξίζει να δούμε συγκεντρωτικά τους παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή τους σε μια τέτοια κατεργασία.

1.4.1 Θερμοκρασία κοπής

Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την κοπή παίζει σημαντικό ρόλο στην όλη κατεργασία, όχι μόνο βέβαια η μέγιστη τιμή της αλλά και πως αυτή κατανέμεται στο εργαλείο, στο απόβλιττο και στην κατεργασμένη επιφάνεια.

Υψηλή θερμοκρασία αναπτύσσεται από:

- Μεγάλα χαρακτηριστικά στοιχεία κοπής (ταχύτητα κοπής, πρόωσης και βάθος κοπής), αφού το εργαλείο κόβει μεγαλύτερο μέρος του τεμαχίου σε μικρό χρόνο και η θερμότητα δεν διαχέεται επαρκώς.
- Υψηλή σκληρότητα του τεμαχίου, καθώς η τριβή που αναπτύσσεται και παραμορφώνει το υλικό του τεμαχίου είναι μεγαλύτερη.
- Υλικά με κακή θερμική αγωγιμότητα ή με μικρή μάζα, γι' αυτό κατά τις κατεργασίες υψηλής ταχύτητας επεξεργαζόμαστε συνήθως μεγάλα τεμάχια και με καλή θερμική αγωγιμότητα. Παράλληλα, η αγωγιμότητα επηρεάζεται και από της επικαλύψεις των κοπτικών εργαλείων, με αυτές να είναι πλέον απαραίτητες για καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας.
- Μη χρήση ψυκτικού υγρού.
- Μεγάλη γωνία κοπής, ενώ αντίθετα όταν οι γωνίες ελευθερίας και αποβλίττου είναι μικρότερες τότε η θερμοκρασία αυξάνεται.
- Μικρή ακτίνα καμπυλότητας, διότι συγκεντρώνεται η θερμότητα σε μικρότερη επιφάνεια εφόσον η ακμή του κοπτικού εργαλείου είναι μικρότερη.

1.4.2 Δύναμη κοπής

Παρόλο που αναπτύσσονται 3 κύριες (συνιστώσες της δύναμης) δυνάμεις κατά την κατεργασία, η βασική δύναμη που μας ενδιαφέρει είναι η δύναμη κοπής που είναι παράλληλη στην πρωτεύουσα κίνηση. Αυτή μεγαλώνει όσο:

- μειώνεται η ταχύτητα κοπής, όταν όμως αναφερόμαστε σε υψηλές ταχύτητες κατεργασίας, λόγω της αύξησης θερμοκρασίας και της πλαστικής παραμόρφωσης του τεμαχίου.
- αυξάνεται η πρόωση και το βάθος κοπής, εφόσον κόβεται μεγαλύτερο μέρος υλικού στον ίδιο χρόνο. Η δύναμη κοπής αυξάνεται σχεδόν ανάλογα με το βάθος κοπής, ενώ κατά την πρόωση δεν σημειώνεται τόσο σημαντική μεταβολή, ίσως γιατί η κοπή εξαρτάται περισσότερο από την περιοχή της ακμής του εργαλείου.
- μεγαλύτερη είναι η σκληρότητα του κατεργαζόμενου υλικού.
- μικρότερες είναι οι γωνίες κοπής και αποβλίττου, ενώ η γωνία ελευθερίας δεν παίζει σημαντικό ρόλο ως προς τη δύναμη κοπής.
- αυξάνεται η ακτίνα καμπυλότητας της ακμής του κοπτικού εργαλείου, γιατί δυσχεραίνεται η παραμόρφωση του τεμαχίου και η θερμοκρασία είναι μικρότερη.

Η θερμοκρασία και η δύναμη κοπής καθορίζουν και τον χρόνο ζωής του εργαλείου, γιατί η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να κάνει την κατεργασία ευκολότερη, η θερμική καταπόνηση που ασκείται στο εργαλείο όμως είναι μεγαλύτερη, ενώ η δύναμη κοπής θέλουμε να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Λογικό είναι λοιπόν σε κάθε κατεργασία να θέλουμε όσο το δυνατό μικρότερη θερμοκρασία και δύναμη, αλλά βλέπουμε ότι οι περισσότερες συνθήκες κοπής που αποφέρουν μείωση της δύναμης, αποφέρουν και αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ συγχρόνως γνωρίζουμε ότι αύξηση της θερμοκρασίας αποφέρει μείωση της δύναμης κοπής. Παράλληλα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η ακρίβεια της επιφάνειας. Λόγω της σημασίας που έχει για την όλη κατεργασία, εξετάζεται στη συνέχεια.

1.4.3 Ακρίβεια της κατεργασίας

Η ποιότητα της επιφάνειας του κατεργασμένου τεμαχίου και η ακρίβεια της κατεργασίας γενικά επηρεάζεται δυσχερώς από αύξηση της θερμοκρασίας. Όμως αυτό συμβαίνει συνήθως σε υλικά με κακή θερμική αγωγιμότητα, όπου η θερμότητα παραμένει στην κατεργασμένη επιφάνεια και δημιουργεί ανωμαλίες. Σε υλικά με καλή θερμική αγωγιμότητα, όπως ο χάλυβας, η θερμοκρασία δεν επηρεάζει δυσχερώς, αντιθέτως, επειδή με υψηλή θερμοκρασία μειώνεται η δύναμη κοπής, η επιφάνεια παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια. Όμως η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας για κάθε υλικό έχει και τα όρια της.

Για τους καλούς αγωγούς της θερμότητας η υψηλή ταχύτητα βελτιώνει την ποιότητα επιφανείας, όμως μέχρι κάποιο όριο, όχι μόνο λόγω της θερμοκρασίας, αλλά και για μηχανικούς λόγους. Ειδικά για το φρεζάρισμα κατά το οποίο περιστρέφεται το εργαλείο, ενώ θα περιμέναμε με μείωση της δύναμης κοπής που προκαλείται από αύξηση της ταχύτητας να μειώνονται και οι ταλαντώσεις στο κοπτικό εργαλείο, στην πραγματικότητα όσο μεγαλύτερη είναι ταχύτητα περιστροφής των εργαλείων μας, τόσο περισσότεροι κραδασμοί δημιουργούνται. Μάλιστα οι δυνάμεις που προκαλούν αυτές τις ταλαντώσεις αυξάνονται συναρτήσει του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής και μαζί με αυτές, μειώνεται η ποιότητα επιφανείας και η ακρίβεια της κατεργασίας. Για την τόννευση προφανώς δεν παρουσιάζεται αυτό το πρόβλημα με το εργαλείο αλλά με τις ταλαντώσεις του τεμαχίου. Το πρόβλημα ακρίβειας λόγω υψηλής ταχύτητας περιστροφής λύνεται βέβαια με σωστή και ακριβή πρόσδεση των περιστρεφόμενων μερών ή με καλύτερης ποιότητας εργαλειομηχανή, αλλά στις πολύ υψηλές ταχύτητες (άνω των 20.000 rpm) ακόμη παρουσιάζονται μηχανικά προβλήματα.

Η αύξηση του βάθους κοπής και περισσότερο της ταχύτητας προώσεως από την άλλη έχουν σαφή συνέπεια την μείωση της ακρίβεια της κατεργασίας, καθώς αυξάνουν τις δυνάμεις κοπής και αποσταθεροποίησης του εργαλείου. Εμφανές είναι επίσης ότι όσο μεγαλύτερη σκληρότητα παρουσιάζει το υλικό του τεμαχίου, τόσο μεγαλύτερες δυνάμεις αναπτύσσονται και άρα τόσο χειρότερη ακρίβεια..

Αν κατά την επιλογή των συνθηκών κοπής εκτός της θερμοκρασίας, της δύναμης κοπής και της ακρίβειας, προστεθεί και ο χρόνος ζωής του

εργαλείου ως παράγοντας, γίνεται κατανοητό πόσο δύσκολο είναι πολλές φορές να επιλεγούν οι καλύτερες συνθήκες κοπής για μια κατεργασία.

[8, 10, 11, 14, 15]

1.5 Βασικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού

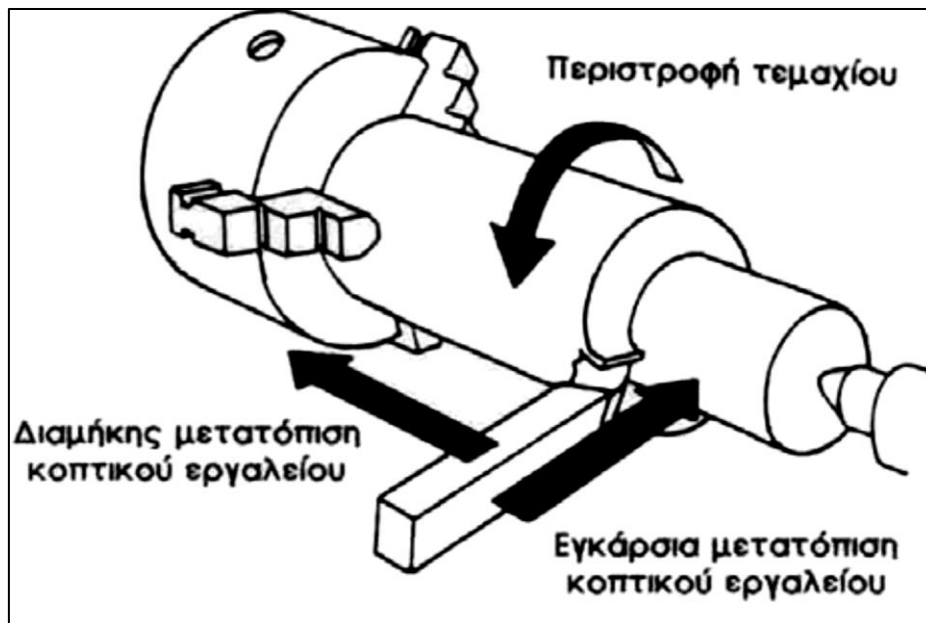
Όπως αναφέρθηκε, με τις κατεργασίες κοπής, ως μέθοδο παραγωγής μεταλλικών προϊόντων, αφαιρείται προοδευτικά προκαθορισμένος κατά στρώσεις όγκος μετάλλου με τη βοήθεια εργαλείου σε σχήμα σφήνας, με πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου υπό μορφή αποβλίττων (γρεζιών) σε μέγεθος και σχήμα που ποικίλλουν κατά περίπτωση κατεργασίας. Έτσι, με τις κατεργασίες κοπής προσδίδεται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο επιθυμητή (προδιαγεγραμμένη) μορφή και διαστάσεις μέσα σε επιτρεπόμενα όρια ανοχών και ακόμη η απαραίτητη ποιότητα των τεχνολογικών επιφανειών του τεμαχίου, ώστε αυτό να μπορέσει να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις λειτουργικές απαιτήσεις κατά τη χρήση, για την οποία προορίζεται. Η κοπή επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του κατάλληλου εκάστοτε κοπτικού εργαλείου, οπωσδήποτε αρκετά σκληρότερου από το υλικό που κατεργαζόμαστε και της συναφούς εργαλειομηχανής, που προσδίδει την απαιτούμενη για την κοπή ισχύ και εκτελεί τις αναγκαίες για την μορφοποίηση του κομματιού κινήσεις, τόσο του κομματιού, όσο και του εργαλείου. [1]

1.5.1 Τόρνευση

Η τόρνευση σαν κατεργασία χρησιμοποιείται από πολύ παλαιά, γύρω όμως στο 1400 μ.Χ. εμφανίστηκαν οι πρώτοι τόρνοι που στην αρχή κινούνταν με μυϊκή δύναμη ή με νερό σαν τους κατοπινούς υδρόμυλους. Με τόρνευση κατεργάζονται τεμάχια συμμετρικά εκ περιστροφής με κατά κανόνα κυκλική διατομή. Κατά την τόρνευση, το κατεργαζόμενο τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, συγκρατημένο στον σφικτήρα (τσοκ) του τόρνου. Με αυτόν τον τρόπο, συγκρούεται με το κοπτικό εργαλείο, το οποίο έχει δυνατότητα εγκάρσιας και διαμήκουσ μετακίνησης και έτσι απομακρύνεται υλικό από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Οι κινήσεις αυτές κατά την τόρνευση.

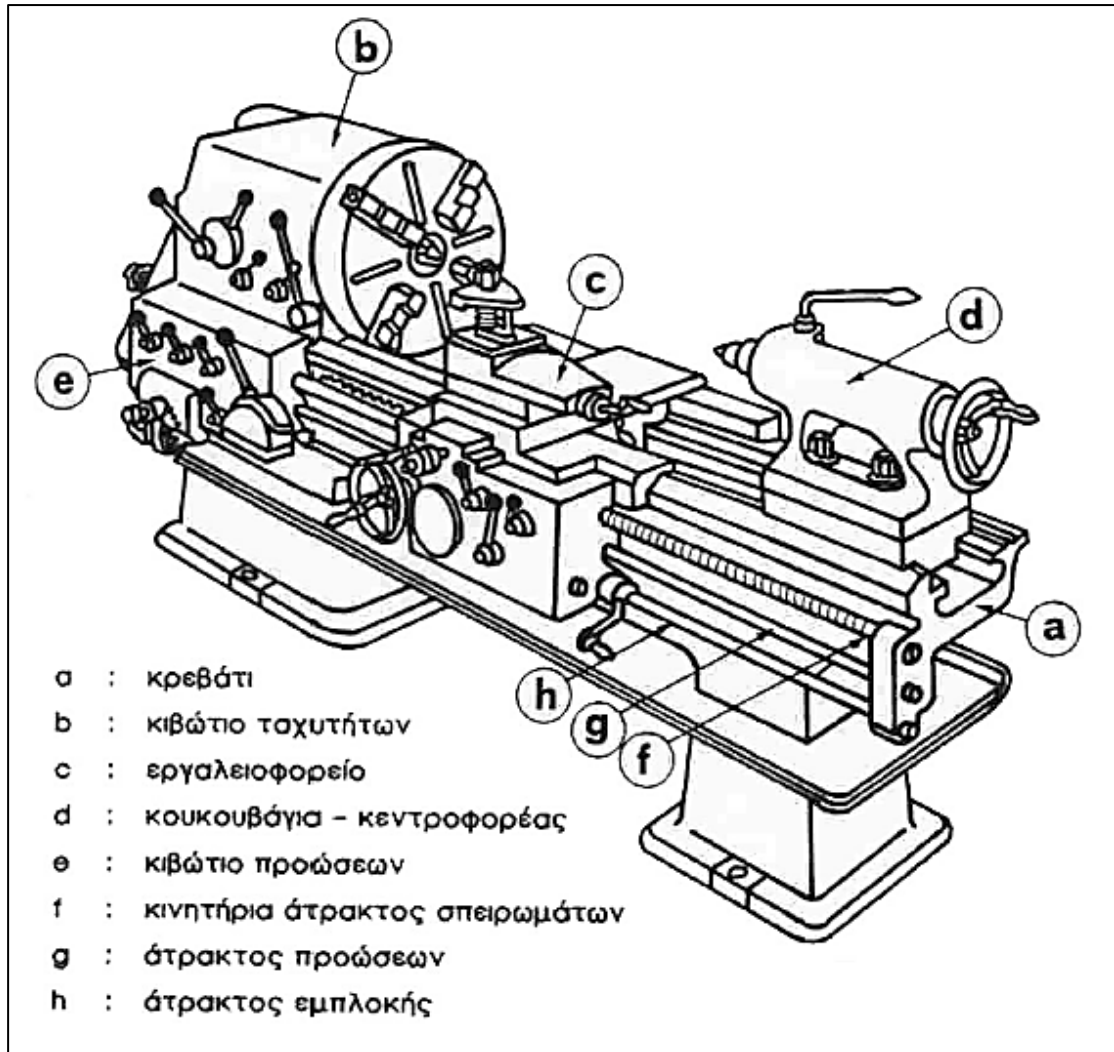
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΑΚΡΟΚΟΣΜΟ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΟΣΜΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ
ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΤΟΥΣ

παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.4. Το εγκάρσιο βάθος εισχώρησης του εργαλείου στο τεμάχιο αποτελεί και το **βάθος κοπής**. [1, 3, 10]



Εικόνα 1.4: Κινηματική τόννευσης [10]

Η εργαλειομηχανή που εξασφαλίζει με ακρίβεια τις κινήσεις του τεμαχίου και του εργαλείου για την τόννευση, είναι ο **τόρνος**. Στην Εικόνα 1.5 παρουσιάζεται σχηματικά ένας τόρνος, όπου διακρίνονται και τα μέρη από τα οποία αποτελείται.



Εικόνα 1.5: Μέρη του τόννου [5]

Ο τόννος αποτελεί μια από τις περισσότερο παραγωγικές εργαλειομηχανές και το 40% περίπου των εργασιών κοπής των μετάλλων γίνονται σε τόννο. Οι σύγχρονοι τόννοι έχουν δυνατότητα παραγωγής καμπύλων εξαρτημάτων, με μεγάλο αριθμό ακρίβειας και μεγάλες ταχύτητες παραγωγής.

Οι τόννοι, όπως και οι περισσότερες εργαλειομηχανές, μπορεί να είναι **συμβατικοί**, πράγμα που σημαίνει πως καθοδηγούνται από τον χειριστή που κάνει όλες τις απαραίτητες κινήσεις και ρυθμίσεις για την κατεργασία, ή να είναι τόννοι **ψηφιακά καθοδηγούμενοι**, όπου οι κινήσεις αλλά και οι ρυθμίσεις απαιτούν πολύ μικρή συμμετοχή του παραδοσιακού χειριστή μια και τις αναλαμβάνει μια ηλεκτρονική μονάδα καθοδήγησης που την χειρίζεται προγραμματιστής. [1, 2]

Η τεχνολογία όμως της κοπής κατά βάση παραμένει η ίδια. Έτσι οι επιλεγόμενες ταχύτητες κοπής, οι προώσεις, τα κοπτικά εργαλεία κ.λπ, καθορίζονται και στις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα. Η αυτοματοποίηση αυτή των κατεργασιών που γίνεται τις τελευταίες δεκαετίες δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να καταργήσει την αναγκαιότητα γνώσης των υλικών, των καταλλήλων συνθηκών κοπής, της συμπεριφοράς της φθοράς των κοπτικών εργαλείων και γενικά αυτού που ονομάζεται **τεχνολογία της κοπής**.

Για την κοπή στην τόννευση χρησιμοποιούνται κοπτικά εργαλεία συνήθως από χάλυβα, ταχυχάλυβα, σκληρομέταλλα και κεραμικά. Η διάρκεια ζωής ενός κοπτικού εργαλείου εξαρτάται κατά πολύ από το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο και από την γεωμετρία της κόψης του.

Στο κοπτικό εργαλείο διακρίνονται δύο χαρακτηριστικά τμήματα, το **στέλεχος** και το **κοπτικό άκρο**. Το μεν στέλεχος χρησιμοποιείται για την συγκράτηση του εργαλείου στον εργαλειοδέτη, ενώ το κοπτικό άκρο περιλαμβάνει τις κοπτικές ακμές που συμμετέχουν στην κοπή. Το στέλεχος είναι από μαλακό υλικό ώστε να δέχεται τα κρουστικά φορτία και τις δυναμικές καταπονήσεις κατά την διάρκεια της κοπής χωρίς να θραύεται.

Στην τόννευση οι συνθήκες κοπής είναι η **ταχύτητα κοπής** που σχετίζεται με τις στροφές περιστροφής του κομματιού και την διάμετρο κοπής, η **πρόωση** και το **βάθος κοπής**. Οι τρεις αυτοί παράγοντες παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατεργασία και η σωστή κάθε φορά επιλογή τους, αποτελεί απαραίτητη γνώση του χειριστή ενός τόννου. [3, 10, 17]

Κατά την τόννευση τεμαχίου διαμέτρου **D** [mm], το οποίο περιστρέφεται με **n** στροφές το λεπτό (rpm), η ταχύτητα κοπής **u**, προκύπτει από την σχέση :

$$u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1.1)$$

1.5.2 Φρεζάρισμα

Με φρεζάρισμα κατεργάζονται τεμάχια από διάφορα υλικά όπως χάλυβα, χυτοσίδηρο, συνθετικά υλικά κ.λπ, με επίπεδες ή καμπύλες επιφάνειες, εσοχές, αυλάκια ακόμα και οδοντωτοί τροχοί. Τα τεμάχια αυτά, συνήθως

εκχονδρίζονται ή φινιρίζονται (αποπερατώνονται), ενώ, όταν απαιτούνται πολύ καλές επιφάνειες, σαν τελική κατεργασία χρησιμοποιείται η λείανση.

Στο φρεζάρισμα τα απόβλιττα απομακρύνονται από ένα περιστρεφόμενο κοπτικό εργαλείο, το οποίο διαθέτει πολλές κοπτικές ακμές διατεταγμένες σε κύκλο, ενώ για να μπορεί να εισέρχεται το εργαλείο στο κατεργαζόμενο κομμάτι, οι κοπτικές ακμές έχουν την μορφή του σφήνα που έχει και το εργαλείο τόννευσης. Η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου αποτελεί και την κύρια κίνηση κοπής. Για την συνέχεια της κοπής το κατεργαζόμενο κομμάτι, το οποίο είναι "δεμένο" στο τραπέζι της εργαλειομηχανής, μετατοπίζεται με προκαθορισμένο ρυθμό, ο οποίος ονομάζεται **πρόωση**. Κατά την διάρκεια της κοπής, τα κοπτικά δόντια μιας φρέζας (φρέζα ονομάζεται η εργαλειομηχανή, αλλά συχνά φρέζα καλείται και το κοπτικό εργαλείο φρεζαρίσματος), εισέρχονται και εξέρχονται το καθένα από το κομμάτι μέσα σε ένα μικρό μέρος της πλήρους περιστροφής του εργαλείου. Αυτό έχει σαν συνέπεια τα κοπτικά δόντια να προλαβαίνουν να απάγουν θερμότητα στο διάστημα που δεν κόβουν και έτσι να μην καταπονούνται θερμικά, όπως το εργαλείο της τόννευσης το οποίο εκτελεί συνεχή κοπή. Η κοπή για αυτό τον λόγο στο φρεζάρισμα, λέγεται διακοπτόμενη.

Η διαμόρφωση διαφόρων μορφών και τεμαχίων στη φρέζα, απαιτεί και διάφορους τύπους εργαλειομηχανών για οικονομικότερη κατεργασία. Έτσι διακρίνονται οι εξής βασικοί τύποι :

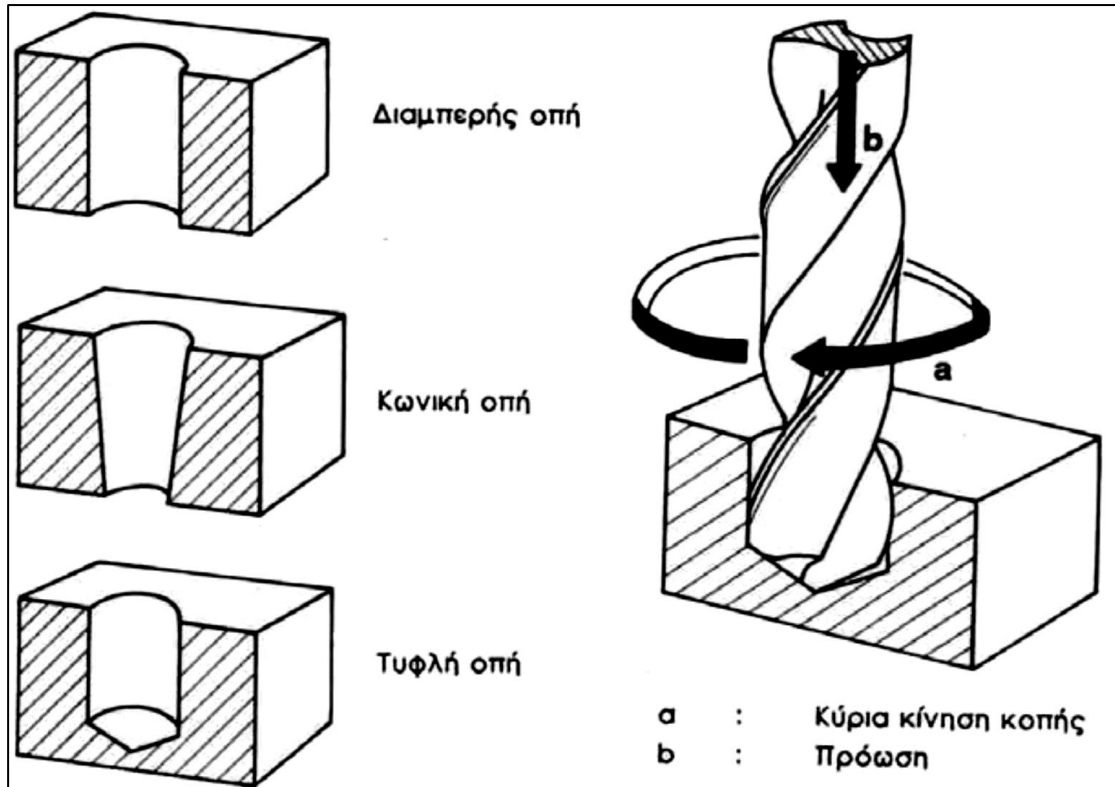
- Οριζόντια φρεζομηχανή
- Κάθετη φρεζομηχανή
- Κέντρο κατεργασίας

Η οριζόντια φρέζα έχει χαρακτηριστικό της, ότι ο κύριος άξονας που μεταφέρει κίνηση στο εργαλείο, είναι οριζόντιος. Χρησιμοποιείται για γενικές εργασίες σε αντίθεση με την κάθετη φρέζα η οποία χρησιμοποιείται περισσότερο για κατεργασίες αποπεράτωσης. Τέτοιες εργαλειομηχανές στην ψηφιακή καθοδήγηση χαρακτηρίζονται και ονομάζονται, από το πλήθος των κατευθύνσεων των κινήσεων οι οποίες μπορούν να καθοδηγηθούν από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και το πρόγραμμα καθοδήγησης. Έτσι μια εργαλειομηχανή η οποία μπορεί και κινεί ταυτόχρονα το τραπέζι στο οριζόντιο επίπεδο, αλλά στην κατακόρυφο δεν υπάρχει αυτόματη καθοδήγηση, είναι μια φρέζα **2 αξόνων**. Αν στην κατακόρυφο υπάρχει καθοδήγηση, αλλά όχι ταυτόχρονα με την καθοδήγηση του οριζοντίου επιπέδου, τότε καλείται **2 1/2 αξόνων**. Αντίστοιχα η ταυτόχρονη

καθοδήγηση του τραπεζιού μιας φρέζας και στις τρεις κατευθύνσεις (δύο οριζόντιες και την κάθετη), την κατατάσσει στις φρέζες **3 αξόνων** ή τριαξονικές και τέλος, ανάλογα με τις δυνατότητες περιστροφής του τραπεζιού ή της προβοσκίδας με το εργαλείο, μπορεί μια φρέζα να είναι **4, 5** ή **6 αξόνων**. Φυσικά όσο οι άξονες αυξάνονται, τόσο η φρέζα παρέχει μεγαλύτερες δυνατότητες και το κόστος της είναι μεγαλύτερο. [1, 3,5, 14]

1.5.3 Διάτρηση

Τα περισσότερα από τα μηχανολογικά εξαρτήματα διαθέτουν οπές διαφόρων μορφών και μεγεθών. Τις περισσότερες φορές τέτοιες οπές κατεργάζονται με διάτρηση. Η διάτρηση σαν κατεργασία χρησιμοποιείται για κατεργασία οπών σε αντικείμενα μεταλλικά ή μη μεταλλικά. Οι οπές που μπορούν να κατεργαστούν μπορεί να έχουν διάφορες μορφές. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την διάτρηση σε πλήρες υλικό έχει δύο κοπτικές ακμές ενώ για την εξέλιξη της διάτρησης απαιτείται το κοπτικό αυτό εργαλείο να κάνει ταυτόχρονα δύο κινήσεις. Η κύρια κίνηση κοπής είναι η περιστροφή του δραπάνου, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις όπως το boring, υπάρχει δυνατότητα αυτό που περιστρέφεται να είναι το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η ταχύτητα κοπής, που εξαρτάται από τον αριθμό στροφών του εργαλείου, εκφράζεται σε [m/min] και λαμβάνει την μεγαλύτερη τιμή της στην περιφέρεια του δραπάνου, ενώ μειώνεται προς το κέντρο του. Η δεύτερη κίνηση για την διάτρηση είναι η ευθεία μετακίνηση του τρυπανιού προς το κομμάτι. Η κίνηση αυτή καθορίζεται σαν πρόωση του εργαλείου και ελέγχει το πάχος του παραγόμενου αποβλίττου, και άρα τις αντίστοιχες αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα της πρόωσης τόσο μεγαλύτερο είναι και το πάχος του αποβλίττου και αντίστοιχα μεγαλύτερες οι δυνάμεις κοπής. Η ταχύτητα της πρόωσης εκφράζεται σε [mm/rev].

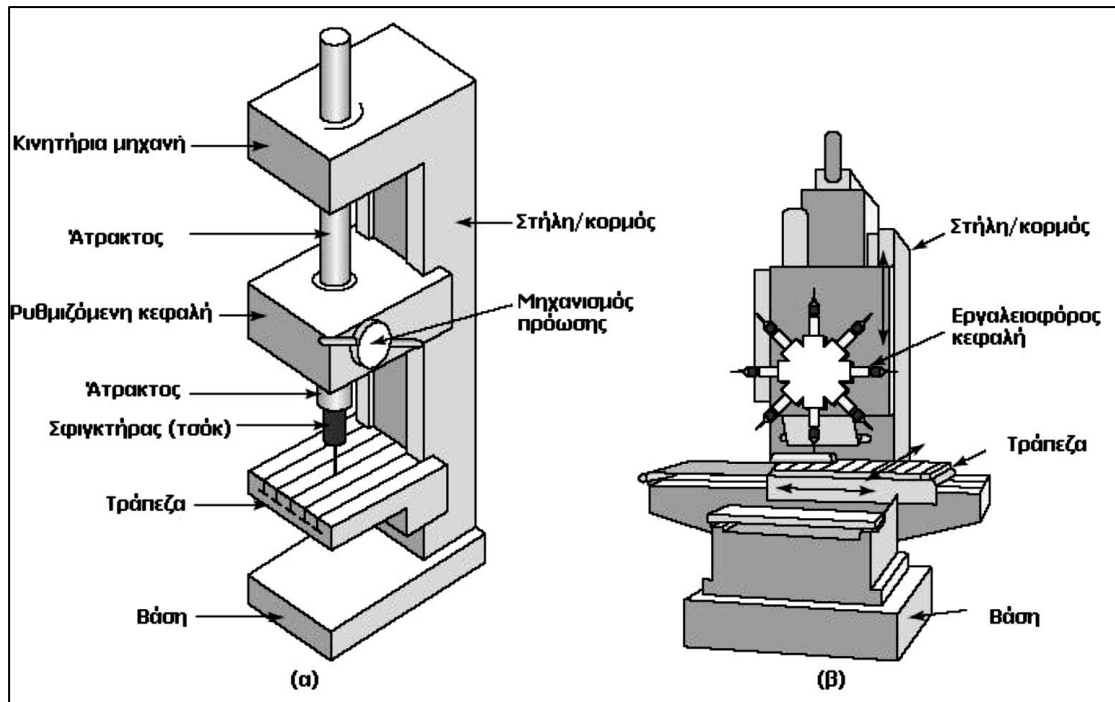


Εικόνα 1.6: Κινηματική της διάτρησης και είδη οπών [10]

Η εργαλειομηχανή που δίνει την δυνατότητα μετακίνησης και περιστροφής και χρησιμοποιείται για την διάτρηση είναι το **δράπανο**.

Πολλοί τύποι και μεγέθη εργαλειομηχανών διάτρησης χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό τομέα. Ταξινομούνται ανάλογα με το βάρος και το μέγεθος τους, από ένα απλού τύπου 'ευαίσθητο' δράπανο το οποίο τοποθετείται πάνω σε ένα πάγκο μέχρι τα μεγάλα πολυάτρακτα δράπανα που είναι ικανά να καθοδηγούν πολλά εργαλεία, ταυτόχρονα.

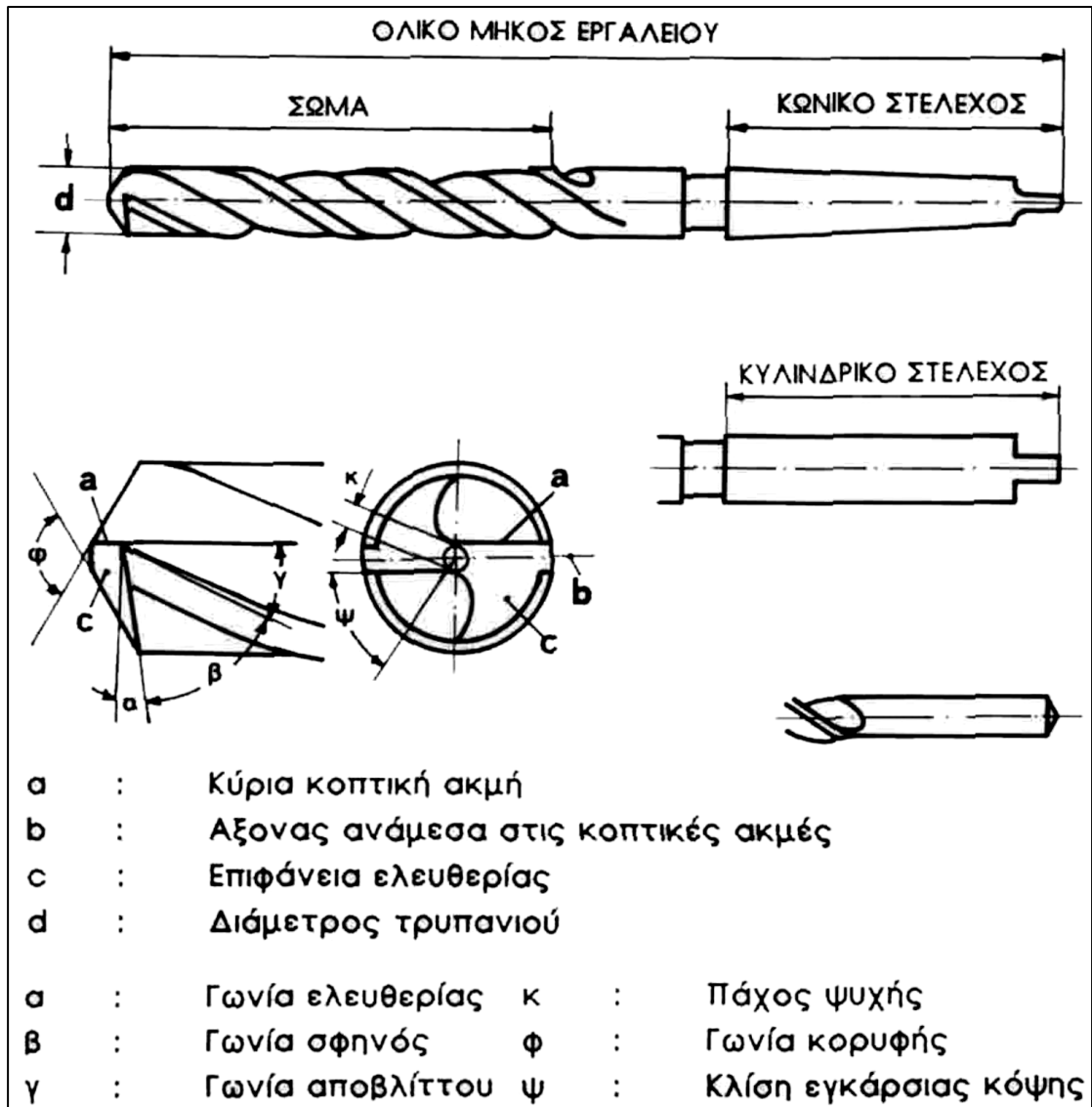
Στην Εικόνα 1.7 απεικονίζονται σχηματικά ένα τυπικό κάθετο δράπανο και ένα πυργωτό δράπανο.



Εικόνα 1.7: Σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού κάθετου δραπάνου, καθώς επίσης ένα πυργωτό δράπανο [10]

Στην Εικόνα 1.8 παρουσιάζεται η γεωμετρία ενός δραπάνου, το οποίο αναφέρεται και ως τρυπάνι. Το δράπανο χαρακτηρίζεται ως ελικοειδές λόγω των ελικοειδών αυλακιών που φέρει στο ωφέλιμο μήκος του. Τα ελικοειδή αυλάκια που φέρει το δράπανο εξυπηρετούν τους παρακάτω κυρίως σκοπούς :

- δημιουργούν τις απαραίτητες κοπτικές ακμές,
- οδηγούν τα απόβλητα από την θέση διάτρησης προς τα έξω,
- δίνουν την δυνατότητα στο υγρό κοπής να φτάνει στη θέση κοπής.



Εικόνα 1.8: Γεωμετρία ελικοειδούς δραπάνου [5]

Το στέλεχος στο τρυπάνι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.8, μπορεί να έχει μορφή κολουρου κώνου και σπάνια κυλινδρική. Τα τρυπάνια με κυλινδρικό στέλεχος συγκρατούνται με ειδικούς σφιγκτήρες που προσαρμόζονται στην άτρακτο του δραπάνου με το κωνικό τους στέλεχος που είναι τυποποιημένο και λέγεται κώνος Μόρς. Τα μεγάλα τρυπάνια επίσης, φέρουν στελέχη με τον τυποποιημένο αυτόν κώνο. Η τυποποίηση των κώνων Μορς είναι σε επτά μεγέθη που χαρακτηρίζονται με τους αριθμούς 0 έως 6.

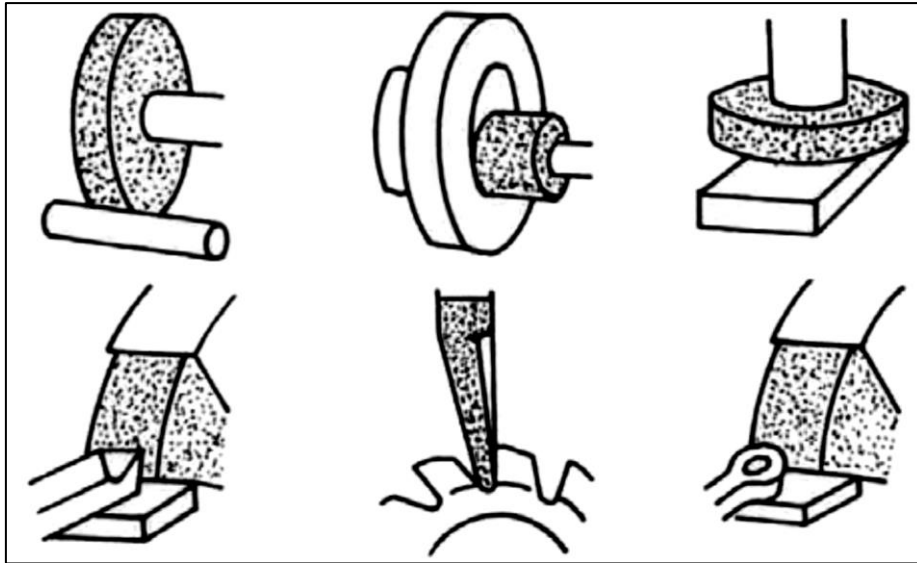
Το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται συνήθως τα τρυπάνια είναι ο ταχυχάλυβας ή σπάνια ο ανθρακούχος χάλυβας και τα σκληρομέταλλα. Για την επιλογή του κατάλληλου για κάθε εργασία εργαλείου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη αρκετοί παράγοντες που επηρεάζουν με

διαφορετικούς τρόπους αυτή την επιλογή. Έτσι το μέγεθος της οπής που θα κατεργαστεί καθορίζει την διάμετρο του τρυπανιού που θα χρησιμοποιηθεί. Η γωνία ελικώσεως και η γωνία σφήνας εξαρτώνται από το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Όσο πιο σκληρό είναι το κατεργαζόμενο υλικό τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η γωνία ελικώσεως, ενώ η γωνία σφήνας πρέπει να είναι μεγαλύτερη.

Η φθορά που αναπτύσσεται στα τρυπάνια επηρεάζει την κοπτική ικανότητά τους και μπορεί να γίνει αντιληπτή από το στρογγύλεμα που δημιουργείται στις εξωτερικές γωνίες των κύριων κοπτικών ακμών στην μύτη του εργαλείου. Αν το κοπτικό εργαλείο συνεχίσει να κόβει, ιδιαίτερα σε διάτρηση τυφλής οπής, θερμαίνεται σημαντικά λόγω της μεγαλύτερης τριβής με τελικό αποτέλεσμα την θραύση του. Για την αποφυγή του παραπάνω προβλήματος, το κοπτικό εργαλείο πρέπει να τροχίζεται την κατάλληλη στιγμή. Το τρόχισμα του τρυπανιού μπορεί να γίνεται με το χέρι αλλά για την αποφυγή λαθών, ιδιαίτερα στις κοπτικές γωνίες, προτιμάται να γίνεται με την βοήθεια ειδικής συσκευής, ενώ η χρήση ψυκτικού υγρού κατά το τρόχισμα είναι απαραίτητη για την αποφυγή της υπερθέρμανσης των κοπτικών ακμών. [5, 10, 16]

1.5.4 Λείανση

Το τρόχισμα των κοπτικών εργαλείων, όπως και η λείανση σκληρών ή όχι τεμαχίων, αποτελούν τις κύριες εφαρμογές της λείανσης. Η λείανση μπορεί να έχει σαν σκοπό την δημιουργία υψηλής ποιότητας επιφάνειας και υψηλής διαστατικής ακρίβειας, ενώ χρησιμοποιείται και για να δίδεται κατάλληλο σχήμα με υψηλή ακρίβεια μορφής. Στην Εικόνα 1.9 παρουσιάζονται διάφορες εφαρμογές της λείανσης.



Εικόνα 1.9: Εφαρμογές λείανση [9]

Η λείανση είναι μια κατεργασία αφαίρεσης υλικού στην οποία το κοπτικό εργαλείο είναι ένας περιστρεφόμενος λειαντικός τροχός. Ο τροχός αυτός ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζεται μπορεί να έχει διάφορα μεγέθη και σχήματα. [9, 16]

1.6 Μη συμβατικές κατεργασίες

Μια συμβατική κατεργασία μπορεί να ορισθεί ως μια διαδικασία που χρησιμοποιεί μηχανική ενέργεια (κίνηση). Μια μη συμβατική κατεργασία μπορεί να ορισθεί ως μια διαδικασία που χρησιμοποιεί και άλλες μορφές ενέργειας.

Οι μη συμβατικές (μη καθιερωμένες) κατεργασίες αφαίρεσης μετάλλου έχουν ως κοινό γνώρισμα με τις κατεργασίες κοπής το ότι και στις πρώτες, για να μορφοποιηθεί το τεμάχιο, αφαιρείται από αυτό το μέταλλο που πλεονάζει. Όμως, το αποβαλλόμενο μέταλλο δεν έχει τη μορφή αποβλίττου ούτε και σχηματίζεται με τον ίδιο μηχανισμό (υψηλού βαθμού πλαστική παραμόρφωση), αλλά παρουσιάζεται υπό μορφή ποικίλων τελικά σχημάτων, όπως σφαιριδίων, ακανόνιστων τεμαχιδίων κ.ά. Ακόμη, η προσδιόδμενη, για να λάβει χώρα μία μη συμβατική κατεργασία αφαίρεσης μετάλλου ενέργεια, δεν είναι εν γένει μηχανική, όπως συμβαίνει στις κατεργασίες κοπής, αλλά θερμική, χημική, ηλεκτροχημική ή κάποιας

άλλης μορφής. Υπάρχει επιπλέον και η δυνατότητα συνδυασμού μη συμβατικών κατεργασιών αφαιρέσεως μετάλλου με κατεργασίες κοπής. Πολλές τέτοιες κατεργασίες έχουν αναπτυχθεί εν γένει, πλην όμως ένας μικρός αριθμός από αυτές, όπως λ.χ. η αφαίρεση μετάλλου με ηλεκτρικό σπινθήρα (EDM), η ηλεκτροχημική λείανση (ECG) και η αφαίρεση μετάλλου με υπερήχους (USM) έχουν αναπτυχθεί σε υψηλό βαθμό εδώ και αρκετά χρόνια και έχουν τύχει ευρείας και επιτυχούς εφαρμογής στη μηχανουργική πράξη. Άλλες από τις κατεργασίες αυτές χρησιμοποιούνται ήδη, αλλά σε περιορισμένη έκταση και για πολύ ειδικές κατεργασίες, ενώ οι υπόλοιπες ευρίσκονται ακόμη σε στάδια θεωρητικής και πειραματικής μελέτης και εξελίξεως.

Οι μη συμβατικές κατεργασίες χωρίζονται σε τέσσερις ομάδες, ανάλογα με τη μορφή ενέργειας που χρησιμοποιούν:

1. Μηχανικές μέθοδοι. Μ' αυτές, η αφαίρεση υλικού γίνεται με εφαρμογή της δράσης εκτριβής λειαντικών ή υπερλειαντικών υλικών. Εφαρμόζονται σε περιπτώσεις υλικών όπως, σύνθετα, κεραμικά και οργανικά υλικά που είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και ευαίσθητα σε θερμικά φορτία.

2. Ηλεκτροχημικές μέθοδοι. Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε υλικά που είναι ηλεκτρικά αγώγιμα. Μπορούν να παραχθούν πολύπλοκες μορφές με ένα πάσο και στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει φθορά του χρησιμοποιούμενου εργαλείου.

3. Ηλεκτροθερμικές μέθοδοι. Στις θερμικές μεθόδους περιλαμβάνονται δύο από τις πιο διαδεδομένες μη συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) και η χρήση laser. Επειδή μ' αυτές τις μεθόδους γίνεται χρήση της θερμικής ενέργειας, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να απαιτηθεί η αφαίρεση από τα κομμάτια τυχόν θερμικά επηρεασμένων ζωνών ή τουλάχιστον η θερμική κατεργασία τους.

4. Χημικές μέθοδοι. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των μεθόδων αυτής της ομάδας είναι ο μεγάλος ρυθμός αφαίρεσης υλικού και ο υψηλός ρυθμός παραγωγής. Εφαρμόζονται ευρύτατα στη παραγωγή προϊόντων σε σειρά. Επειδή με τις μεθόδους αυτές η αφαίρεση υλικού γίνεται με χημική δράση, δεν εξασκούνται δυνάμεις πάνω στα κομμάτια και έτσι δεν υπάρχει κίνδυνος παραμόρφωσης τους ή πρόκλησης άλλης ζημιάς. Η χημική δράση και επομένως και η κατεργασία, συμβαίνει ταυτόχρονα σε όλες τις επιφάνειες του κομματιού και γι' αυτό το λόγο ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού

είναι υψηλός, τόσο ώστε να μπορεί να συγκριθεί με αυτόν των συμβατικών κατεργασιών κοπής υψηλού όγκου παραγωγής. [5, 8, 11]

Στον Πίνακα 1.1 αναφέρονται οι κύριες μη συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες.

Πίνακας 1.1 Μη συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες

Μη συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες

Κοπή με υπερήχους (ultrasonic machining)

Χημική κοπή- διάτρηση

Ηλεκτροχημική κοπή (ECM)

Ηλεκτροδιάβρωση

Κοπή με laser

Κοπή με δέσμη νερού

Κοπή με αποξεστική δέσμη

Κοπή με διαβρωτική δέσμη

Κονιομεταλλουργία

1.7 Μετάβαση από τις κοπές μακροκλίμακας στις μικροκοπές

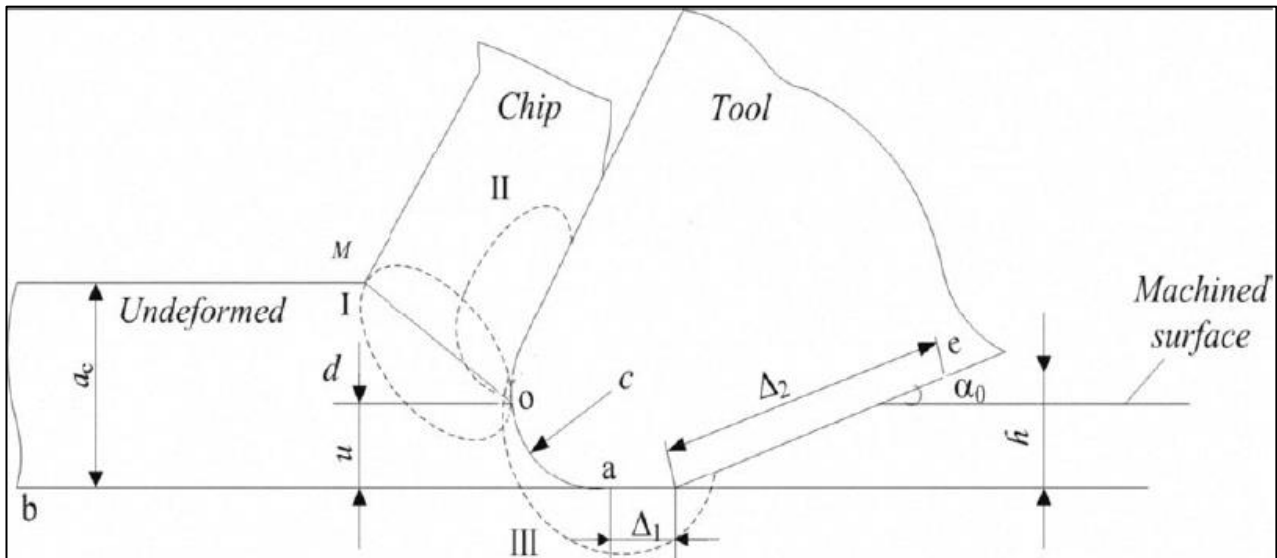
Η μετάβαση από τη μακροκοπή στην μικροκοπή είναι κρίσιμη, τόσο για την επίτευξη αποδοτικών και πρακτικών κατεργασιών μικροκλίμακας, όσο και για την κατανόηση των ορίων των εφαρμογών. Η μηχανική αποβολή υλικού με τη χρήση εργαλείων καρβιδίου μπορεί να επιτύχει την παραγωγή αμέτρητων επιθυμητών μορφών και μεγεθών. Η μικροκατεργασία αποτελεί πρόκληση, αλλά η γνώση από το μακρόκοσμο αποτελεί ένα σημαντικό κεφάλαιο για την έρευνα στις κατεργασίες μικροκλίμακας.

1.8 Αρχές μικροκοπής

Παρόμοια με την παραδοσιακή διαδικασία κοπής, η μικροκοπή έχει τέσσερα στάδια: έλαση, ολίσθηση, θραύση και αποκοπή. Παρ' όλα αυτά, το βάθος κοπής a_c είναι πολύ μικρό και συγκρίσιμο με την ακτίνα καμπυλότητας r_n

στην μικροκοπή, γι' αυτό, η παραμόρφωση της στρώσης κοπής είναι διαφορετική από αυτήν της παραδοσιακής κοπής.

Στο σημείο της κοπής, το μη κατεργασμένο υλικό ξεχωρίζει από το κύριο σώμα για να διαμορφώσει το απόβλιττο κατά μήκος της κατεύθυνσης oa και όχι κατά μήκος της κατεύθυνσης ab εξαιτίας της ύπαρξης της ακτίνας καμπυλότητας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.10. Το σημείο o είναι ένα οριακό σημείο. Πάνω από το σημείο o το μη κατεργασμένο υλικό ολισθαίνει κατά μήκος του επιπέδου διάτμησης OM και εν συνεχεία ρέει ως απόβλιττο κατά μήκος της ακτίνας καμπυλότητας και της επιφάνειας αποβλίττου, ενώ κάτω από το σημείο o ένα μέρος του μη κατεργασμένου υλικού εξωθείται δια μέσου της ακτίνας καμπυλότητας από την κατεργασμένη επιφάνεια έχοντας περάσει από την επιφάνεια ελευθερίας, και ένα άλλο μέρος του ρέει πλαγίως, γύρω από το κοπτικό εργαλείο. [37]



Εικόνα 1.10: Διαμόρφωση κατεργαζόμενης επιφάνειας κατά τη μικροκοπή [37]

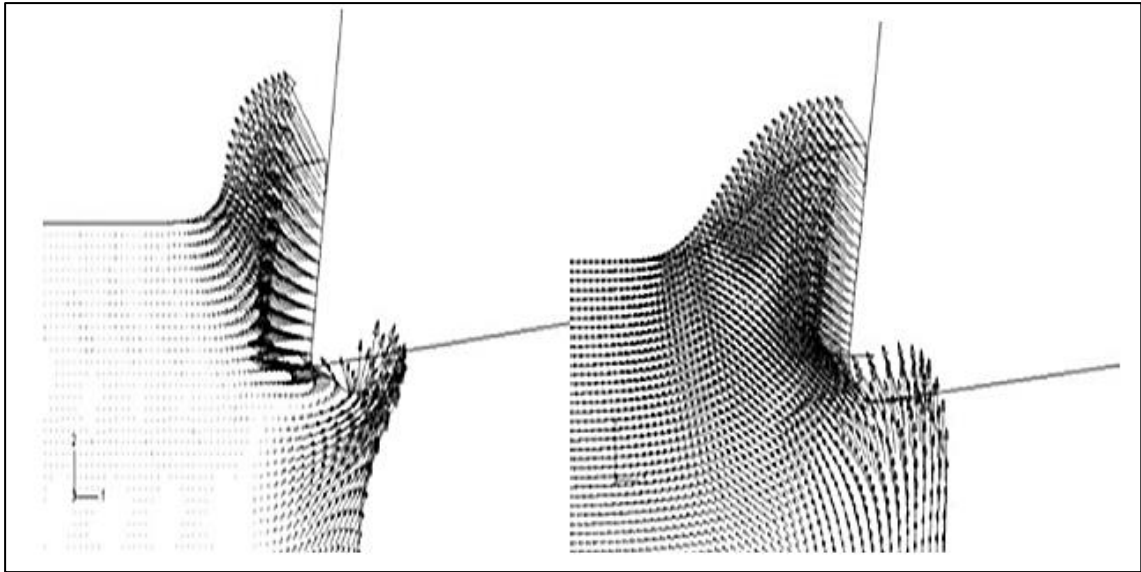
Η ελεύθερη επιφάνεια θα φθαρεί στο Δ_1 καθώς γίνεται η κατεργασία για ένα χρονικό διάστημα. Το μη κατεργασμένο υλικό εξωθείται μέσω της κοπτικής ακμής, έρχεται σε επαφή με το Δ_1 και έπειτα υφίσταται ελαστική επαναφορά. Εάν το ύψος της επαναφοράς είναι h , το μήκος της κατεργαζόμενης επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με την ελεύθερη επιφάνεια είναι Δ_2 , τότε το συνολικό μήκος της ελεύθερης επιφάνειας κάτω από το σημείο o είναι το άθροισμα του τμήματος της ακτίνας καμπυλότητας, Δ_1 και Δ_2 . Οι I, II, III είναι οι ζώνες παραμόρφωσης στη μικροκοπή.

1.9 Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας και του λόγου α/r

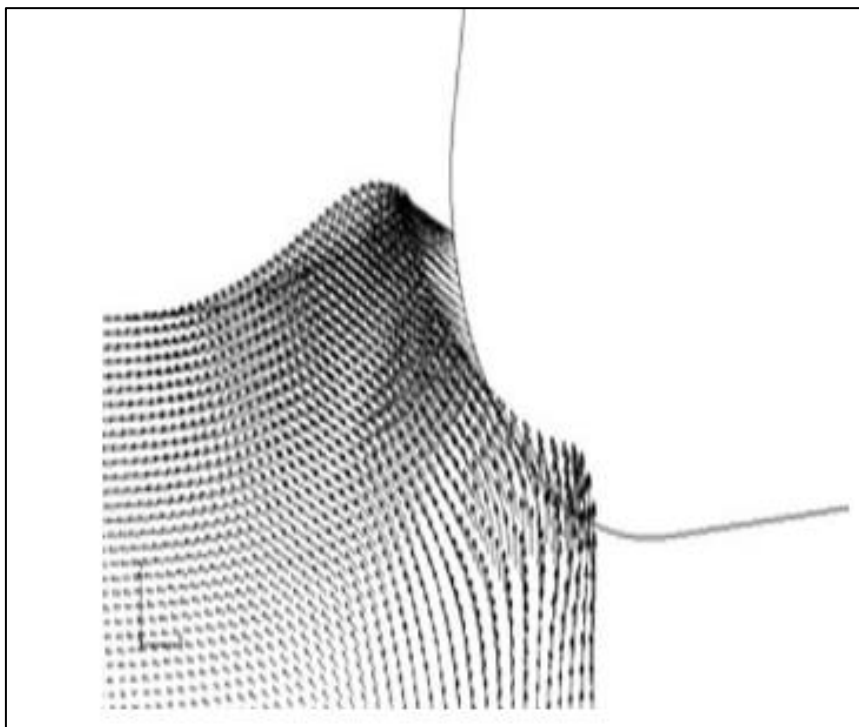
Η ακτίνα καμπυλότητας του εργαλείου είναι μια σημαντική παράμετρος για την ποιότητα της επιφάνειας στις μικροκατεργασίες. Υπό ορισμένες πρακτικές, η κοπτική αιχμή του εργαλείου ενισχύεται ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Για εργαλεία από καρβίδιο του βολφραμίου, η ακτίνα καμπυλότητας εξαρτάται από το μέγεθος των τμημάτων και την τεχνική της πυροσυσσωμάτωσης και συνεπώς η παραγωγή εργαλείων χωρίς καμπυλότητα είναι πρακτικά αδύνατη λόγω των τεχνολογικών περιορισμών. Ωστόσο, η γεωμετρία του εργαλείου συνήθως παραμελείται στη μοντελοποίηση της διαδικασίας συμβατικών κατεργασιών καθώς λαμβάνεται υπόψη το μοντέλο των Ernst και Merchant για κοπτική αιχμή χωρίς καμπυλότητα. Τέτοια υπόθεση κρίσιμης σημασίας είναι αποδεκτή στη μοντελοποίηση των συμβατικών κατεργασιών καθώς το μη διαμορφωμένο απόβλιττο πάχους α είναι πολύ μεγαλύτερο από την ακτίνα καμπυλότητας r , τουλάχιστον κατά τρεις τάξεις μεγέθους. Όμως, δεν είναι σωστή αυτή η υπόθεση στις μικροκατεργασίες όταν το α πλησιάζει το r . Από αυτή την άποψη, πιστεύεται ότι οι διαφορές μεταξύ συμβατικών κατεργασιών και μικροκατεργασιών προέρχονται από τις μεγάλες διαφορές μεγέθους μεταξύ α και r .

Στο παρελθόν, εκτεταμένες είναι οι έρευνες που έχουν γίνει αναφορικά με την επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας. Στις μικροκατεργασίες του χάλυβα, η συσχέτιση της επίδρασης της ακτίνας καμπυλότητας στο σχηματισμό του αποβλίττου και το μηχανισμό παραμόρφωσης του υλικού απαιτεί περαιτέρω έρευνα. [15, 38]

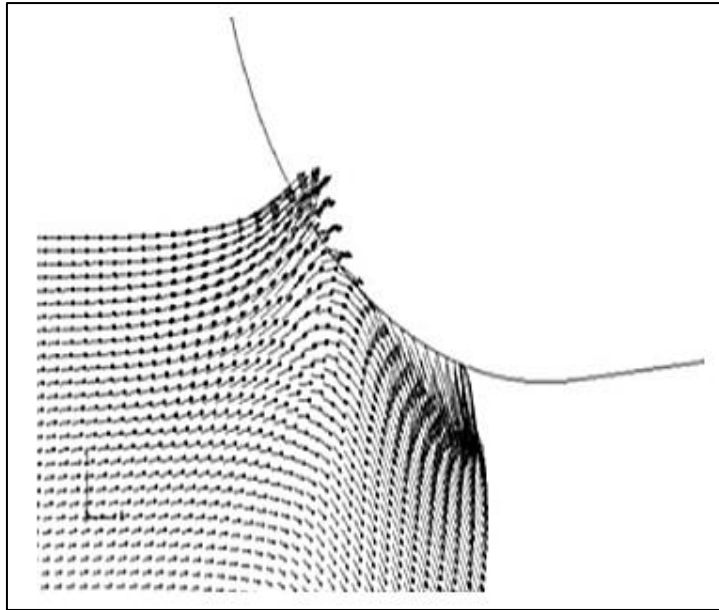
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΑΚΡΟΚΟΣΜΟ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΟΣΜΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ
ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΤΟΥΣ



Εικόνα 1.11: Πολύ μεγάλες τιμές για α/r με μικρές τιμές για r - Αρχικό στάδιο κοπής [15]



Εικόνα 1.12: Μικρές τιμές για α/r με μεγαλύτερες τιμές για r - Αρχικό στάδιο κοπής [15]



Εικόνα 1.13: Κρίσιμη τιμή για α/r - Αρχικό στάδιο κοπής [15]

Στις Εικόνες 1.11-1.13 απεικονίζεται ο σχηματισμός αποβλίττου και η τάση της κίνησης του υλικού κατά την παραμόρφωση του, κατά το αρχικό στάδιο, για διαφορετικά α/r . Το βέλος δείχνει την κατεύθυνση του διανύσματος της μετατόπισης ενώ το μέγεθός του αντιπροσωπεύει το σχετικό μέγεθος της μετατόπισης. Για α/r με μεγάλες τιμές, το απόβλιττο σχηματίζεται αρχικά από την πλευρά του κοπτικού εργαλείου που βλέπει το υλικό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.13. Το υλικό ρέει κάτω από την ελεύθερη πλευρά του κοπτικού, γύρω από την ακτίνα καμπυλότητας.

Μικρά κλάσματα του υλικού διαφεύγουν σαν απόβλιττα, ενώ το υπόλοιπο εισρέει στον κύριο όγκο του υλικού, οδηγώντας στο σχηματισμό της κατεργασμένης επιφάνειας. Τα διανύσματα της μετατόπισης έχουν κατεύθυνση προς πάνω αριστερά και γίνονται παράλληλα στον άξονα x όπως φαίνεται από τα κυρτά βέλη. Όταν το α/r μειώνεται, η αρχική κατεργασία πραγματοποιείται από την κοπτική ακμή. Για μικρά α/r η συμπεριφορά του υλικού που διαμορφώνεται είναι παρόμοια με αυτή για μεγάλες τιμές α/r , όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.12, αλλά η ροή του υλικού γύρω από την ακμή του εργαλείου γίνεται πιο σταδιακά. Στο κρίσιμο α/r το υλικό μπροστά από την άκρη του εργαλείου βρίσκεται να ρέει στη θετική κατεύθυνση του x άξονα, αντίθετα με την κίνηση του εργαλείου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.13. Μικρές ποσότητες του υλικού φαίνεται να μετατοπίζονται προς τα πάνω κατά μήκος της ακτίνας καμπυλότητας, ενώ το υπόλοιπο μέρος του υλικού φαίνεται να κινείται γύρω από το

στρογγυλεμένο τμήμα της κοπτικής ακμής και κατόπιν να κινείται πίσω προς το υλικό και εν συνεχεία να συμπιέζεται κάτω από την κοπτική ακμή. [15, 38]

1.10 Επίδραση κλίμακας

Η μικροκοπή χαρακτηρίζεται από πολύ μικρές ποσότητες υλικού που αφαιρούνται από την επιφάνεια, όπου το πάχος του αποβλίττου κυμαίνεται από μερικά μικρόμετρα μέχρι μερικές εκατοντάδες μικρόμετρα. Σε αυτά τα μεγέθη αφαίρεσης υλικού, αναμένεται να κάνει την εμφάνισή του το φαινόμενο της κλίμακας, γνωστό στη βιβλιογραφία και ως "size effect". Στις κατεργασίες, η επίδραση κλίμακας τυπικά χαρακτηρίζεται από μια μη γραμμική αύξηση της ειδικής ενέργειας ή ειδικής δύναμης όσο το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου μειώνεται.

Σε ερευνητικό επίπεδο ουκ ολίγες είναι οι πειραματικές παρατηρήσεις πάνω στην επίδραση κλίμακας που έχουν γίνει σε διαφορετικά υλικά και κάτω από διαφορετικές συνθήκες κοπής.

Οι προσπάθειες που έχουν γίνει για να εξηγήσουν και να προβλέψουν την επίδραση κλίμακας είναι αρκετές. Οι περισσότερες εξηγήσεις που έχουν δοθεί μέχρι σήμερα μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής: 1) η ενίσχυση του υλικού που οφείλεται σε παράγοντες που ποικίλουν ανάλογα με το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου, 2) η παραμόρφωση του υλικού κάτω από την κατεργαζόμενη επιφάνεια, 3) η επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας, 4) η ενέργεια που απαιτείται για να δημιουργηθούν νέες επιφάνειες διαμέσου όλκιμης θραύσης. [39]

Οι Show και Backer [40] απέδωσαν την επίδραση κλίμακας σε κρυσταλλογραφικές ατέλειες όπως τα όρια των κόκκων, προσμίξεις ατόμων κ.τ.λ. Υποστήριξαν ότι δεδομένης μιας σημαντικής μείωσης του αριθμού των ατελειών που αντιμετωπίζουν κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης που γινόταν σε μικρό όγκο, η δύναμη που ασκούνταν στο υλικό αναμένεται να αυξηθεί και να πλησιάσει τη θεωρητική δύναμη.

Οι Larsen-Basse και Oxley [41] απέδωσαν την επίδραση κλίμακας στην ευαισθησία του ρυθμού παραμόρφωσης του κατεργαζόμενου υλικού. Η επιχειρηματολογία τους βασίζεται σε εμπειρικά δεδομένα από πειράματα σε απλό ανθρακούχο χάλυβα, τα οποία δείχνουν ότι ο μέγιστος ρυθμός

παραμόρφωσης στην κύρια ζώνη διάτμησης είναι αντιστρόφως ανάλογος με το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου. Ως εκ τούτου, με αύξηση του πάχους του απαραμόρφωτου αποβλίττου, η παραμόρφωση στη ζώνη διάτμησης θα παραμένει αμετάβλητη, αλλά ο ρυθμός παραμόρφωσης θα αυξηθεί αντιστρόφως ανάλογα σε σχέση με το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου. Για τα περισσότερα μέταλλα, αύξηση στο ρυθμό παραμόρφωσης προκαλεί αύξηση της τάσης με την ευαισθησία του ρυθμού παραμόρφωσης της τάσης να αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς στην περιοχή όπου εκτελείται η κατεργασία. Κατά συνέπεια, αυτό θα μπορούσε να εξηγήσει την αύξηση της ειδικής ενέργειας/δύναμης κοπής με τη μείωση του πάχους του απαραμόρφωτου αποβλίττου.

Οι Korpalinsky και Oxley [42], λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της θερμοκρασίας απέδωσαν την επίδραση κλίμακας (size effect) σε μείωση της γωνίας διάτμησης εξαιτίας της μείωσης της θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια εργαλείου-αποβλίττου. Υποστήριξαν ότι αυτό οδηγεί σε αύξηση της αντοχής του τεμαχίου. Επιπλέον, αναγνώρισαν ότι η επίδραση της θερμοκρασίας δεν εξηγεί την επίδραση κλίμακας, μελετώντας πάχη απαραμόρφωτου αποβλίττου κάτω από 50 μm , το οποίο είναι πιθανό λόγω της αύξησης της ευαισθησίας της τάσης διαρροής στο ρυθμό παραμόρφωσης σε αυτό το εύρος.

Οι Nakayama και Tamura [43] ανέλυσαν την επίδραση κλίμακας μέσω πειραμάτων μικροκοπής που εκτελέστηκαν σε πολύ χαμηλή ταχύτητα κοπής (0,1 m/min) ώστε να ελαχιστοποιηθεί η θερμοκρασία και οι επιδράσεις του ρυθμού παραμόρφωσης. Παρατήρησαν λοιπόν πλαστική διαρροή στο στρώμα κάτω από την επιφάνεια του τεμαχίου και ανέφεραν ότι η συμβολή της επίδρασης κλίμακας γίνεται σημαντική με μείωση του πάχους του απαραμόρφωτου αποβλίττου. Η κύρια αιτία αυτής της πλαστικής διαρροής πιστεύεται ότι είναι η επέκταση της ζώνης διάτμησης κάτω από την κατεργαζόμενη επιφάνεια. Ως εκ τούτου, απέδωσαν την επίδραση κλίμακας στο γεγονός ότι η ενέργεια που καταναλώνεται στην πλαστική διαρροή στο στρώμα κάτω από την επιφάνεια δεν είναι ανάλογη με το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου και στη μείωση της γωνίας διάτμησης με τη μείωση του πάχους του απαραμόρφωτου αποβλίττου.

Ο Kim [44] ανέλυσε την επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας στη διαδικασία κοπής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο ήταν βασισμένο στο μοντέλο του Euler με πεπερασμένη ακτίνα καμπυλότητας και άκαμπτο ρευστοπλαστικό υλικό τεμαχίου. Οι κοπτικές

δυνάμεις που ελήφθησαν από το πρόγραμμα προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία βρέθηκαν να έχουν καλό συσχετισμό με τις πειραματικές μετρήσεις. Κατέληξε λοιπόν ότι η κύρια αιτία της επίδρασης κλίμακας είναι η ακτίνα καμπυλότητας.

Ο Lucca [45] μελέτησε το ρόλο της πραγματικής αρνητικής γωνίας αποβλίττου που προκαλείται από την ακτίνα καμπυλότητας, όταν η τελευταία γίνεται συγκρίσιμη με το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου. Όσο το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου μειώνεται, παρατηρείται περιστροφή του διανύσματος της συνολικής δύναμης κάτω από το τεμάχιο. Η δύναμη άπωσης γίνεται η κύρια συνιστώσα κάτω από ένα ορισμένο πάχος απαραμόρφωτου αποβλίττου. Ανέφερε ότι η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως μετάβαση από κύρια διαδικασία κοπής σε άρωση-ολίσθηση, όταν το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου μειώνεται.

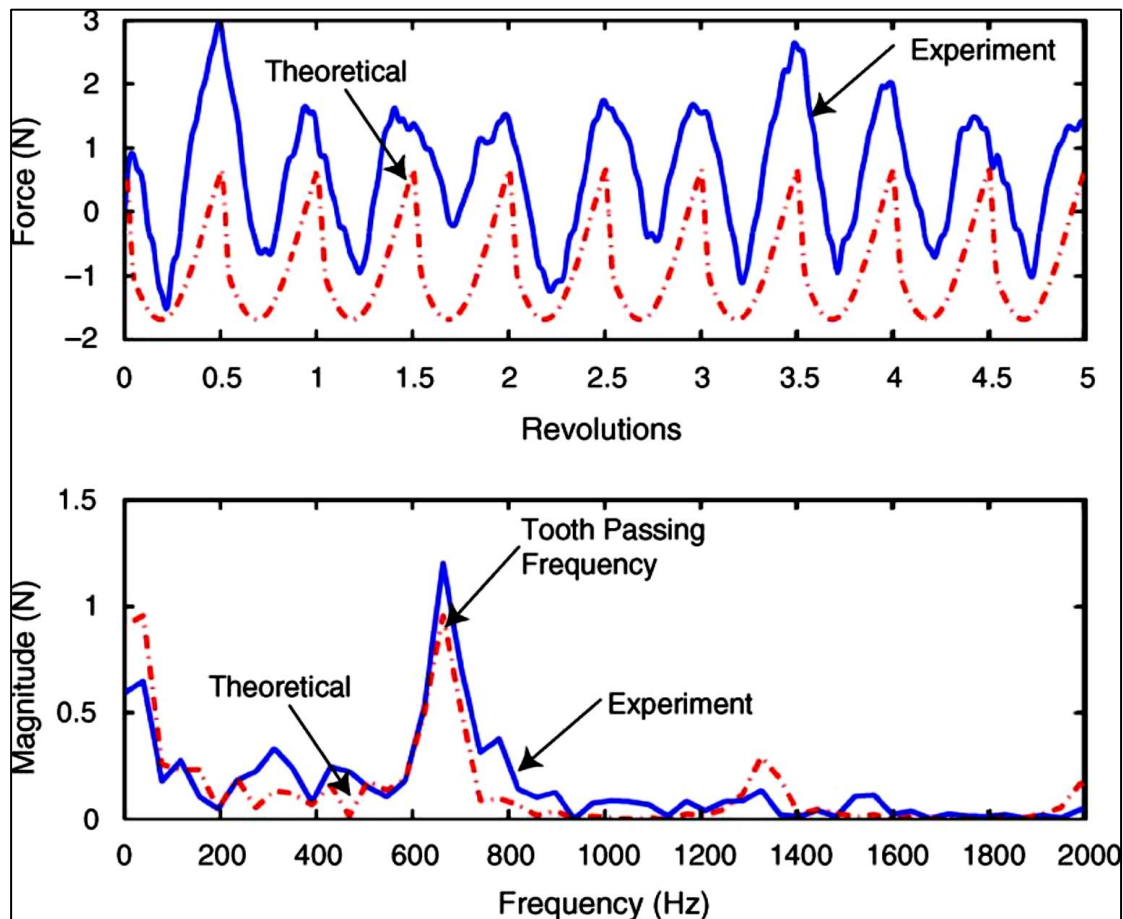
Παρομοίως, οι Armarego και Brown [46] ανέφεραν ότι η αύξηση της ειδικής κοπτικής δύναμης με μείωση του πάχους του απαραμόρφωτου αποβλίττου ήταν λόγω της μεγαλύτερης σχετικής συμβολής της δύναμης άρωσης που προκύπτει από την τριβή και την άρωση, που συνδέονται με την αφαίρεση υλικού από ένα αμβλύ εργαλείο.

Πρόσφατη έρευνα από τον Atkins, [47] αποδίδει την επίδραση κλίμακας στην κοπή, στην ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία νέας επιφάνειας μέσω όλκιμης θραύσης. Ο συγγραφέας βρήκε μέσω προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία ότι το έργο είναι κοντά στην τυπική τιμή αντοχής σε θραύση για το υλικό σε μηχανισμούς όλκιμης θραύσης. Υπέδειξε ότι η ενέργεια που απαιτείται για τη διαμόρφωση της νέας επιφάνειας δε μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα στην ανάλυση κοπής μετάλλων. Αυτή η ενέργεια είναι ανεξάρτητη του βάθους κοπής και κατά συνέπεια η συμβολή της στη συνολική ειδική ενέργεια θα πρέπει να αυξηθεί όσο μικραίνουν οι τιμές του πάχους του απαραμόρφωτου αποβλίττου.

Τελευταίες έρευνες εστιάζουν στη συσχέτιση του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης με την επίδραση κλίμακας. Είναι σαφές, από τη βιβλιογραφία, ότι η επίδραση κλίμακας στη μικροκοπή μπορεί να προκύψει λόγω πολλαπλών μηχανισμών. Είναι επίσης προφανές ότι η επίδραση κλίμακας μπορεί να προκύψει ακόμα και κατά την κοπή με αιχμηρά εργαλεία ή και όταν οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας και του ρυθμού παραμόρφωσης αμελούνται (π.χ. για πολύ μικρές ταχύτητες κοπής). [39]

1.11 Δυνάμεις κοπής

Όπως και στις θεωρίες μακροκοπής, οι δυνάμεις στη μικροκοπή αποτελούνται κυρίως από τις συνιστώσες διάτμησης και άρωσης. [81]. Όμως, οι δυνάμεις στη μικροκοπή είναι αρκετά διαφορετικές από τις δυνάμεις στη μακροκοπή, ιδίως η στατική συνιστώσα της δύναμης. Σε ένα πρωταρχικό πείραμα κατεργασίας αλάκωσης αλουμινίου 7075 T-6, οι δυνάμεις της μικροκοπής συγκρίνονται με τα αναμενόμενα αποτελέσματα με χρήση του συμβατικού μοντέλου δύναμης κοπής αιχμηρής ακμής [81], με την προϋπόθεση ότι το υλικό κατεργασίας είναι ομοιόμορφο.



Εικόνα 1.14: Δυνάμεις μικροκοπής στην κατεύθυνση πρόωσης [16]

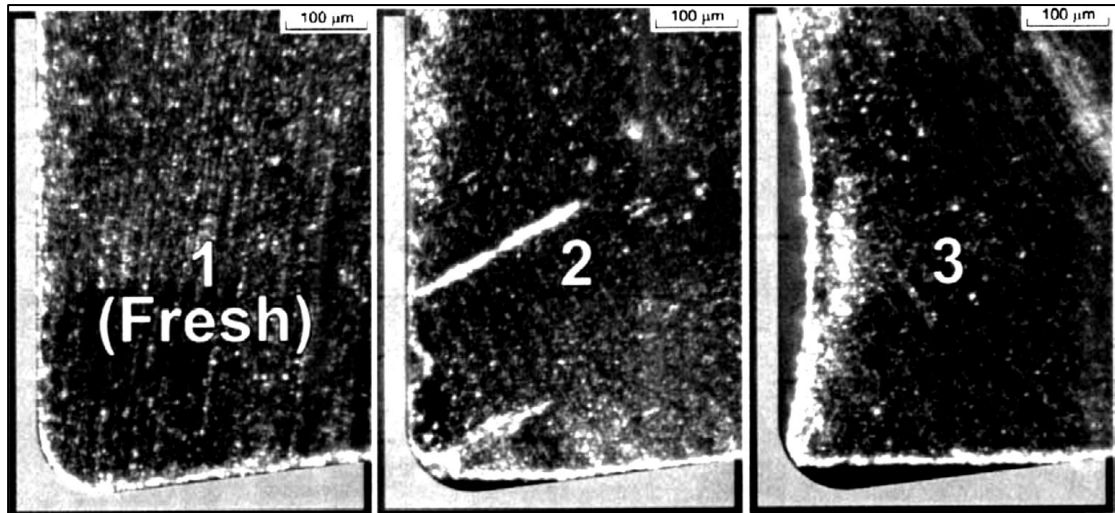
Η δυναμική συνιστώσα, η οποία οφείλεται κυρίως σε διατμητικές δυνάμεις, είναι παρόμοια με τις συμβατικές προσομοιώσεις δυνάμεων κοπής, όταν το

βάθος κοπής είναι μεγαλύτερο από το ελάχιστο βάθος κοπής. Όμως, η στατική συνιστώσα αντιστάθμισης μεταξύ του πειράματος και των προβλέψεων δείχνει καθαρά ότι οι δυνάμεις άρωσης στις μικροκατεργασίες δε μπορούν να εκφραστούν πλήρως από το μοντέλο μακροκοπής.

Το μικρό βάθος κοπής στις μικροκατεργασίες υποδεικνύεται από την απαίτηση διατήρησης των δυνάμεων κοπής κάτω από το όριο πλαστικής παραμόρφωσης του μικροεργαλείου. Κατά συνέπεια, η μείωση των δυνάμεων κοπής στις μικροκατεργασίες βελτιώνει σημαντικά το ρυθμό αποβολής υλικού. Όμως, η αύξηση των δυνάμεων κοπής αποτελεί προϋπόθεση για τη δημιουργία ενός ελάχιστου πάχους, το οποίο είναι απαραίτητο για τη δημιουργία αποβλίττου.

Η τριβή μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου δεν έχει διερευνηθεί διεξοδικά στις μικροκατεργασίες. Στις μακροκατεργασίες έχει εξεταστεί η επίδραση της φθοράς των άκρων του εργαλείου παρακολουθώντας τις δυνάμεις άρωσης. [82, 83]. Στην κατεργασία της μακροκοπής, η αυξημένη φθορά των άκρων προκαλείται από την υψηλή τριβή και την επακόλουθη θερμική φόρτιση μεταξύ του άκρου του εργαλείου και του υλικού του τεμαχίου. Αυτό οδηγεί σε παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις και δημιουργεί ένα «λευκό στρώμα» με εξαιρετικά λεπτομερή μικροδομή [84]. Με αύξηση του πάχους αποβλίττου στη μικροκατεργασία, οι δυνάμεις άρωσης μειώνονται, καθώς σχηματίζεται το απόβλιττο [85]. Επίσης, η ελαστική παραμόρφωση του τεμαχίου κατεργασίας επηρεάζει τις μεταβολές στις δυνάμεις άρωσης.

Οι Kountanya et al. [83] μελέτησαν τη φθορά άκρων των εργαλείων μακροκοπής με στρογγυλεμένα άκρα σε συνθήκες ορθογωνικής κοπής. Αναφέρουν ότι η δύναμη κοπής μειώνεται όταν το πάχος του αποβλίττου είναι μικρότερο από την ακτίνα άκρου του εργαλείου μέχρι η ακτίνα άκρου να φθαρεί πλήρως.



Εικόνα 1.15: Φθορά άκρων εργαλείων μακροκοπής με στρογγυλεμένη ακμή [88]

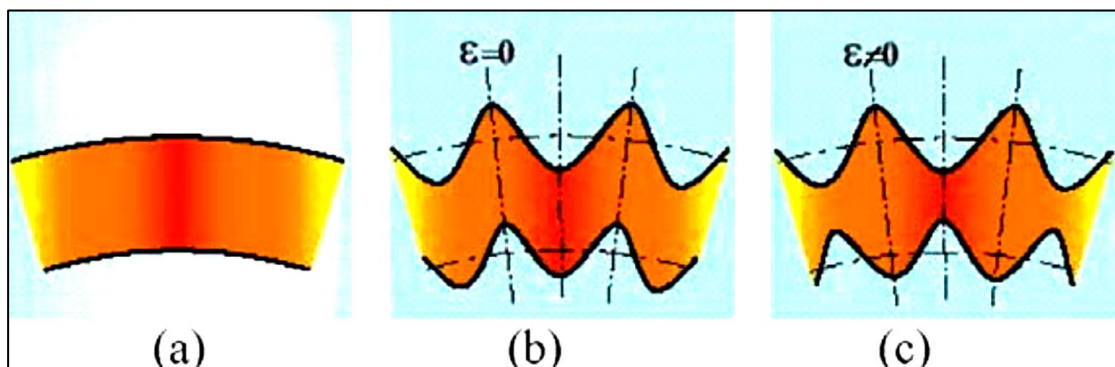
Εξάλλου , σε μια παραδοσιακή διαδικασία μακρο-κοπής, η παραμόρφωση συμβαίνει κυρίως όταν η άκοπη στρώση μετατρέπεται σε απόβλιττο. Η παραμόρφωση κάτω από την κατεργαζόμενη επιφάνεια είναι μικρή. Παρ' όλα αυτά, στη μικροκοπή, η παραμόρφωση κάτω από την κατεργαζόμενη επιφάνεια είναι πολύ σημαντική διότι το απόβλιττο είναι πολύ λεπτό και η παραμόρφωση που προκαλείται από την έλαση και την τριβή μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και της κατεργαζόμενης επιφάνειας παίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική παραμόρφωση.

1.12 Εκτίμηση πρόωσης

Η πρόωση επηρεάζει άμεσα τις δυνάμεις κοπής, καθώς οι υπερβολικές δυνάμεις οδηγούν σε μεγάλη παραμόρφωση του εργαλείου, επιτάχυνση της φθοράς του εργαλείου και θραύση του εργαλείου. Κατά συνέπεια, η κατάλληλη επιλογή της πρόωσης είναι σημαντική για τη επίτευξη των επιθυμητών ορίων ανοχών. Τα μικροεργαλεία δεν παραμορφώνονται πλαστικά, πράγμα το οποίο οδηγεί σε αστοχία λόγω ψαθυρότητας. [16]

1.13 Αστάθεια (Κραδασμοί)

Οι χαοτικές δυναμικές κατεργασίες κοπής, όπως οι κραδασμοί, θέτουν ένα σημαντικό πρόβλημα στις μικροκατεργασίες, λόγω του ότι οδηγούν σε υπερβολικές δονήσεις, οι οποίες οδηγούν σε καταστροφική αστοχία. Ο κραδασμός είναι μια ασταθής, αυτοδιεγερόμενη δόνηση, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης μεταξύ των δυναμικών του εργαλείου κατεργασίας και του τεμαχίου [86, 87]. Η εμφάνιση κραδασμών εξαρτάται από τρεις παράγοντες: τις συνθήκες κοπής, τις ιδιότητες του υλικού του τεμαχίου και τη δυναμική του συστήματος περιστροφής του εργαλείου κατεργασίας. Σύμφωνα με τη συμβατική θεωρία σταθερότητας σε κραδασμούς, η πρόωση δεν επηρεάζει σημαντικά τη σταθερότητα. Όμως, στις μικροκατεργασίες, όσον αφορά τη σταθερότητα έναντι κραδασμών πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ελαστικότητα του τεμαχίου λόγω της μικρής πρόωσης, καθώς και τα συμβατικά μακροαναγεννητικά κύματα που οδηγούν σε δυναμική μεταβολή του πάχους του αποβλίττου.



Εικόνα 1.16: Παραγωγή αποβλίττου (a) χωρίς δόνηση, (b) εξαναγκασμένη δόνηση (c) αναγεννητικός κραδασμός [81]

Οι μηχανές υψηλών ταχυτήτων παρουσιάζουν νέες προκλήσεις για τις μικροκατεργασίες. Επίσης, στη μικροκλίμακα, οι ιδιότητες του υλικού δεν μπορούν να θεωρηθούν ομογενείς. Κατά συνέπεια, οι συντελεστές κοπής που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα ελέγχου κραδασμών διαφέρουν σε σύγκριση με τις μακροσκοπικές κατεργασίες λόγω της ανισοτροπίας των υλικών. Η αστάθεια στη μικροκλίμακα αποτελεί μια πρόκληση, λόγω των διάφορων μη γραμμικών φαινομένων και των χρονικά μεταβαλλόμενων δυναμικών φαινομένων. Συγκεκριμένα,, οι προώσεις στη μικροδιάτρηση

επιηρεάζουν σημαντικά τη σταθερότητα λόγω ελαστικής παραμόρφωσης [88].

1.14 Έλλειψη ζυγοστάθμισης

Η έλλειψη ζυγοστάθμισης είναι συνήθως ασήμαντο πρόβλημα στις μακροκατεργασίες. Όμως, το πρόβλημα ενισχύεται σημαντικά όταν η διάμετρος του εργαλείου μειώνεται και η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται σημαντικά. Η εκκεντρότητα του εργαλείου προκαλείται από την μη ευθυγράμμιση του άξονα συμμετρίας μεταξύ του εργαλείου και του συγκρατητή του εργαλείου. Στις μακροκατεργασίες συνήθως αγνοείται, καθώς η διάμετρος του εργαλείου κοπής είναι σχετικά μεγάλη σε σύγκριση με την εκκεντρότητα του εργαλείου και η ταχύτητα είναι σχετικά αργή σε σύγκριση με τις μικροκατεργασίες.

Η μη ζυγοσταθμισμένη συνιστώσα του περιστρεφόμενου εργαλείου κοπής προκαλεί σημαντικό θόρυβο στις μετρήσεις δυνάμεων, ειδικά σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Ο θόρυβος προκαλείται από την εκκεντρότητα του περιστρεφόμενου εργαλείου κοπής, το οποίο εξασκεί φυγόκεντρες δυνάμεις.

Οι δυνάμεις έλλειψης ζυγοστάθμισης προκαλούν σημαντικές δονήσεις σε υψηλές ταχύτητες μικροκατεργασίας. Η έλλειψη ζυγοστάθμισης μπορεί να προκύψει και λόγω της απόκλισης του εργαλείου λόγω των δυνάμεων κοπής. Όμως, δεν υπάρχει έρευνα στην περιοχή αυτή, όσον αφορά τις μικροκοπές. Υπάρχουν δυσκολίες σχετικά με τη μέτρηση των δυνάμεων στις μικροκοπές, λόγω του ότι παραμορφώνονται σημαντικά από την έλλειψη ζυγοστάθμισης. Η απόκλιση του εργαλείου λόγω της κοπής επιηρεάζει την ακρίβεια. [16, 84]

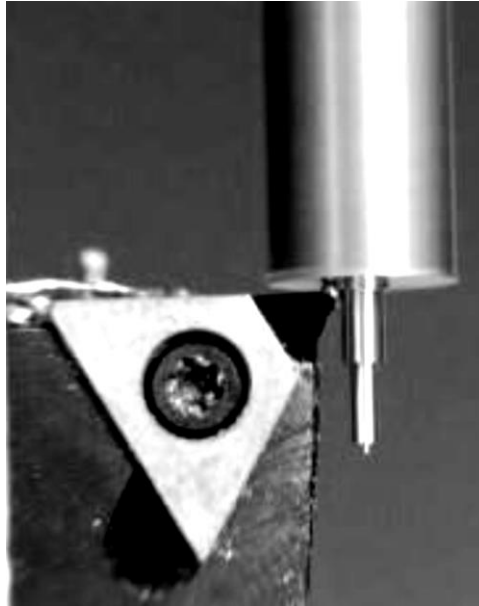
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μικροκατεργασίες

2.1 Μικρο-τόρνευση

Οι πρόσφατες εξελίξεις στη μικρο και νανοτεχνολογία έχουν δημιουργήσει μεγαλύτερη ζήτηση για βιομηχανικά προϊόντα με μικρές διαστάσεις, τα οποία θα ικανοποιούν μια πληθώρα λειτουργιών και δυνατοτήτων. Οι μικροκατεργασίες είναι οι πιο βασικές τεχνολογίες για την παραγωγή μικρογραφιών τέτοιων αντικειμένων ή εξαρτημάτων. Η επιταχύνουσα τάση για μικρογραφίες αντικειμένων αυξάνεται μέρα με τη μέρα και οι τεχνολογίες μικροκατεργασιών γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων κατασκευής και τις δυνατότητες των συμβατικών κατεργασιών. Ο M.A Rahman et. al. [49] επεσήμαναν ότι η κατασκευή μινιατούρων έχει πλεονεκτήματα μιας και μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και το απαιτούμενο υλικό προς κατεργασία. Ο J. Mc Geough [50] αναφέρει ότι η «μικροκατεργασία» χρησιμοποιείται γενικά για την παραγωγή τμημάτων με διαστάσεις μεταξύ 1 και 999 μm . Το νέο άνω όριο που έχει τεθεί μεταξύ των μικρο και μακροκατεργασιών είναι τα 500 μm . Σύμφωνα με τον Alberto Herrero et. al. [51] τα αποδεκτά όρια των μικροτεχνολογιών είναι μεταξύ των 0.5 και 499 μm .

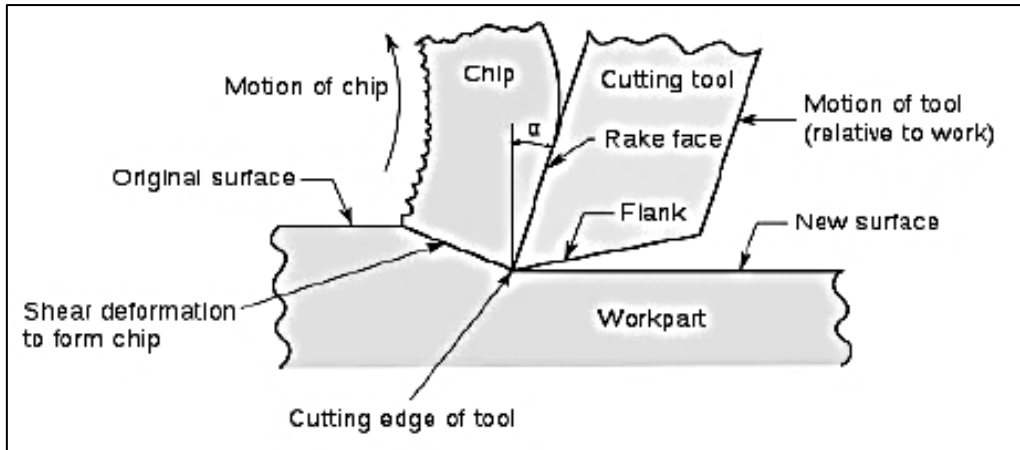
Οι Masuzawa, T. και H.K. Tonshoff [4] χωρίζουν τις μικροκατεργασίες σε δυο κύριες ομάδες: μικροκατεργασίες με χρήση μάσκας και μικροκατεργασίες με βάση το εργαλείο. Οι τεχνικές με χρήση μάσκας έχουν περιορισμούς όσον αφορά τις τρισδιάστατες δομές και εφαρμόζονται κυρίως σε δισδιάστατα σχήματα. Από την άλλη, υπάρχουν οι συμβατικές κατεργασίες με χρησιμοποίηση εργαλείων, που αφορούν δημιουργία διαφόρων τρισδιάστατων σχημάτων, ενώ γίνεται χαρτογράφηση του μονοπατιού του εργαλείου. Από τις πιο χαρακτηριστικές τεχνολογίες μικροκατεργασίας είναι η μικροτόρνευση, όπου η συμβατική κατεργασία αποβολής υλικού έχει προσαρμοστεί σε διαστάσεις μικρών (μm). Η διαδικασία κοπής περιλαμβάνει, την κίνηση του υλικού κατεργασίας σε σχέση με κοπτικό εργαλείο, ώστε να διαχωριστεί το επιπλέον στρώμα υλικού υπό μορφή

αποβλίττου. Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται η γενική ιδέα της μικροτόρνευσης.



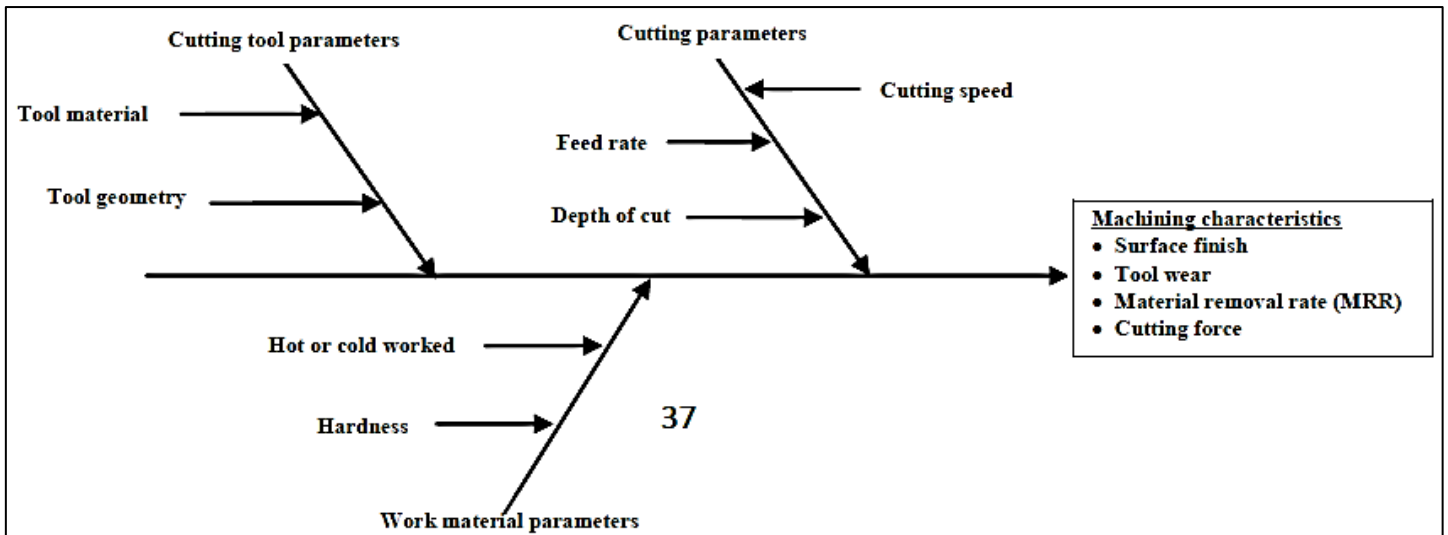
Εικόνα 2.1: Μικροτόρνευση [48]

Ο M.A.Rahman et. al. [53] πρότεινε ότι η μικροτόρνευση παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής τρισδιάστατων χαρακτηριστικών σε μικροκλίμακα, με τη χρησιμοποίηση κοπτικού εργαλείου, και ακολουθώντας διάφορα μονοπάτια κοπής. Ο M. P. Groover [54] επεσήμανε ότι η πρωταρχική κίνηση μεταξύ του εργαλείου και υλικού επιτυγχάνεται με συγκεκριμένη ταχύτητα κοπής, ενώ το εργαλείο πρέπει να κινείται εγκάρσια του υλικού με μικρότερη κίνηση, καλούμενη πρόωση. Επίσης, η τελευταία διάσταση που πρέπει να καθορισθεί είναι το βάθος κοπής. Ο κυρίαρχος μηχανισμός κοπής στις κατεργασίες είναι η διατμηματική παραμόρφωση του υλικού κατεργασίας, η οποία δημιουργεί απόβλιττο το οποίο απομακρύνεται, ενώ διαμορφώνεται μια νέα επιφάνεια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Εγκάρσια τομή μιας κατεργασίας [54]

Ο Masuzawa, T. [55] αναφέρει ότι το κύριο μειονέκτημα της μικροτόρνευσης είναι ότι η δύναμη επηρεάζει την ακρίβεια της μεθόδου και περιορίζει το διαθέσιμο μέγεθος υλικού προς επεξεργασία. Οι Lim et. al. [56] αναφέρουν ότι η δύναμη ώσης τείνει να εκτρέψει το υλικό κατεργασίας. Παρόλα αυτά, το υλικό κατεργασίας μπορεί να δονηθεί κατά την εφαπτομενική κατεύθυνση μεταξύ της επιφάνειας επαφής μεταξύ του υλικού – εργαλείου, μιας και η κάθετη κατεύθυνση μπλοκάρεται από το εργαλείο κοπής. Οι Lu, Z και Takeshi Yoneyama [57] παρατήρησαν ότι όσο η διάμετρος του υλικού κατεργασίας μειώνεται, τόσο μειώνεται η ακαμψία του. Συνεπώς, ο έλεγχος της δύναμης αντίδρασης κατά την κοπή είναι σημαντικός για τη βελτίωση της ακρίβειας της κατεργασίας. Η τιμή της δύναμης κοπής πρέπει να είναι μικρότερη από την πλαστική παραμόρφωση του υλικού, ώστε να αποφεύγεται η εκτροπή. Οι παράμετροι διαδικασίας που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της κατεργασίας φαίνονται στην Εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3: Παράμετροι διαδικασίας που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της μικροτόρνευσης [48]

Οι K. M. Rezaur Rahman et. al. [58] διερεύνησαν την επίδραση διαφόρων παραμέτρων όπως η ταχύτητα περιστροφής, η πρόωση και ο χρόνος παραμονής στην απόδοση της κατεργασίας μικροτόρνευσης, όπως η φθορά του εργαλείου, η δύναμη κοπής και η τραχύτητα της επιφάνειας για επινικελωμένο υλικό. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι όσο αυξανόταν η ταχύτητα κοπής και πρόωσης τόσο αυξανόταν η δύναμη κοπής, ενώ δεν είχε καμία επίδραση στην τραχύτητα της επιφάνειας και στη φθορά του εργαλείου.

Οι Choudhury, I.A., EI-Baradie, M.A. [59] επεσήμαναν ότι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των μικροκατεργασιών είναι η ποιότητα της επιφάνειας, η οποία καθορίζεται από την τραχύτητα της επιφάνειας. Η τραχύτητα οφείλεται στη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου (γωνία κοπής, η γεωμετρία του άκρου κοπής κτλ.) και στις συνθήκες κοπής (ο ρυθμός πρόωσης, ταχύτητα κοπής, βάθος κοπής κτλ). Ολοκληρώνοντας σημαντική παράμετρος είναι και η φθορά του εργαλείου που επηρεάζει την ποιότητα των τελικών τμημάτων.

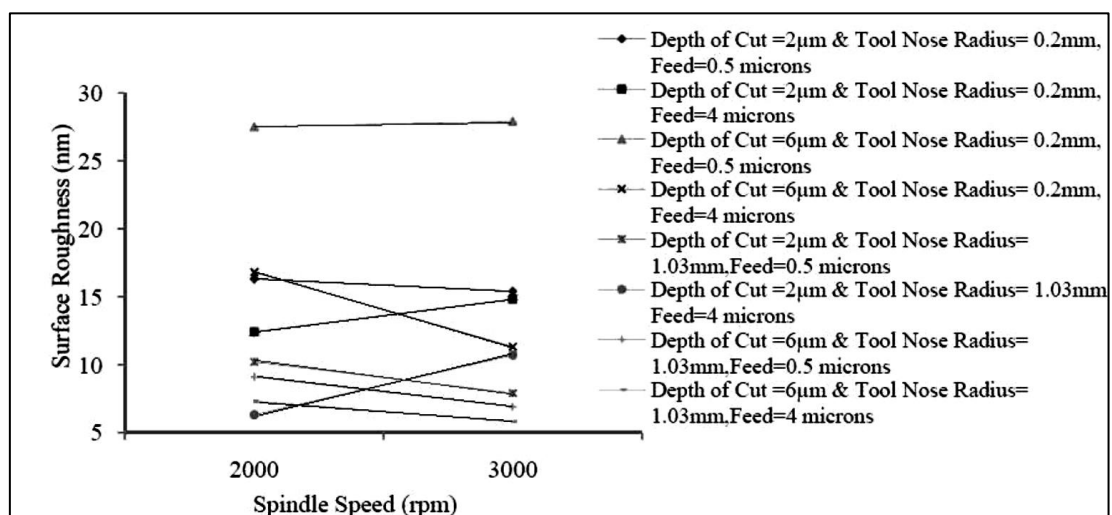
Στη συνέχεια ακολουθεί μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των ερευνών που έχουν γίνει στον τομέα της μικροτόρνευσης, καθώς επίσης των προβλημάτων που ανακύπτουν κατά τη διαδικασία.

2.1.1 Τραχύτητα επιφάνειας

Οι Oezel, T. και Karpat, Y [60] έδειξαν ότι η ποιότητα της επιφάνειας αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην εκτίμηση της παραγωγικότητας του μηχανικού εργαλείου, συνεπώς είναι σημαντική η επίτευξη υψηλής ανοχής και ικανοποιητικής ποιότητας επιφάνειας.

Οι Kai Liu και Shreyes N. Melkote [61] διεξήγαγαν πειράματα για να προβλέψουν την τραχύτητα της επιφάνειας κατά τη μικροτόρνευση κράματος αλουμινίου, λαμβάνοντας υπόψη την πλαστική πλευρική ροή, τη γεωμετρία του εργαλείου και τις παραμέτρους της κατεργασίας. Οι παρατηρήσεις τους έδειξαν ότι η τραχύτητα της επιφάνειας μειώνεται με την πρόωση, φτάνει σε ένα ελάχιστο και στη συνέχεια αυξάνεται με επιπλέον μείωση της πρόωσης.

Οι K. A. Mahajan et. al. [62] διερεύνησαν τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής με την τραχύτητα της επιφάνειας, βλέποντας την επίδραση παραμέτρων όπως, ο ρυθμός πρόωσης, το βάθος κοπής και η ακμή του άκρου του κοπτικού εργαλείου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα της Εικόνας 2.4 που ακολουθεί. Όπως φαίνεται όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα του άκρου του κοπτικού εργαλείου, καλύτερη τραχύτητα της επιφάνειας επιτυγχάνεται με αύξηση του βάθους κοπής, της ταχύτητας περιστροφής και του ρυθμού πρόωσης.



Εικόνα 2.4: Σχέση της ταχύτητας περιστροφής με την ποιότητα τη επιφάνειας με μεταβλητό βάθος κοπής, ρυθμό πρόωσης και ακτίνα άκρου του εργαλείου. [62]

Σε πιο εξειδικευμένες μελέτες, οι K.C. Chan., et. al. [63] διεξήγαγαν λεπτομερή ανάλυση των παραγόντων που αφορούν τη δημιουργία επιφάνειας με τόννευση μεταλλικού σύνθετου υλικού Al6061/SiCp υπερυψηλής ακρίβειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ποιότητα και η τραχύτητα της επιφάνειας βελτιώνονται σημαντικά χρησιμοποιώντας μεγάλη ταχύτητα περιστροφής και σωστό ρυθμό πρόωσης του εργαλείου. Το βάθος κοπής δεν αποτελεί παράγοντα επηρεασμού της τραχύτητας της επιφάνειας, παρά μόνο υπό συνθήκες χαμηλής ταχύτητας περιστροφής.

2.1.2 Ρυθμός Αποβολής Υλικού

Ο Ρυθμός αποβολής υλικού (Material removal rate - MRR) ορίζεται ως ο όγκος του αποβαλλόμενου υλικού ανά μονάδα χρόνου κατεργασίας.

Ο ρυθμός αυτός επηρεάζεται από όλες τις παραμέτρους της διεργασίας, όπως η ταχύτητα περιστροφής, το βάθος κοπής και ο ρυθμός πρόωσης, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της απαιτούμενης δύναμης για τη διατήρηση της κατεργασίας κοπής.

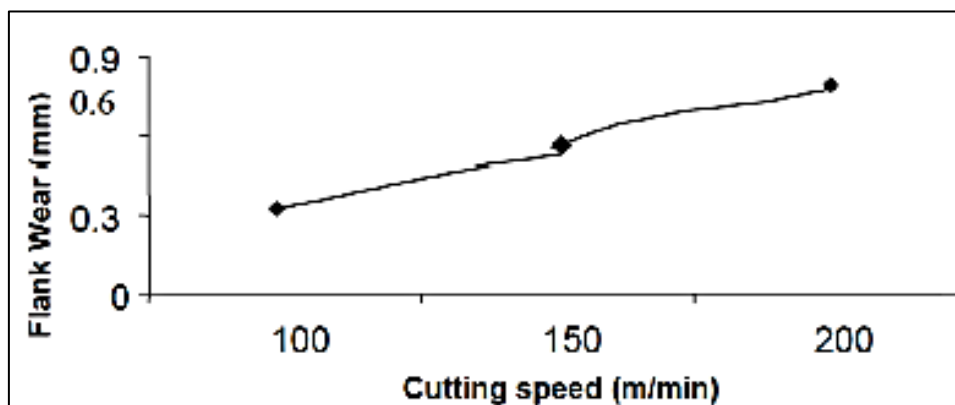
Οι M. Azizur Rahman et. al. [64] μελέτησαν την κατεργασιμότητα του ορείχαλκου, κράματος αλουμινίου και του ανοξείδωτου χάλυβα υπό μακρόχρονη διαδικασία μικροτόννευσης με διάφορους συνδυασμούς εργαλείου – τεμαχίου κατεργασίας, και μεταβάλλοντας τις παραμέτρους της διεργασίας. Διαπίστωσαν ότι αν αυξηθεί ο ρυθμός πρόωσης, αυξάνεται και η επιφάνεια επαφής μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου, αυξάνοντας επακόλουθα και το ρυθμό αποβολής υλικού.

Από την άλλη, ο JiwanqYan. [65] σχεδίασε ένα πείραμα με τόννευση διαμαντιού για τη διερεύνηση του μικροσκοπικού μηχανισμού αποβολής υλικού. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι ο μηχανισμός περιλαμβάνει όλκιμη συμπεριφορά του υλικού, διάσπαση ρωγμών και εκτόπιση κόκκων. Επίσης η αποβολή του υλικού εξαρτάται από το μέγεθος και το βάθος των κόκκων καθώς και από τη συνδετική δύναμη στα όρια των κόκκων.

2.1.3 Φθορά του Εργαλείου

Η φθορά του εργαλείου ορίζεται ως η αλλαγή του σχήματος του εργαλείου σε σχέση με το αρχικό του σχήμα, κατά την κοπή, λόγω βαθμιαίας απώλειας υλικού του εργαλείου. Η φθορά του εργαλείου σταδιακά θα οδηγήσει σε αστοχία του κοπτικού εργαλείου, με αποτέλεσμα να πρέπει να αντικατασταθεί ώστε να διασφαλιστεί η επιθυμητή κοπή. Η φθορά του εργαλείου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον τύπο του εργαλείου, τη σκληρότητα του υλικού κατεργασίας και τις χρησιμοποιούμενες παραμέτρους της διαδικασίας.

Οι Zhiyu Zhang et. al [66] μελέτησαν τα χαρακτηριστικά φθοράς του εργαλείου κατά τη μικροτόρνευση καρβιδίου του πυριτίου και συμπέραναν ότι η φθορά του εργαλείου αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα προβλήματα στην κατεργασία σκληρών, ψαθυρών υλικών. Οι M. Aruna et. al. [67] μελέτησαν την επίδραση της ταχύτητας κοπής στη φθορά του άκρου του κοπτικού εργαλείου. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 2.5, όσο χαμηλότερη η ταχύτητα κοπής τόσο μικρότερη η προκαλούμενη φθορά.



Εικόνα 2.5: Επίδραση της ταχύτητας κοπής στη φθορά του άκρου του κοπτικού εργαλείου [68]

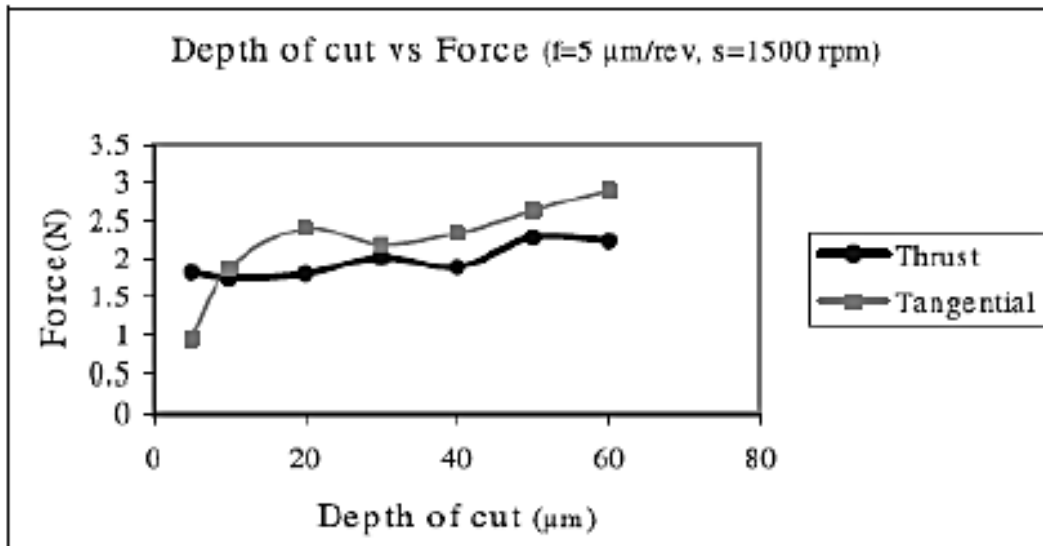
Τέλος, οι Zhiyu Zhang et. al. [68] μέσα από πειράματα μικροτόρνευσης με διαμάντι και παρατήρησης SEM, συμπέραναν ότι η φθορά του εργαλείου αποτελείται από δυο περιοχές με διαφορετικά μοτίβα φθοράς: από περιοδικές μικροεγκοπές και από μη περιοδικά σημάδια απόξεσης. Τα τελευταία μπορεί να εξαφανιστούν με αύξηση της απόστασης κοπής. Επίσης, η μέθοδος κοπής ταλαντούμενου εργαλείου μπορεί να μειώσει την

προκαλούμενη φθορά και να αυξήσει παράλληλα την απόδοση του εργαλείου.

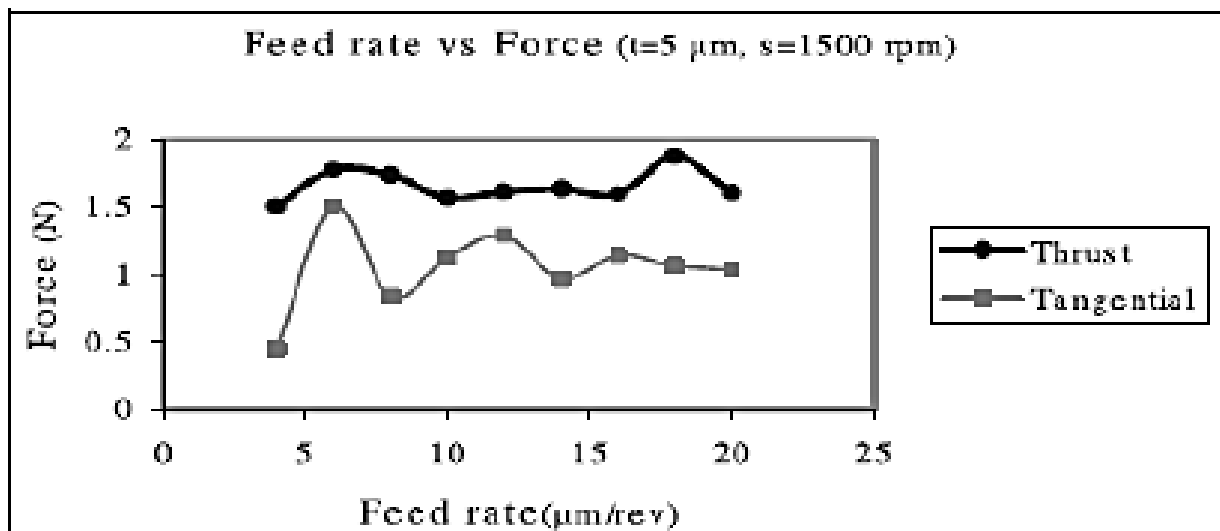
2.1.4 Δύναμη Κοπής

Οι δυνάμεις κοπής που παράγονται κατά την κοπή μετάλλων έχουν άμεσο αντίκτυπο στην παραγωγή θερμότητας, και κατ' επέκταση στη φθορά του εργαλείου, στην ποιότητα αλλά και στην ακρίβεια της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Λόγω των σύνθετων διατάξεων εργαλείων/συνθηκών κοπής κατεργασιών μετάλλων και λόγω αγνώστων παραγόντων και τάσεων, οι θεωρητικού υπολογισμοί των δυνάμεων κοπής απέτυχαν να δώσουν ακριβή αποτελέσματα.

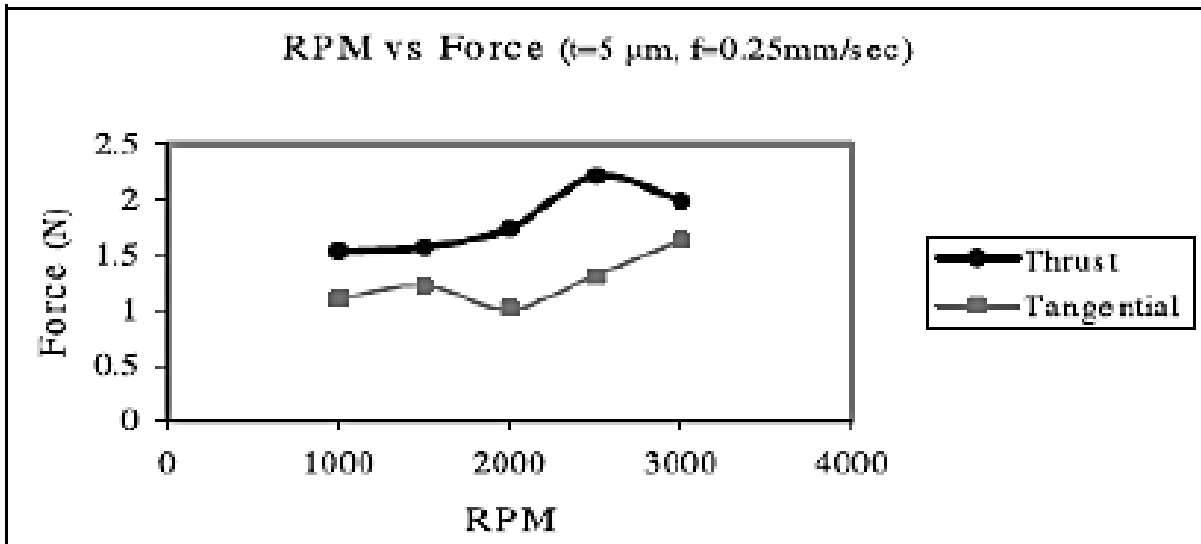
Οι Zinan Lu και Takeshi Yoneyama [69] χρησιμοποίησαν εργαλείο διαμαντιού μονού άκρου για την κοπή διαφόρων σχημάτων και μελέτησαν τη χρησιμότητά αυτών των μικροεργαλείων σε διάφορες μορφές. Η δύναμη μετρήθηκε με αισθητήρες και βρέθηκε ότι η δύναμη κοπής μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Οι Kohichi Miura, et. al. [70] εξήγαγαν μια γραμμική σχέση μεταξύ της δύναμης ώσης και του βάθους κοπής, υπό ελεγχόμενες συνθήκες για τη γωνία προσέγγισης των πειραμάτων. Η σχέση αυτή έδειξε ότι η δύναμη κοπής αυξάνεται όσο αυξάνεται η σκληρότητα του υλικού κατεργασίας. Επίσης η δύναμη κοπής αυξάνεται, όπως ήταν αναμενόμενο, για μεγαλύτερους ρυθμούς πρόωσης και βάθη κοπής. Οι M. Azizur Rahman et. al. [71] κατασκεύασαν μικροακροδέκτες με τη βοήθεια κοπτικών εργαλείων καρβιδίου. Στα πειράματα που διεξήγαγαν μετέβαλλαν τις συνθήκες κοπής όπως το βάθος κοπής (t), το ρυθμό πρόωσης (f) και την ταχύτητα (s), αναλύοντας παράλληλα τις εφασπτομενικές και τις δυνάμεις ώσης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6 αυξάνοντας το βάθος κοπής, αρχικά η δύναμη ώσης υπερिशύει της εφασπτομενικής έως ένα σημείο και στη συνέχεια η εφασπτομενική υπερिशύει έναντι της δύναμης ώσης. Από την άλλη στις Εικόνες 2.7 και 2.8 φαίνεται ότι η εφασπτομενική δύναμη υπερिशύει έναντι της δύναμης ώσης, με αύξηση της ταχύτητας και της πρόωσης.



Εικόνα 2.6: Δυνάμεις κοπής σε σύγκριση με τη μεταβολή του βάθους κοπής [71]



Εικόνα 2.7: Δυνάμεις κοπής σε σύγκριση με τη μεταβολή της πρόωσης [71]



Εικόνα 2.8: Δυνάμεις κοπής σε σύγκριση με τη μεταβολή της ταχύτητας [71]

Ολοκληρώνοντας τη βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις δυνάμεις κοπής, οι W B Lee et. al. [72] παρουσίασαν μια διεπιστημονική προσέγγιση ποσοτικής ανάλυσης της τριβής για τις δυνάμεις κοπής κατά την τόννευση κρυσταλλικών υλικών με εργαλείο διαμαντιού. Τα αποτελέσματα έδειξαν η περιοδικότητα της διακύμανσης των δυνάμεων κοπής εξαρτάται όχι μόνο από την κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό των υλικών αλλά και από τις συνθήκες τριβής κατά την κοπή. Το προτεινόμενο μοντέλο εφαρμόζεται όχι μόνο σε μονοκρυστάλλους αλλά και σε πολυκρυσταλλικά υλικά με υψηλό κρυσταλλογραφικό περιεχόμενο.

2.1.5 Μελλοντικές προοπτικές

Η έρευνα στον τομέα της μικροτόρνευσης είναι σχετικά πρόσφατη και απαιτεί επιπρόσθετη εμβάθυνση. Σε μελλοντικές μελέτες, μπορεί να εξεταστούν παράμετροι, όπως το μέγεθος των κόκκων του υλικού και οι θερμοκρασίες, καθώς και ο τρόπος επίδρασής τους και αλληλεπίδρασης στα χαρακτηριστικά της κατεργασίας, στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στην ακρίβεια των διαστάσεων. Εξάλλου τα φινιρίσματα της επιφάνειας σε επίπεδο νανοκλίμακας που μπορούν να επιτευχθούν, μειώνουν το χρόνο ζωής του εργαλείου, με αποτέλεσμα να αποτελούν εμπόδιο για τη χρήση της μικροτόρνευσης σε βιομηχανική κλίμακα. Επιπρόσθετη μελέτη πρέπει να γίνει και όσον αφορά τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της

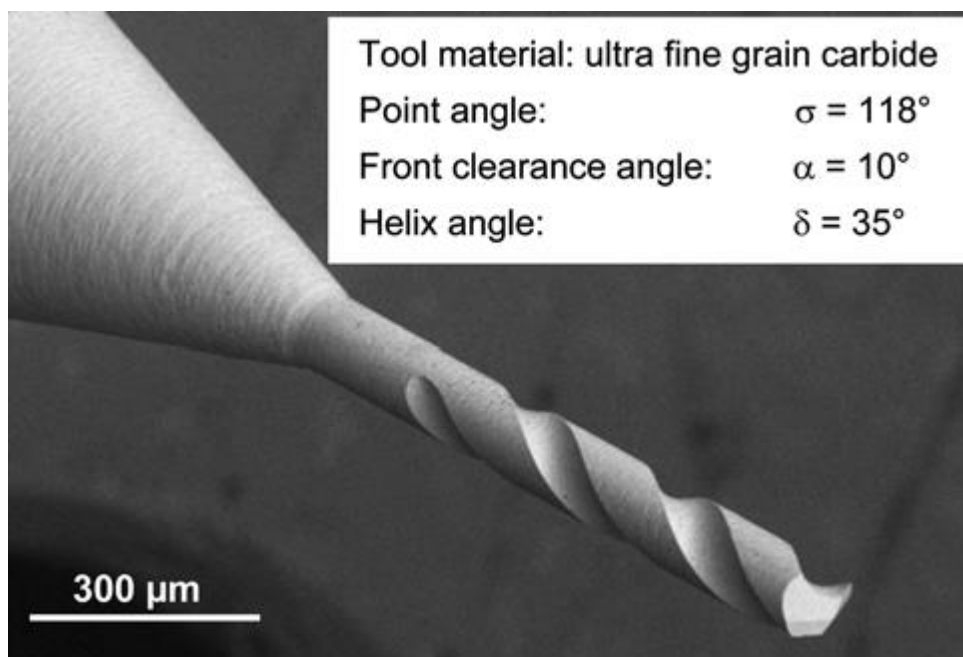
κατεργασίας για τη βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας, του ρυθμού αποβολής υλικού και της μείωσης της φθοράς του εργαλείου για την κατεργασία σκληρών υλικών. Το συνολικό κόστος της μικροκατασκευής αποτελεί σημαντική παράμετρο, και ειδικότερα του κόστους των εργαλείων και του εξοπλισμού, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς και όχι για βιομηχανικές εφαρμογές. [48]

2.2 Μικροδιάτρηση

2.2.1 Επίδραση κλίμακας κατά τη μικροδιάτρηση χάλυβα

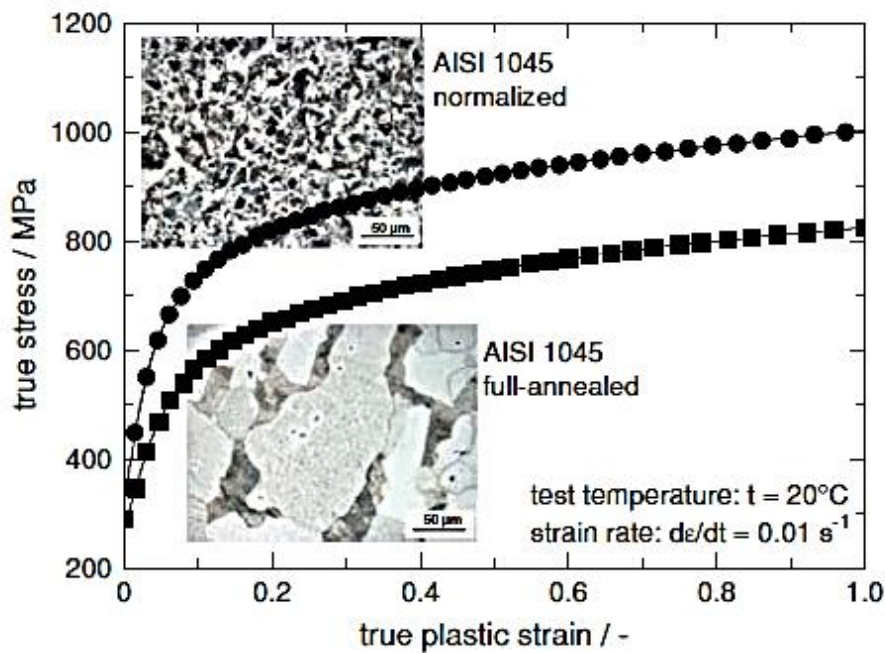
Η μελέτη που διεξήχθη από τους F. Klocke et al. [73] είχε σκοπό την κατανόηση της διαδικασίας διάτρησης σε μικροκλίμακα. Για να το επιτύχει εκτέλεσε πειράματα μικροδιάτρησης σε χάλυβα AISI 1045 χρησιμοποιώντας αισθητήρα δύναμης Kistler με πιεζοηλεκτρική βάση (εύρος λειτουργίας ± 500 N, ευαισθησία 1 mN). Οι δοκιμές διεξήχθησαν και για διαφορετικές διαμέτρους δραπάνου στην περιοχή $d = 50\text{--}1.000$ μm .

Το δράπανο που χρησιμοποιήθηκε περιείχε τρυπάνια εξαιρετικά λεπτόκοκκου καρβιδίου (μέγεθος κόκκου 0.5–0.7 μm), ένα δράπανο διαμέτρου $d=100$ μm φαίνεται στην Εικόνα 2.9.



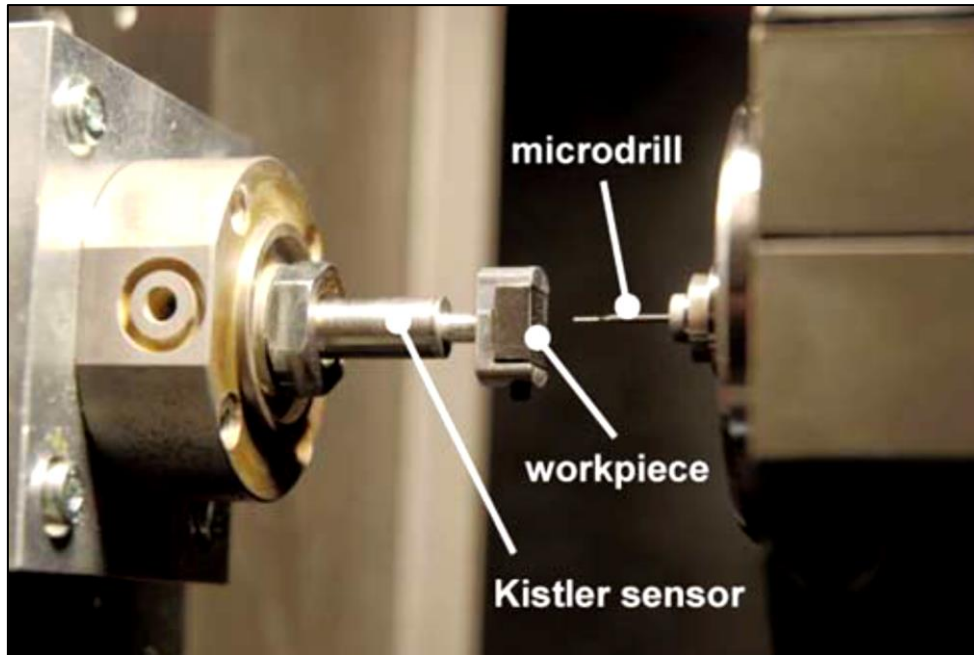
Εικόνα 2.9: Γεωμετρία μικροδραπάνου ($d=100$ μm) [73]

Το υλικό κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν σκληροχάλυβας AISI 1045. Για τη μελέτη της επίδρασης της μικροδομής του κατεργασμένου υλικού στη διαδικασία μικροδιάτρησης, το τεμάχιο διατρήθηκε υπό δυο διαφορετικές συνθήκες θερμικής επεξεργασίας, δηλ. διάτρηση υλικού με μέγεθος κόκκου 20 μm και διάτρηση πλήρως ανοπτημένου υλικού για 10 ώρες στους 1.000 $^{\circ}\text{C}$. Η Εικόνα 2.10 δείχνει τις ημιστατικές καμπύλες ροής καθώς και τη μικροδομή του θερμικά επεξεργασμένου υλικού κατεργασίας.



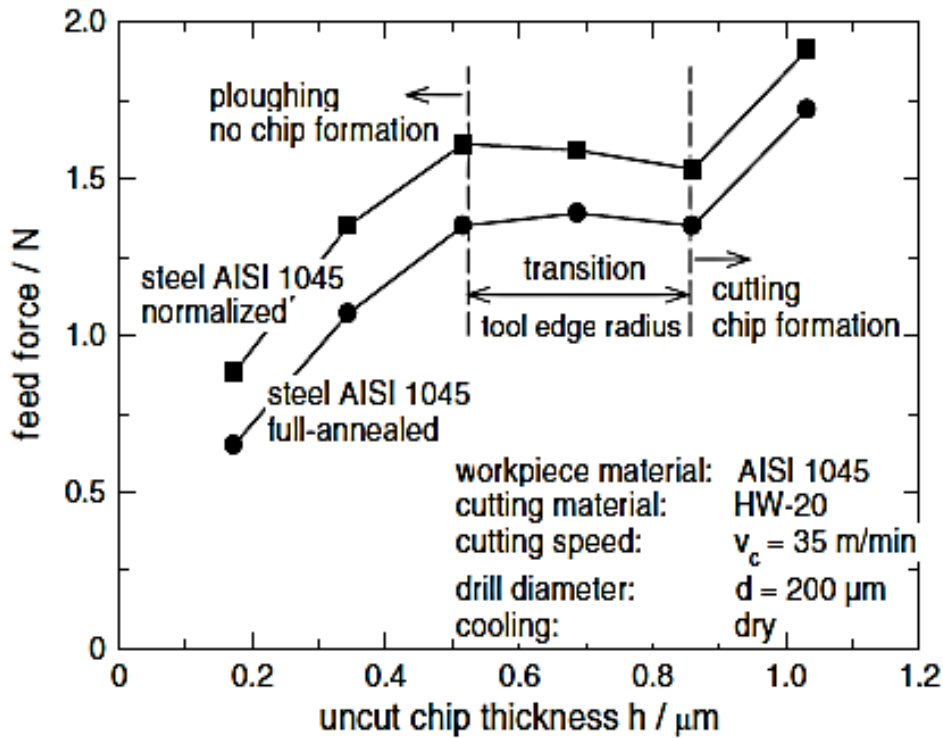
Εικόνα 2.10: Καμπύλες ροής και μικροδομή υλικών κατεργασίας [73]

Οι ταχύτητες κοπής που χρησιμοποιήθηκαν κυμαίνονταν μεταξύ 35–95 m/min . Στην Εικόνα 2.11 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές μικροδιάτρησης.



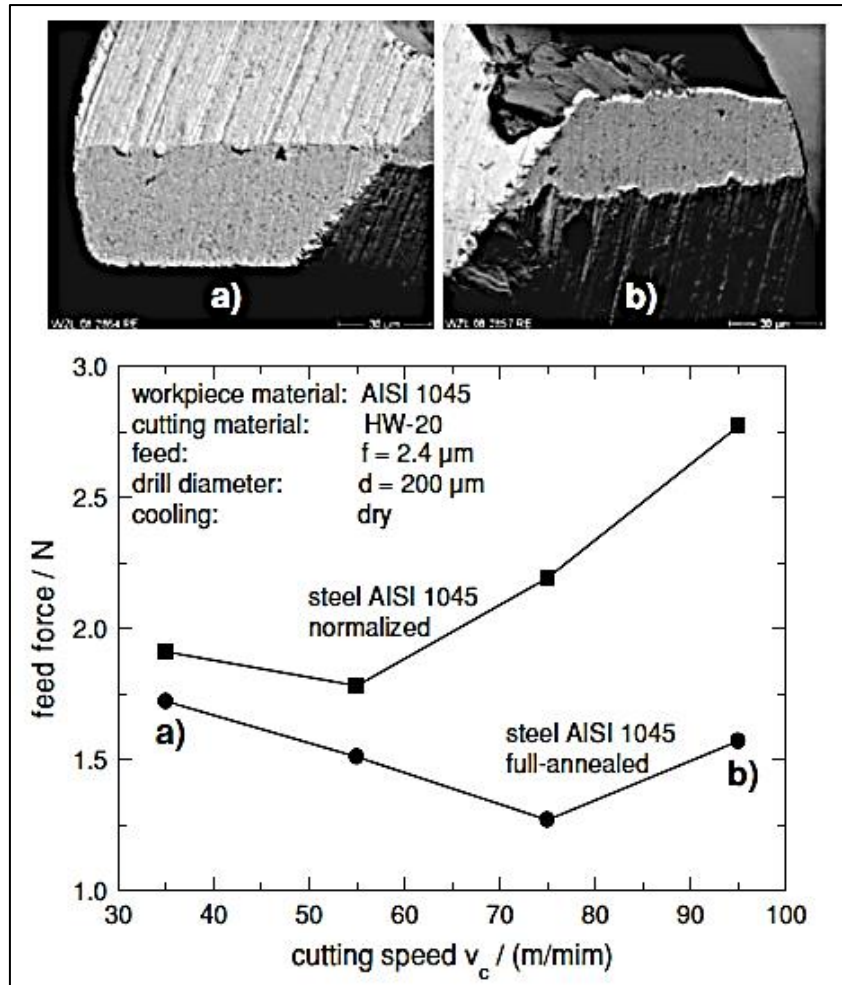
Εικόνα 2.11: Πειραματική διάταξη δοκιμών μικροδιάτρησης [73]

Στην Εικόνα 2.12 φαίνεται η εξάρτηση της πρόωσης με το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου για δράπανο διαμέτρου $d=200$ μm υπό σταθερή ταχύτητα κοπής $V_c = 35$ m/min . Οι μετρούμενες μέσες τιμές της πρόωσης είναι υψηλότερες κατά τη μικροδιάτρηση κανονικοποιημένου χάλυβα, σε σχέση με τον πλήρως ανοπτημένο, λόγω της διαφοράς στην αντοχή τους, όπως φάνηκε και στην Εικόνα 2.10. Όμοια με τη συμβατική κατεργασία, η πρόωση της μικροδιάτρησης μειώνεται με μείωση του πάχους του απαραμόρφωτου αποβλίττου. Παρόλα αυτά, όταν το πάχος είναι ίδιας τάξεως με την ακτίνα ακμής του εργαλείου, η δύναμη που προκαλείται λόγω της άρρωση ελέγχει τη διαδικασία της κοπής. Η τάση αυτή φαίνεται για τις δυο συνθήκες θερμικής κατεργασίας στην Εικόνα 2.12. [73]



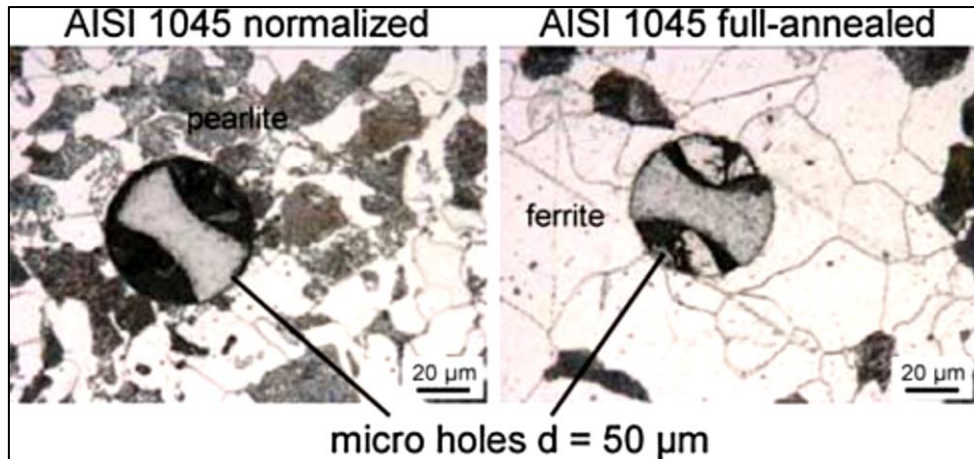
Εικόνα 2.12: Σχέση πρόωσης με το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου [73]

Στην Εικόνα 2.13 φαίνεται η επίδραση της ταχύτητας κοπής στην πρόωση κατά τις δοκιμές μικροδιάτρησης. Αύξηση της ταχύτητας κοπής μειώνει την πρόωση μέχρι να επιτευχθεί μια ελάχιστη τιμή. Το φαινόμενο σχετίζεται με τη θερμική μαλάκυνση που προκαλείται από την ανύψωση θερμοκρασίας λόγω της ταχύτητας κοπής. Στην Εικόνα 2.13 b φαίνονται τα επαυξημένα αποτελέσματα από τη διαμόρφωση ακμών σε μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής σε αντίθεση με τη συμβατική κατεργασία. [74]



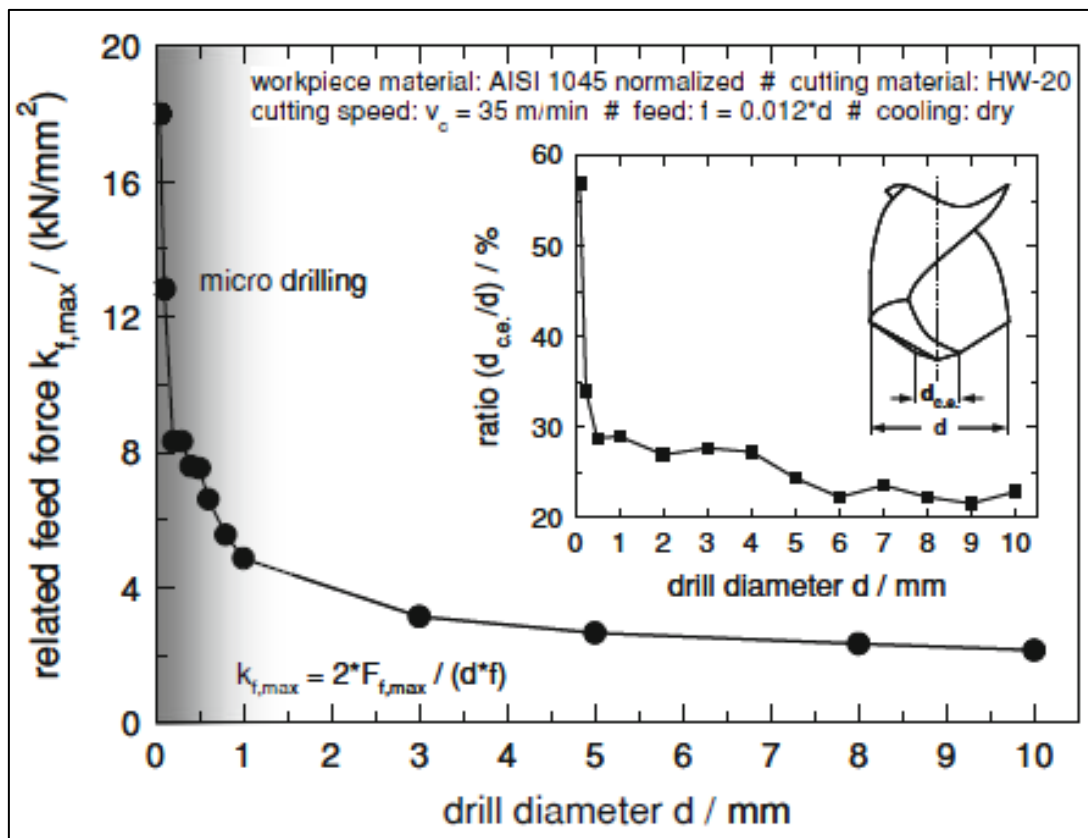
Εικόνα 2.13: Επίδραση της ταχύτητας κοπής με την πρόωση για μικροδιάτρηση χάλυβα [73]

Εκτός από την επίδραση κλίμακας, σημαντικό ρόλο παίζει και η επίδραση της μικροδομής του υλικού κατεργασίας, όταν η διάσταση του εργαλείου είναι ίδιας τάξης με το μέγεθος κόκκου. Σε αυτή την περίπτωση, το κατεργασμένο υλικό δεν θα πρέπει να θεωρείται ισοτροπικό και ομογενές. Στην Εικόνα 2.14 φαίνεται ξεκάθαρα η επίδραση κλίμακας αυτού του υλικού. Δημιουργώντας μικρό σπή 50 μm στο χάλυβα υπό κανονικές συνθήκες, το μικροδράπανο κόβει δυο φάσεις υλικού τον περλίτη και το φερρίτη. Από την άλλη, για τον ανοπτημένο χάλυβα, όπως ήταν αναμενόμενο το μικροδράπανο κόβει μόνο τη φάση του φερρίτη. [73, 74]



Εικόνα 2.14: Η επίδραση κλίμακας στο υλικό κατεργασίας [73]

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της μικροδιάτρησης με την κλασική μακροδιάτρηση ($d=1-10$ mm) χάλυβα AISI 1045 [75], σχεδιάστηκε η σχετική πρόωση της τομής του απαραμόρφωτου αποβλίττου σε σχέση με τις διαμέτρους των δραπάνων μεταξύ 50 μm και 10 mm, όπως φαίνονται στην Εικόνα 2.15.



Εικόνα 2.15: Η επίδραση κλίμακας για τη γεωμετρία του δραπάνου [73]

Μεγαλύτερη αύξηση της πρόωσης παρατηρείται όταν η διάμετρος του δραπάνου μειώθηκε στο εύρος του μικρόμετρου. Η μη γραμμική επίδραση κλίμακας της πρόωσης μπορεί να αποδοθεί στην εξάρτηση του μήκους ακμής της σμίλης με τη διάμετρο των επιλεχθέντων δραπάνων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.15. Εξάλλου, η τεχνικά αποδεκτή αύξηση του τμήματος της ακμής της σμίλης είναι για τη διασφάλιση της ακαμψίας και της σταθερότητας του εργαλείου, οδηγώντας σε σημαντική επίδραση στη διαδικασία μικροδιάτρησης.

2.3 Μικροφρεζάρισμα καθαρού χαλκού.

Οι M.Raman et al. [76] μελέτησαν τη στοχαστική φύση της διαδικασίας κοπής και ερεύνησαν τη συμπεριφορά των συνθηκών κοπής και την επίδραση τους σε ξηρή κατεργασία καθαρού χαλκού, ένα υλικό ευρέως χρησιμοποιούμενο σε βιομηχανίες καλουπιών, χύτευσης αλλά και σε ηλεκτρόδια.

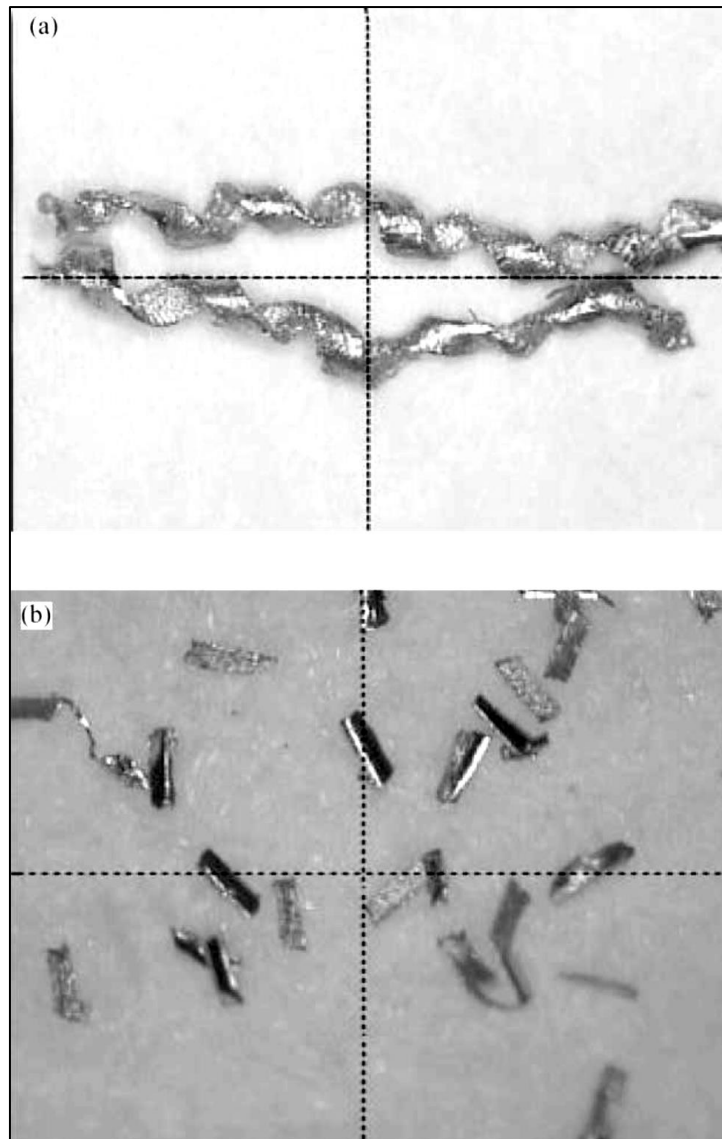
Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.16. Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε έφερε κατακόρυφη μηχανή φρεζαρίσματος με κινητήρα 22 kW. Τα χαρακτηριστικά ροπής του κινητήρα είναι 166 Nm και η ταχύτητα περιστροφής κυμαίνεται από 50 έως 30.000 rpm. Η δύναμη κοπής μετρήθηκε με τη βοήθεια δυναμομέτρου Kistler. Τέλος, η κατεργασία πραγματοποιήθηκε υπό ξηρές συνθήκες κοπής.



Εικόνα 2.16: Πειραματική διάταξη μικροφρεζαρίσματος καθαρού χαλκού [76]

2.3.1 Δημιουργία αποβλίττου

Τα απόβλιττα που δημιουργήθηκαν από την κατεργασία δεν ήταν εμφανή με γυμνό μάτι. Μεγεθυμένες εικόνες του παρουσιάζονται στις Εικόνες 2.17 (a) και (b). Όπως φαίνεται το σχήμα τους είναι σπειροειδές με βάση τη γεωμετρία του εργαλείου, όπως συμβαίνει και στη συμβατική κατεργασία, αλλά διαφέρει προφανώς σε μέγεθος. Τα σπειροειδή απόβλιττα ρέουν κατά μήκος του ελικοειδούς σχήματος του μικροεργαλείου, τα οποία με τη σειρά τους μειώνουν το χρόνο ζωής, αφού αυξάνεται ο ρυθμός φθοράς του μικροεργαλείου αλλά αυξάνεται η δύναμη κοπής.



Εικόνα 2.17: (a) Διαμόρφωση σπειροειδούς αποβλίττου υπό ταχύτητα κοπής 75 m/min, πρόωση 350 mm/min και βάθος κοπής 0,15 mm (b) Θραύσματα αποβλίττων για ταχύτητα κοπής 75 m/min, πρόωση 350 mm/min και βάθος κοπής 0,15 mm [76]

2.3.2 Φθορά εργαλείου

2.3.2.1 Προσδιορισμός φθοράς σε μικροφρεζομηχανή

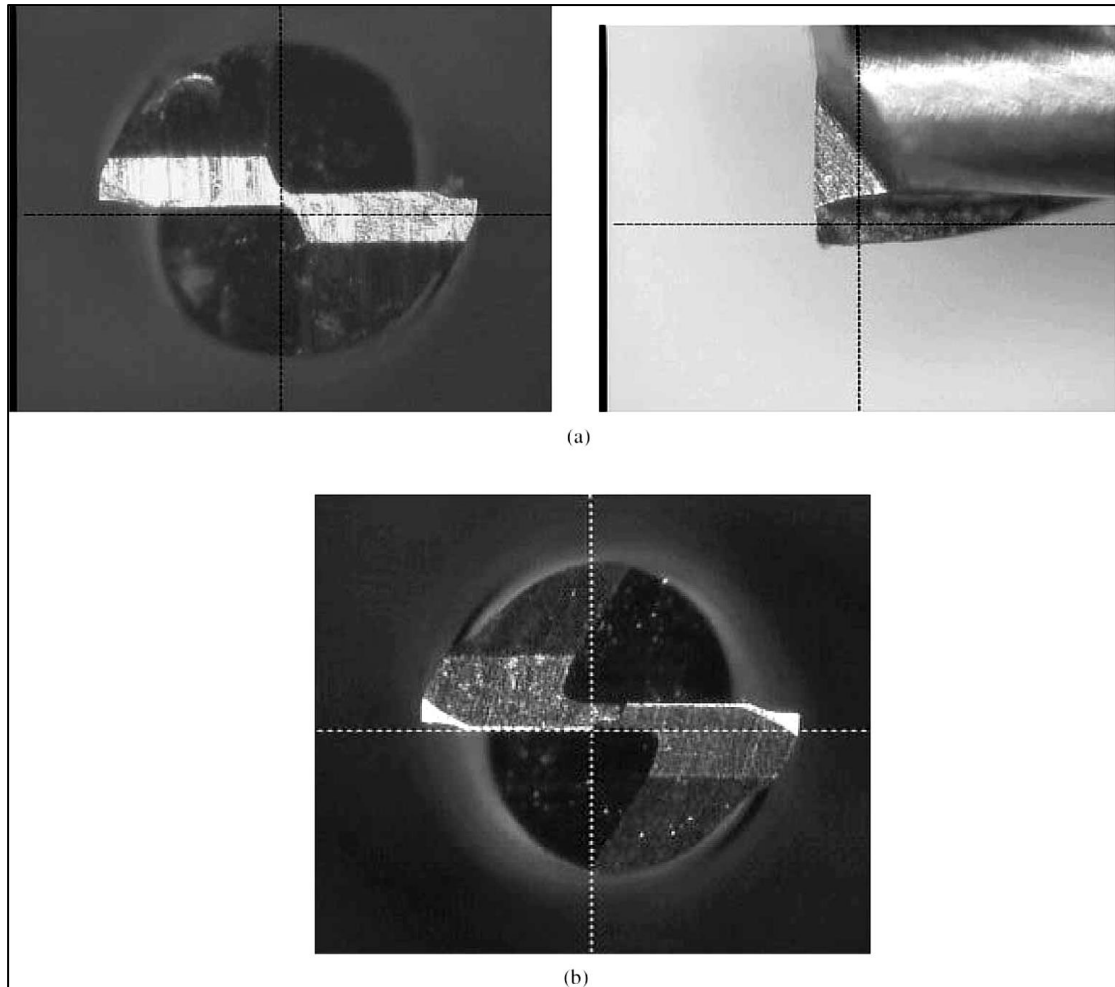
Η φθορά του εργαλείου είναι σημαντική κατά τις διαδικασίες των συμβατικών κατεργασιών. Είναι απαραίτητο όμως να εξεταστεί ο μηχανισμός φθοράς στη μικροκλίμακα, όσον αφορά το μέγεθος των μικροεργαλείων, τις διαστάσεις τους και την επακόλουθη δραστική επίπτωση τους σε διάφορες εφαρμογές. Στο μικροφρεζάρισμα, ο ρυθμός

αποβολής υλικού και οι δυνάμεις κοπής είναι πολύ μικρές. Από την άλλη, μικρή φθορά σε μια κοπτική ακμή μιας συμβατικής φρεζομηχανής μπορεί να αυξήσει τη δύναμη κοπής κατά ένα ποσοστό, αλλά να επιδεινώσει το φινίρισμα της επιφάνειας. Μικρότερη φθορά θα μπορούσε να εξαλείψει τελείως τη μισή κοπτική ακμή και να διπλασιάσει την κοπτική δύναμη της υπόλοιπης ακμής. Όσο φθείρεται το μικροεργαλείο, τόσο η κοπτική ακμή χάνει το σχήμα της, με αποτέλεσμα η δύναμη κοπής να αυξάνεται όσο το εργαλείο γίνεται πιο αμβλύ. Η αύξηση των κοπτικών δυνάμεων δημιουργεί παραμορφώσεις στο εργαλείο και μειώνει τη γεωμετρική ακρίβεια στο τεμάχιο κατεργασίας, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη αντικατάστασης του εργαλείου. [77]

2.3.2.2 Ανάλυση μηχανισμού φθοράς για εργαλείο καρβιδίου

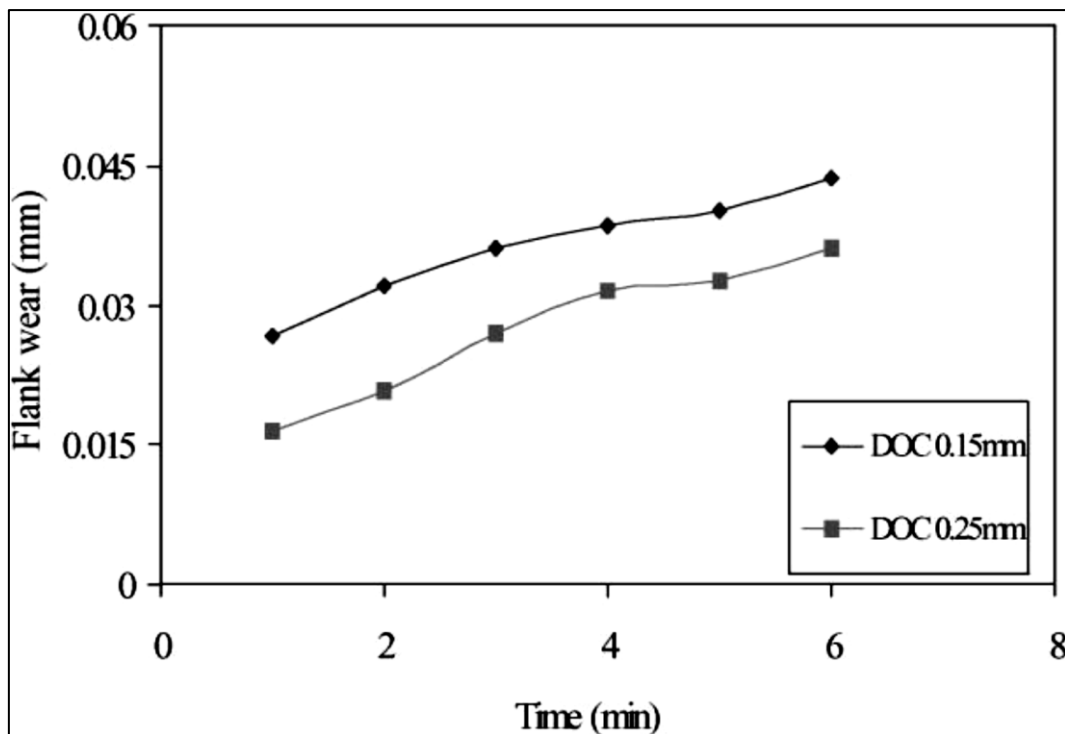
Οι Rahman et al [76] έλεγξαν το μηχανισμό φθοράς υπό ξηρές συνθήκες κατεργασίας σε σχέση με την ταχύτητα, την πρόωση και το βάθος κοπής. Πάνω από 80 εργαλεία ελέγχθηκαν σε διαφορετικές συνθήκες κοπής, κατά την κατεργασία καθαρού χαλκού με μικροφρεζομηχανή 1 mm με μη επικαλυμμένα καρβίδια κοπής γωνίας ελίκωσης 25° και 30°. Η ταχύτητα κοπής κυμάνθηκε από 8.000 έως 29.000 rpm.

Η φθορά του εργαλείου εμφανίζεται στη γωνία της μιας πλευράς και στο άκρο της κοπτικής ακμής. Η Εικόνα 2.18 δείχνει διάφορες μορφές αστοχίας εργαλείων ειδικών μικροκόκκων καρβιδίων διαμέτρου 1mm και γωνίας ελίκωσης 25° και 30°. Από την εικόνα είναι εμφανές ότι λαμβάνει χώρα μη ομοιόμορφη φθορά και στις κοπτικές ακμές, αυξάνοντας την κοπτική δύναμη και οδηγώντας τελικά σε αστοχία του εργαλείου. Θραύσματα του υλικού κατεργασίας κολλάνε στην επιφάνεια των κοπτικών ακμών. Συνήθως, τα μικροεργαλεία που χρησιμοποιούνται για κατεργασία χαλκού αστοχούν, προτού φθαρουν ολοκληρωτικά, γεγονός που οφείλεται στο ότι ο καθαρός χαλκός είναι εξαιρετικά όλκιμος και ελατός.

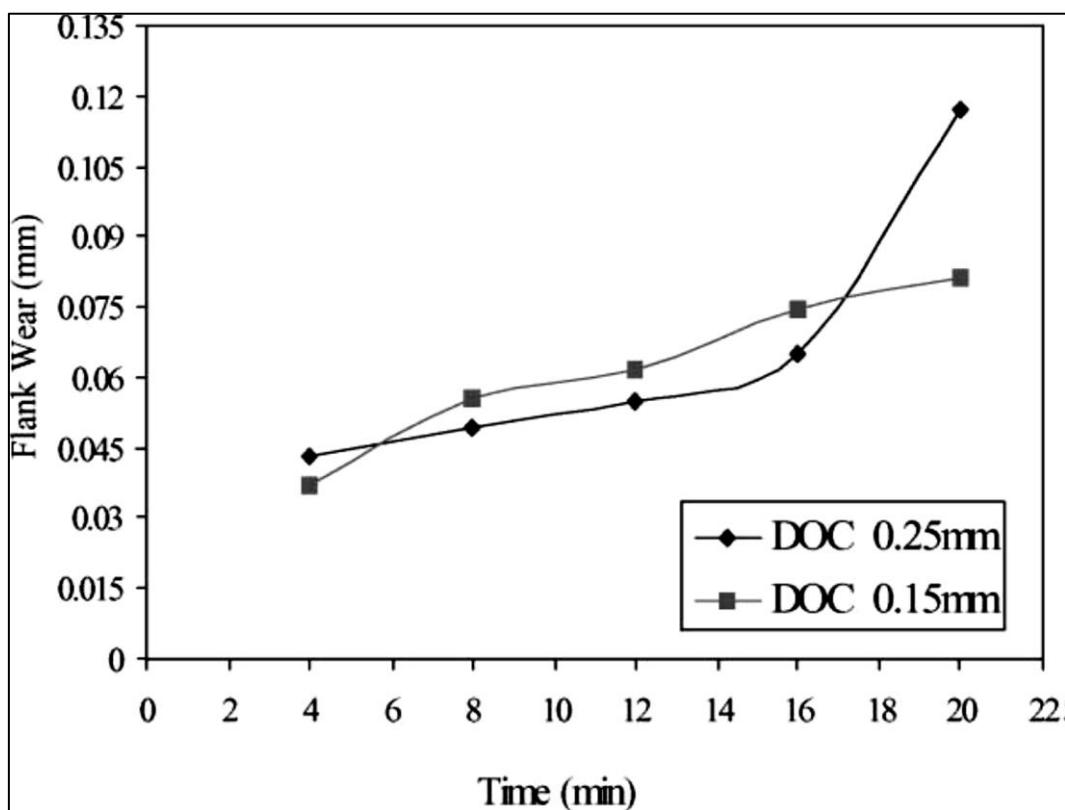


Εικόνα 2.18: (a) Συνήθως παρατηρούμενη φθορά άκρου κατά την κατεργασία καθαρού χαλκού, χρησιμοποιώντας εργαλείο ειδικών μικροκόκκων καρβιδίου, διαμέτρου 1 mm και έλικας 25° (b) Συνήθως παρατηρούμενη φθορά άκρου κατά την κατεργασία καθαρού χαλκού, χρησιμοποιώντας εργαλείο ειδικών μικροκόκκων καρβιδίου, διαμέτρου 1 mm και έλικας 30° [76]

Από τις Εικόνες 2.19 και 2.20 φαίνεται ότι η φθορά του εργαλείου καρβιδίου γωνίας ελίκωσης 25° είναι μικρότερη σε σύγκριση με αυτήν των 30°.

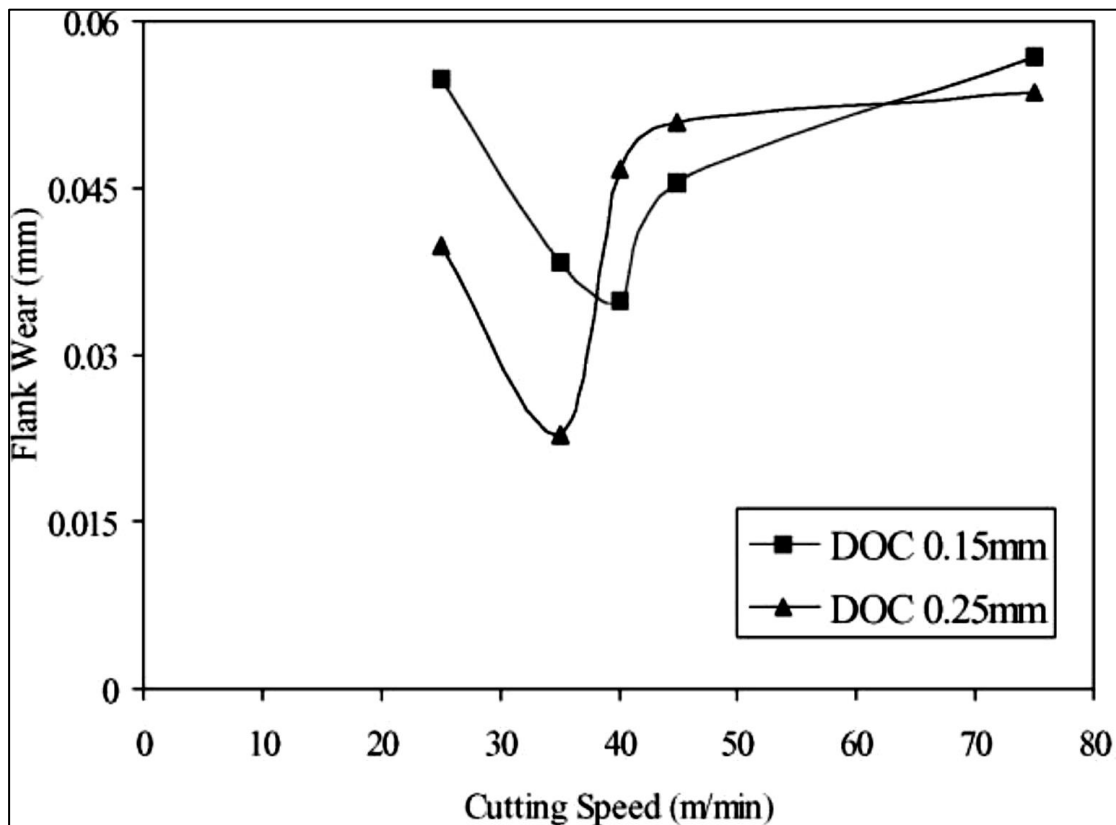


Εικόνα 2.19: Επίδραση βάθους κοπής για ταχύτητα κοπής 40 mm/min και πρόωσης 350 mm/min για έλικα 30° [76]



Εικόνα 2.20: Επίδραση βάθους κοπής για ταχύτητα κοπής 40 mm/min και πρόωσης 350 mm/min για έλικα 25° [76]

Πιο συγκεκριμένα από την Εικόνα 2.19 εξηγείται η επίδραση του βάθους κοπής για ταχύτητα κοπής 40 mm/min και πρόωσης 350 mm/min για ελίκωση 30°. Από τη σύγκριση των Εικόνων 2.19 και 2.20 είναι εμφανές ότι η ελίκωση των 25° έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Επίσης φαίνεται ότι η φθορά του άκρου για αξονικό βάθος κοπής 0,15 mm είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή των 0,25 mm. Ο λόγος είναι ότι το δημιουργούμενο απόβλιττο οδηγείται ομοιόμορφα από το υλικό κατεργασίας για βάθος κοπής 0,25 mm, δίνοντας σταθερότητα στο μικροεργαλείο σε σχέση με αυτό των 0,15 mm. [76, 77]

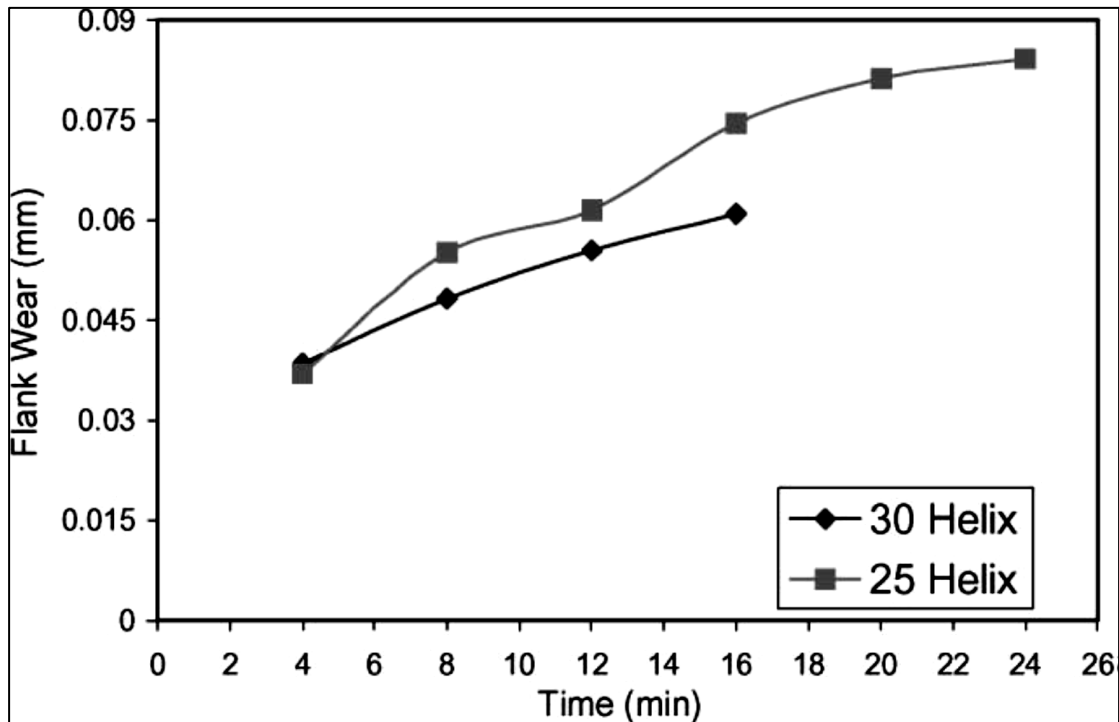


Εικόνα 2.21: Επίδραση του βάθους κοπής υπό διάφορες ταχύτητες κοπής για πρόωση 200 mm/min [76]

Η Εικόνα 2.21 δείχνει τη φθορά του άκρου για διάφορες ταχύτητες κοπής κατά το μικροφρεζάρισμα καθρού χαλκού για πρόωση 200 mm/min και ελίκωση 25°. Παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερο το βάθος κοπής τόσο χαμηλότερος ο ρυθμός φθοράς και πιο συγκεκριμένα σε χαμηλότερες

ταχύτητες κοπής ο ρυθμός είναι ελάχιστος. Σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής όσον αφορά το χρόνο ζωής του εργαλείου προκύπτει πρόβλημα. Έτσι ακόμη και μια μικρή δόνηση μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία του εργαλείου. [76]

2.3.3 Απόδοση του κοπτικού εργαλείου



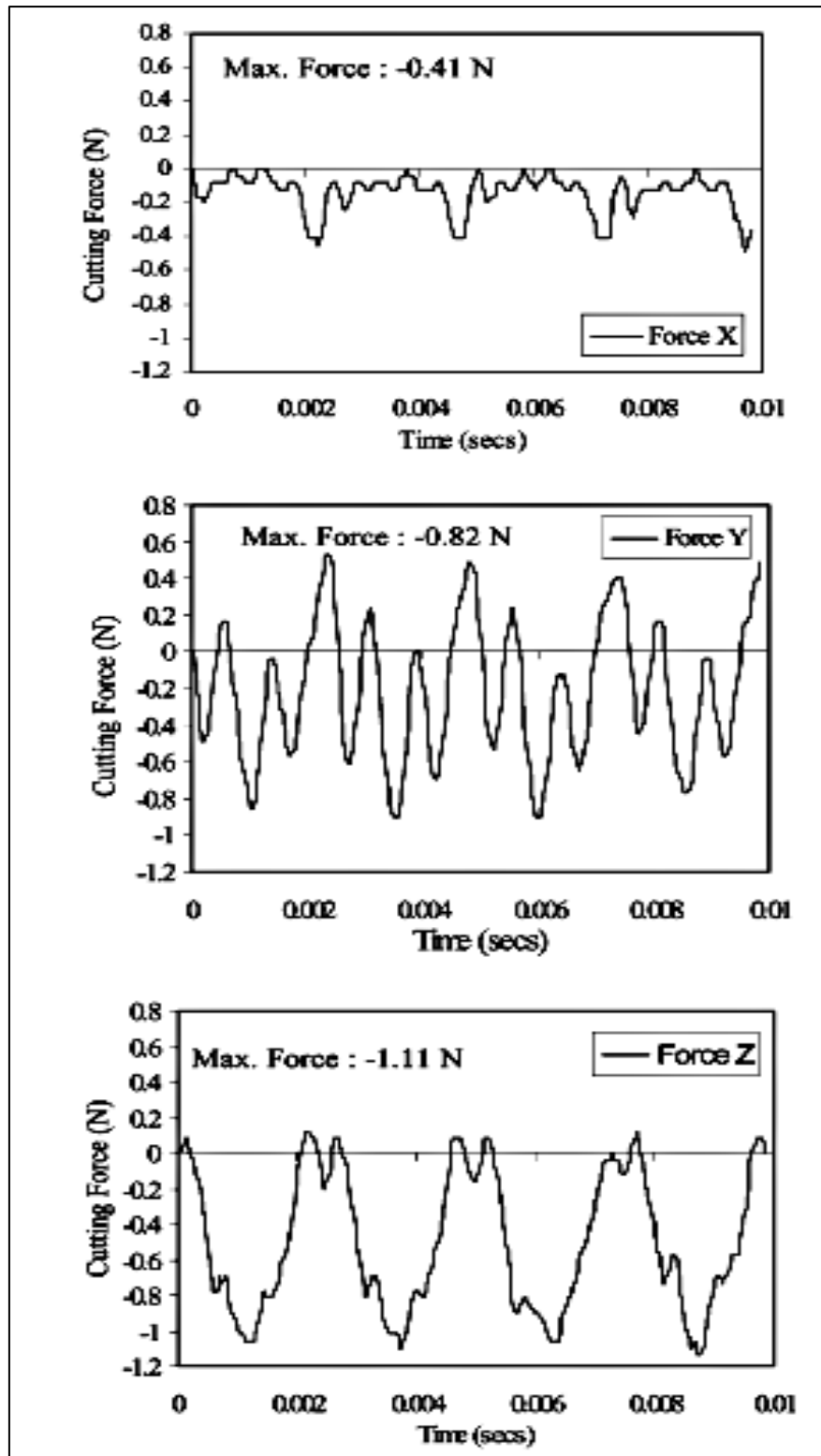
Εικόνα 2.22: Επίδραση της γωνίας έλικας για βάθος κοπής 0,15 mm από ταχύτητα κοπής 40m/min και πρόωση 350 mm/min [76]

Όσον αφορά την απόδοση του κοπτικού εργαλείου γωνίας ελίκωσης 25° και 30°, φαίνεται ότι η απόδοση της ελίκωσης των 25° είναι καλύτερη με βάση και τη ζωή του κοπτικού εργαλείου. Τα προηγούμενα παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.22. Για μικρότερο βάθος κοπής των 0,15 mm, ο χρόνος ζωής του εργαλείου είναι μικρότερος σε σχέση με αυτό των 0,25 mm, πράγμα που δεν συμβαίνει σε μηχανικές κατεργασίες.

2.3.4 Ανάλυση δύναμης κοπής μικροφρεζαρίσματος

Όπως και στις άλλες κατεργασίες, και στη μικροκλίμακα, η δύναμη κοπής αποτελείται από τη στατική και τη δυναμική συνιστώσα. Η στατική δύναμη είναι η μέση δύναμη κοπής, ενώ η δυναμική δύναμη είναι η διακύμανση από τη στατική δύναμη. [78]

Στην Εικόνα 2.23 παρουσιάζονται τυπικά γραφήματα των δυνάμεων κοπής υπό ξηρές συνθήκες. Ένας κύκλος διαλείπουσας κοπής αποτελείται από μια περίοδο που διενεργείται κοπή και μια περίοδο όπου δεν υπάρχει καθόλου επαφή μεταξύ του εργαλείου και του υλικού κατεργασίας. Αυτό φαίνεται και από το χρονικό σήμα των δυνάμεων κοπής. Η περιοχή όπου η συνισταμένη δύναμη κοπής είναι σχεδόν μηδέν αντιπροσωπεύει την περίοδο αδράνειας. Η περίοδος ακολουθείται από έναν κύκλο κοπής, όπου οι δυνάμεις κοπής αυξάνονται βαθμιαία μέχρι ενός μεγίστου και στη συνέχεια επαναφορά σε μια μέση τιμή. Η Εικόνα 2.23 δείχνει ότι η ακτινική δύναμη (Y) είναι μεγαλύτερη από την πρόωση (X). Πιο συγκεκριμένα η ακτινική δύναμη κοπής Y είναι διπλάσια από την πρόωση κοπής X . Στις μικροκατεργασίες, οι δυνάμεις κοπής είναι αρκετά μικρότερες σε σύγκριση με τη συμβατική κατεργασία. Η συνιστώσα δύναμης ώσης (Z) είναι $-1,11$ N στην είσοδο του κοπτικού εργαλείου. Από την Εικόνα 2.23, φαίνεται ότι η δύναμη αδράνειας αποκλίνει από το μηδέν, γεγονός που οφείλεται σε θόρυβο και σε δόνηση του εργαλείου. Η βαθμιαία αύξηση της δύναμης κοπής δείχνει τη φθορά που προχωράει κατά την κοπή. Ύστερα από μια χρονική περίοδο, η αύξηση της δύναμης δεν είναι τόσο μεγάλη όσο στην αρχή. Κατά την περίοδο κανονικής κοπής, η φθορά του εργαλείου, καθώς και η δύναμη κοπής είναι μέγιστη, όπως συμβαίνει και στη συμβατική κοπή. [76, 77, 78]



Εικόνα 2.23: Δυνάμεις κοπής υπό ταχύτητα κοπής 75 m/min, πρόωση 350 m/min και βάθος κοπής 0,25 mm [76]

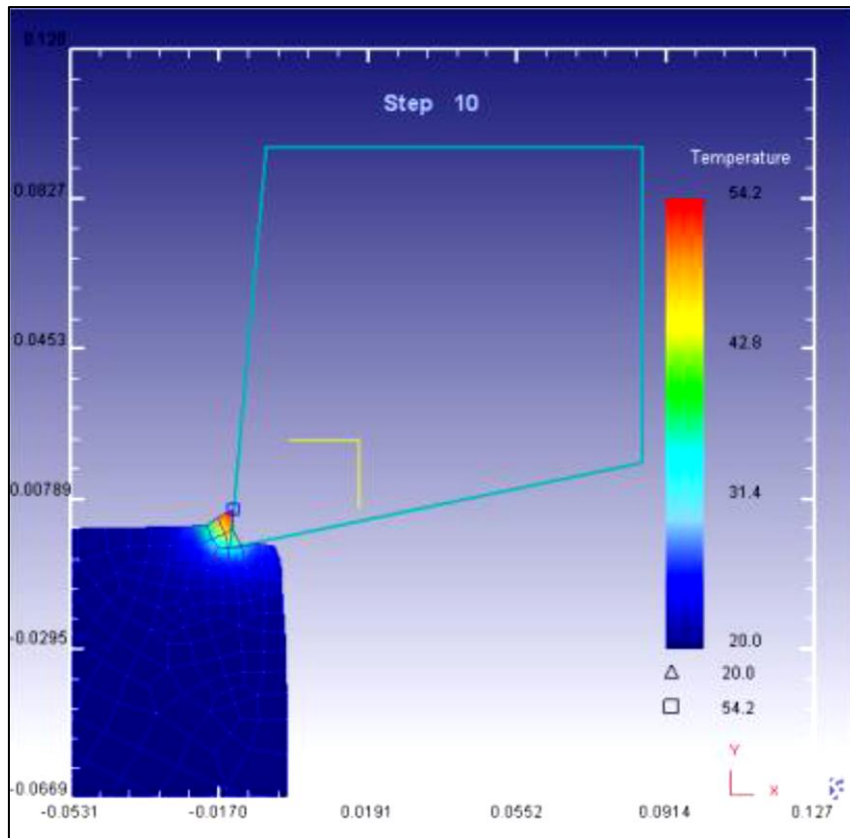
2.4 Σχέση θερμοκρασίας κοπής και παραμέτρων κοπής για μικροφρεζάρισμα

Στην κατεργασία του μικροφρεζαρίσματος, το ψυκτικό δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως στο συμβατικό φρεζάρισμα. Κατά συνέπεια, ο έλεγχος της θερμοκρασίας μπορεί να έχει τεράστια επίδραση στην ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Ένας τρόπος επίτευξης της επιθυμητής ποιότητας επιφάνειας, είναι να επιλεγούν οι βέλτιστες συνθήκες θερμοκρασίας, οι οποίες έχουν προκύψει από προσομοίωση της κατεργασίας.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, θα παρουσιαστεί ένα μοντέλο προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να υπολογιστούν η δύναμη κοπής, η φθορά, καθώς και η θερμοκρασία. Στη συνέχεια, μελετάται η θερμοκρασιακή διακύμανση υπό διαφορετικές συνθήκες κοπής και εξάγεται μια πιθανή συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας κοπής και της φθοράς. Τέλος, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για διάφορες συνθήκες, συγκρίνονται με αντίστοιχα πειράματα μέτρησης θερμοκρασίας με χρήση υπέρυθρης κάμερας *Cerid*.

2.4.1 Αριθμητική Προσομοίωση Πεπερασμένων Στοιχείων - Μέγεθος πλέγματος προσομοίωσης

Το μέγεθος του πλέγματος που θα επιλεγεί είναι τέτοιο, ώστε να εξαχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα με την ελάχιστη δυνατή υπολογιστική ισχύ. Στην Εικόνα 2.24 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο μοντέλο, όπου η περιστροφική κίνηση μετατρέπεται σε γραμμική, με τη βοήθεια του λογισμικού *DEFORM*, για να επιτευχθεί βέλτιστο μέγεθος πλέγματος.



Εικόνα 2.24: Απλοποιημένο μοντέλο δοκιμής [79]

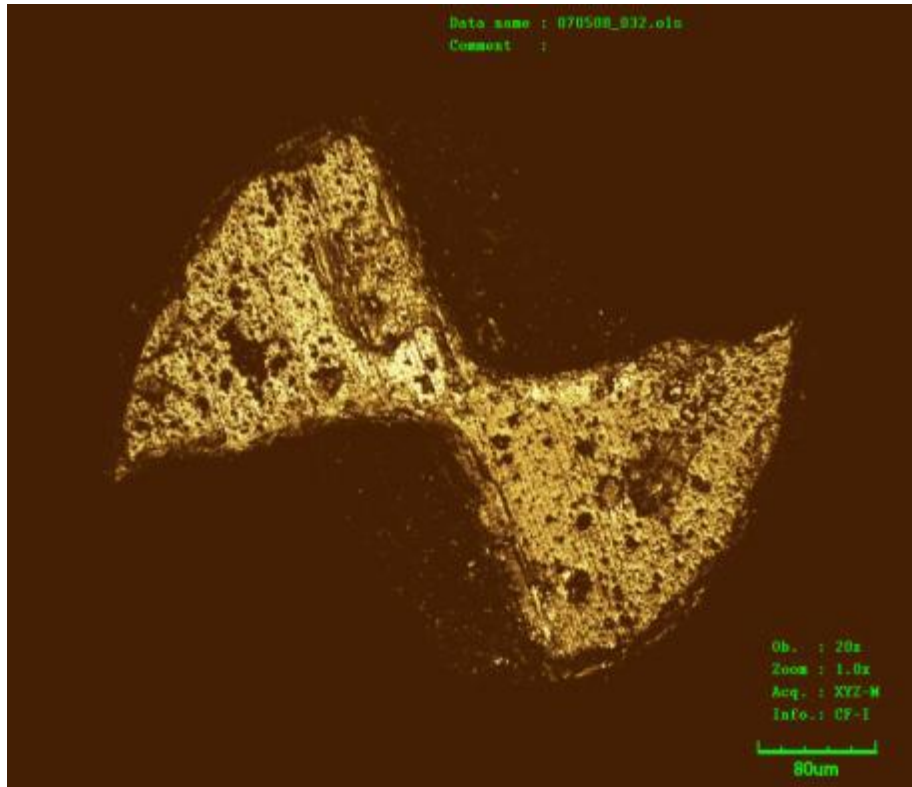
Από το παραπάνω μοντέλο, η προσομοίωση πραγματοποιείται υπό διαφορετικά μεγέθη πλέγματος και η αντίστοιχη ακρίβεια που επιτυγχάνεται φαίνονται στον Πίνακα 2.1. Είναι εμφανές ότι όσο μειώνεται το μέγεθος του πλέγματος, τόσο βελτιώνεται η ακρίβεια. Εν προκειμένω, το μέγεθος πλέγματος που επιλέχθηκε από τους Xuanze Zhou et al ήταν 0,0025 mm.

Πίνακας 2.1: Ακρίβεια προσομοίωσης σε σχέση με το μέγεθος του πλέγματος [79]

Μέγεθος Πλέγματος	Σχετική Ακρίβεια
0,0070 mm	98,69%
0,0050 mm	99,06%
0.0037 mm	99,10%
0.0025 mm	99,80%
0.0018 mm	100,00%

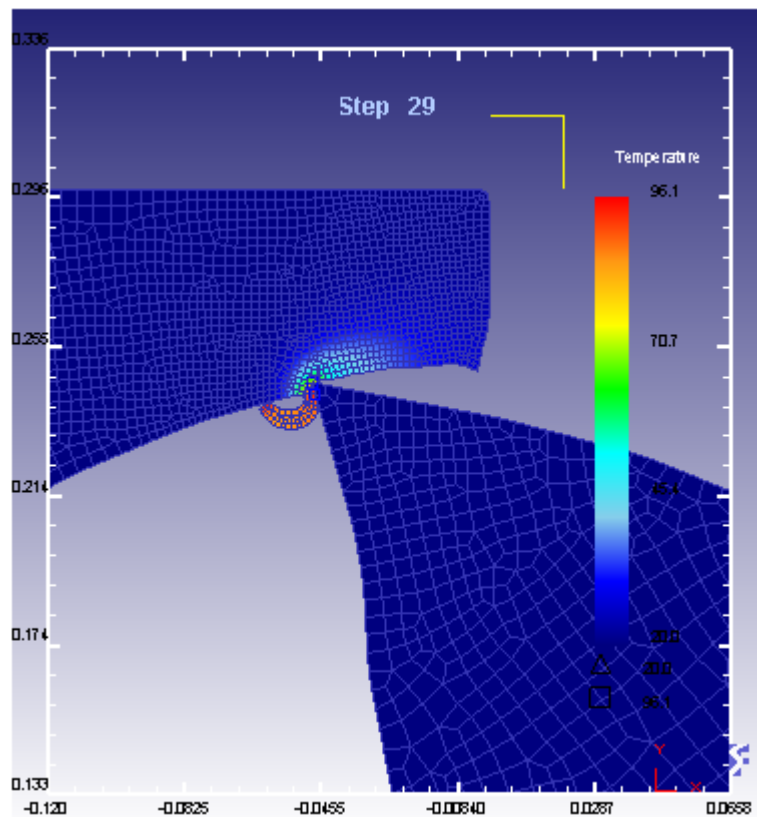
2.4.2 Δημιουργία του δισδιάστατου μοντέλου

Το σχήμα του εργαλείου δημιουργήθηκε βάσει της εικόνας που λήφθηκε από το μικροσκόπιο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.25.



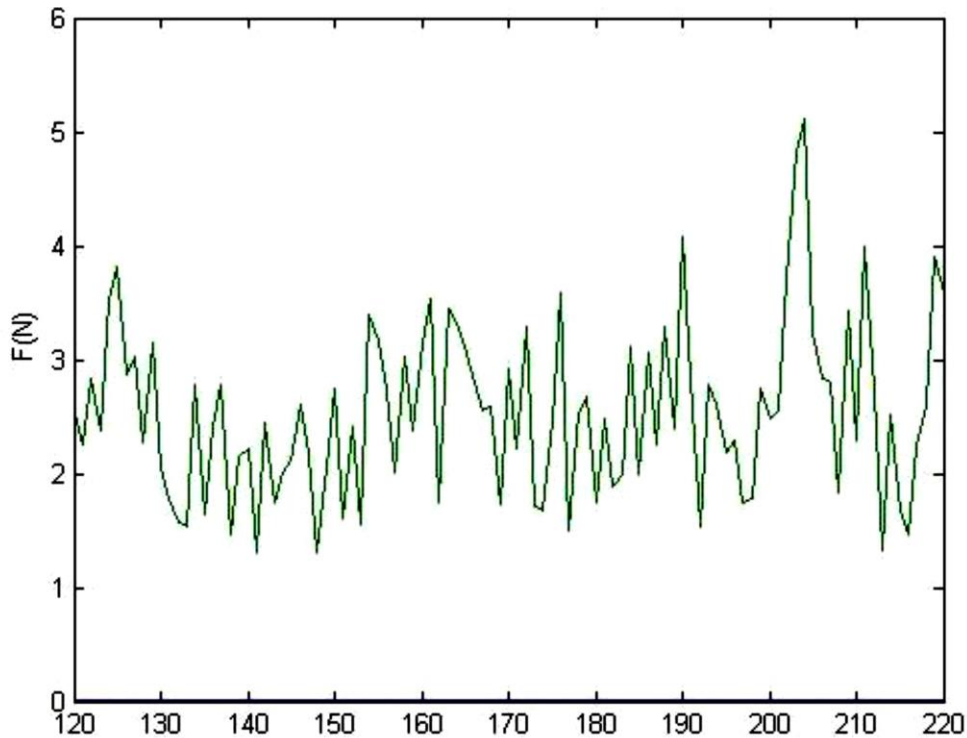
Εικόνα 2.25: Εργαλείο μικροφρεζαρίσματος όπως φαίνεται από μικροσκόπιο [79]

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ζώνης κοπής φαίνονται στην Εικόνα 2.26, όπου είναι εμφανές ότι το τμήμα με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία είναι το απόβλιττο.



Εικόνα 2.26: Πρώτο βήμα της προσομοίωσης [79]

Στην Εικόνα 2.27 φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε χρονοσειρά για τη δύναμη κοπής, όπου είναι εμφανές ότι εν γένει η δύναμη αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση του αποβλίττου όσο προχωρά η κοπή.

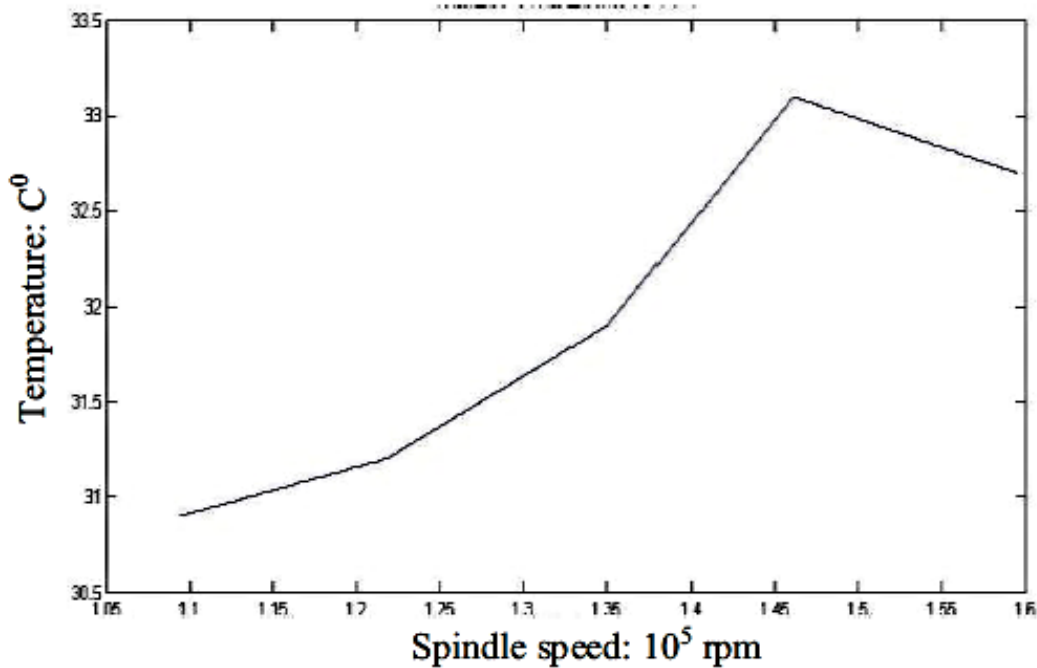


Εικόνα 2.27: Διάγραμμα δύναμης κοπής ως προς το χρόνο [79]

2.4.3 Παραμετρική ανάλυση προσομοίωσης

- Επίδραση της ταχύτητας κοπής

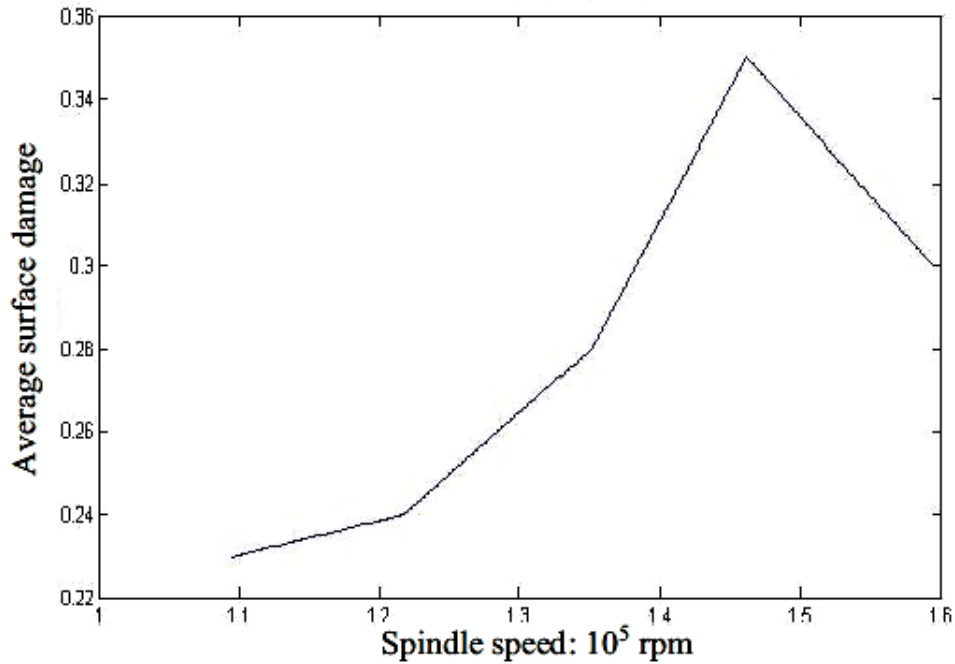
Στην περίπτωση αυτή, όλες οι συνθήκες διατηρούνται σταθερές, εκτός από την ταχύτητα κοπής. Μιας και η προσομοίωση θα εξακριβωθεί μέσω πειράματος από πραγματική φρεζομηχανή, η ταχύτητα κοπής δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 4,18 m/s με διάμετρο εργαλείου 0,5 mm. Έτσι, οι εφαρμοζόμενες ταχύτητες κοπής είναι 3,19 m/s, 3,53 m/s, 3,82 m/s και 4,18 m/s για πρόωση 3 mm/s. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην Εικόνα 2.28.



Εικόνα 2.28: Τάση της θερμοκρασίας κοπής για διαφορετικές ταχύτητες κοπής [79]

Από την καμπύλη φαίνεται ότι η θερμοκρασία κοπής αυξάνεται αρχικά και στη συνέχεια μειώνεται, όσο η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται. Ο λόγος είναι ότι από 109500 έως 146100 rpm, όπως φαίνεται στο διάγραμμα, η θερμοκρασία αυξάνεται, όσο αυξάνεται ενέργεια που παρέχεται από το κοπτικό εργαλείο. Παρόλα αυτά, από 146100 έως 159500 rpm, παρόλο που η ενέργεια κοπής αυξάνεται, η θερμότητα που απάγεται από το απόβλιττο αυξάνεται επίσης. Υπό υψηλή ταχύτητα, η θερμότητα που απάγεται είναι κυρίαρχη σε σχέση με την ενέργεια που αυξάνεται, με την αύξηση της ταχύτητας κοπής.

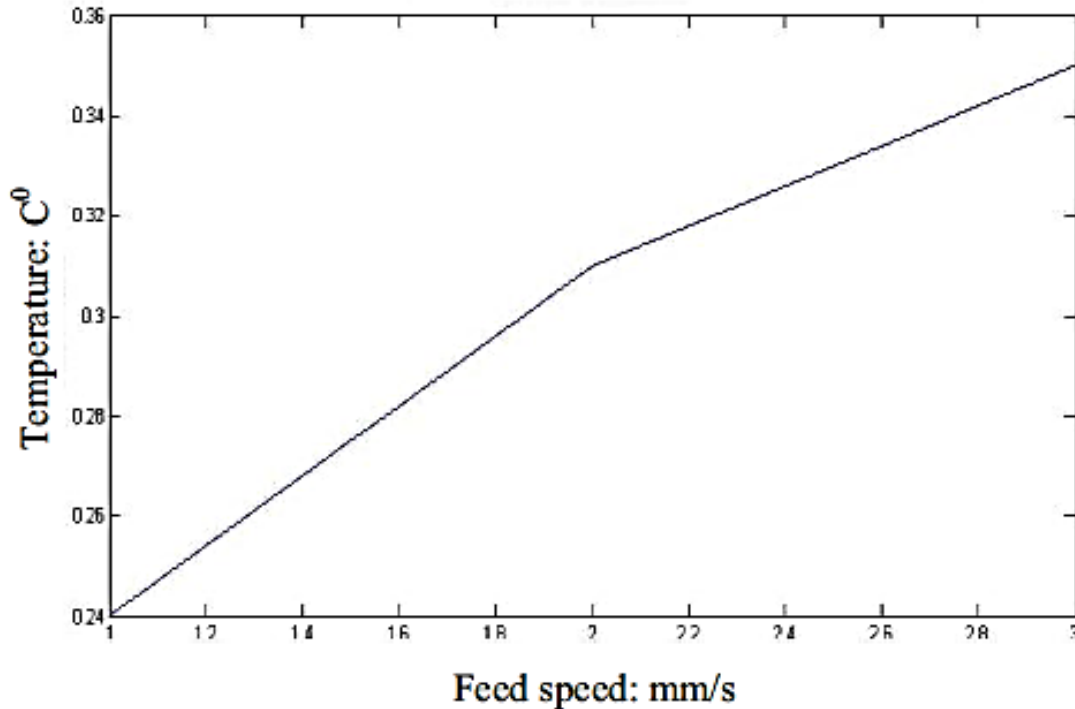
Στο ίδιο χρονικό διάστημα, συλλέγονται και δεδομένα φθοράς από την προσομοίωση. Στην Εικόνα 2.29 παρουσιάζεται η τάση και το σχήμα της καμπύλης φθοράς, που είναι ίδια με της θερμοκρασίας. Υπό μια έννοια, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι η φθορά σχετίζεται στενότερα με τη θερμοκρασία από ότι με την ταχύτητα κοπής. [79, 80]



Εικόνα 2.29: Τάση της φθοράς για διαφορετικές ταχύτητες κοπής [79]

- Επίδραση της ταχύτητας πρόωσης

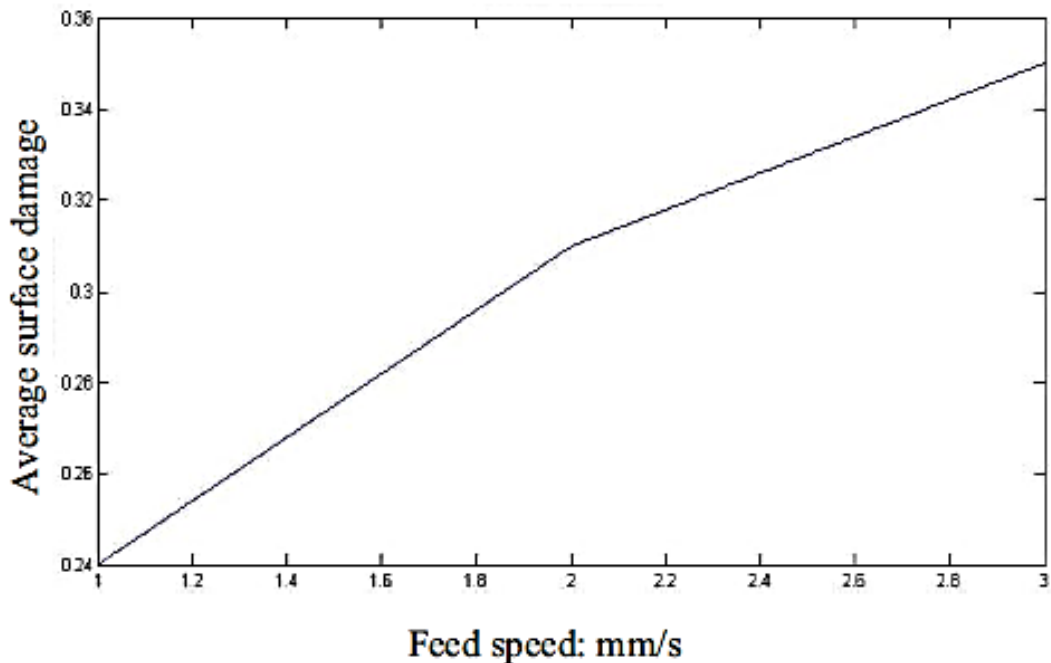
Στην περίπτωση αυτή, όλες οι συνθήκες διατηρούνται σταθερές, εκτός από την πρόωση. Μιας και η προσομοίωση θα εξακριβωθεί μέσω πειράματος με πραγματική φρεζομηχανή, η ταχύτητα πρόωσης τέθηκε 1 mm/s, 2 mm/s και 3 mm/s. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην Εικόνα 2.30.



Εικόνα 2.30: Τάση της θερμοκρασίας κοπής για διαφορετικές προώσεις [79]

Είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα πρόωσης, τόσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Αυτή η τάση ερμηνεύεται ικανοποιητικά μέσω του πάχους του αποβλίττου. Όταν αυξάνεται η ταχύτητα πρόωσης, ανάλογα αυξάνεται το βάθος κοπής. Το αυξημένο βάθος δημιουργεί παχύτερο απόβλιττο κατά τη διαδικασία κοπής, το οποίο αυξάνει και τη δύναμη κοπής. Κατά συνέπεια, με σταθερή ταχύτητα κοπής και αυξημένη δύναμη κοπής, η ισχύς που ασκεί το εργαλείο φρεζαρίσματος στο υλικό κατεργασίας αυξάνεται και κατά συνέπεια θα αυξηθεί και η θερμότητα. Αντίθετα με την επίδραση που έχει η ταχύτητα κοπής, η αυξανόμενη πρόωση δεν μπορεί να αυξήσει τη συναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον, όπως συνέβη με την ταχύτητα κοπής. Έτσι, στην περίπτωση αυτή δεν αναμένεται να υπάρξει σημείο καμψής.

Στο ίδιο χρονικό διάστημα, συλλέγονται και τα δεδομένα φθοράς από την προσομοίωση, και παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.31.



Εικόνα 2.31: Τάση της φθοράς για διαφορετικές προώσεις [79]

Τα αποτελέσματα δείχνουν και στην περίπτωση αυτή ότι η τάση της καμπύλης φθοράς είναι ανάλογη με την καμπύλη της θερμοκρασίας.

2.4.4 Πείραμα μέτρησης θερμοκρασίας κοπής μικροφρεζαρίσματος

Συνθήκες

Στην Εικόνα 2.32 φαίνεται η κατακόρυφη φρεζομηχανή CNC τριών αξόνων που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα των Xuance Zhou et al, ώστε να επαληθεύσουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της μηχανής είναι 300 mm x 300 mm x 290 mm με μέγιστη ταχύτητα περιστροφής στα 160000 rpm. Το υλικό κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν κράμα αλουμινίου (2Al2), μιας και είναι αρκετά κοινό υλικό σε μικροκατεργασίες. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.32, το κοπτικό μικροάκρο φρεζάρει προς την ίδια κατεύθυνση, ώστε να δημιουργηθούν μικροαυλακώσεις στο τεμάχιο.



(α)

(β)

(γ)

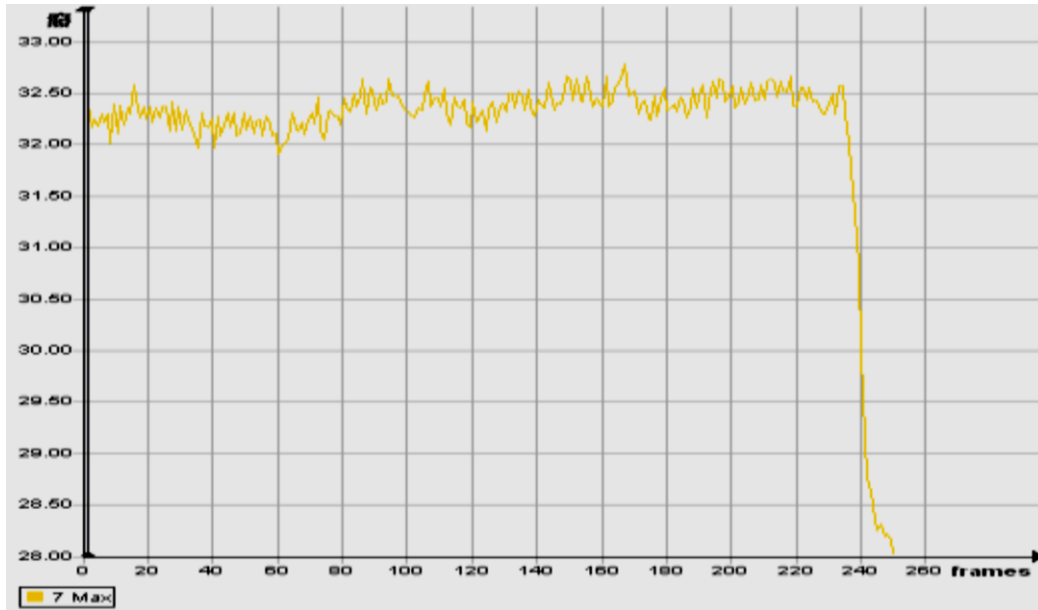
Εικόνα 2.32: Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα και σχήμα κατεργασίας, (α) Μικροφρεζομηχανή, (β) Κοπτικό εργαλείο μικροάκρου, (γ) Σχήμα κατεργασίας [79]

Η μικροφρεζομηχανή διπλής ακμής με επικάλυψη TiAlN που χρησιμοποιήθηκε ως κοπτικό εργαλείο, είχε τις ακόλουθες γεωμετρικές παραμέτρους: γωνία κοπής 5° , γωνία πλευράς 12° , γωνία ελίκωσης 30° , διάμετρο ακμής 0,5 mm και μήκος ακμής 1 mm. Η διάμετρος του μικροκοπτικού εργαλείου φαίνεται στην Εικόνα 2.32 (β), ενώ το βάθος κοπής για το πείραμα είναι 10 μm . Το σύστημα υπερύθρων Cerid χρησιμοποιήθηκε για να παρακολουθεί τη θερμοκρασία κοπής, κατά τη διαδικασία του μικροφρεζαρίσματος.

Επεξεργασία δεδομένων θερμοκρασίας

Προτού συλλεχθούν τα θερμοκρασιακά δεδομένα, η ακριβής ζώνη κοπής (σε επίπεδο pixel) πρέπει να προσδιοριστεί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δημιουργήθηκε ένας κώδικας Matlab, που να αναγνωρίζει τη ζώνη κοπής.

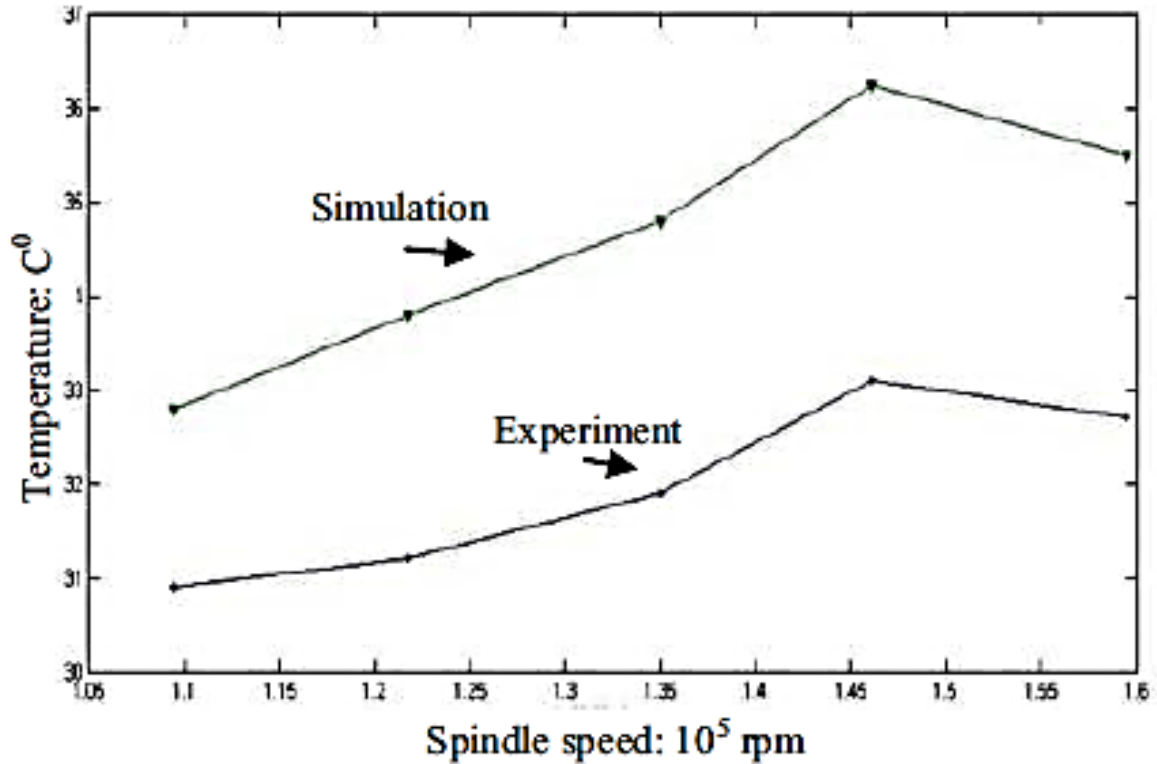
Στην Εικόνα 2.33 παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό προφίλ της ζώνης κοπής.



Εικόνα 2.33: Θερμοκρασίες κοπής που πάρθηκαν από βίντεο [79]

2.4.5 Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα αποτελέσματα προσομοίωσης

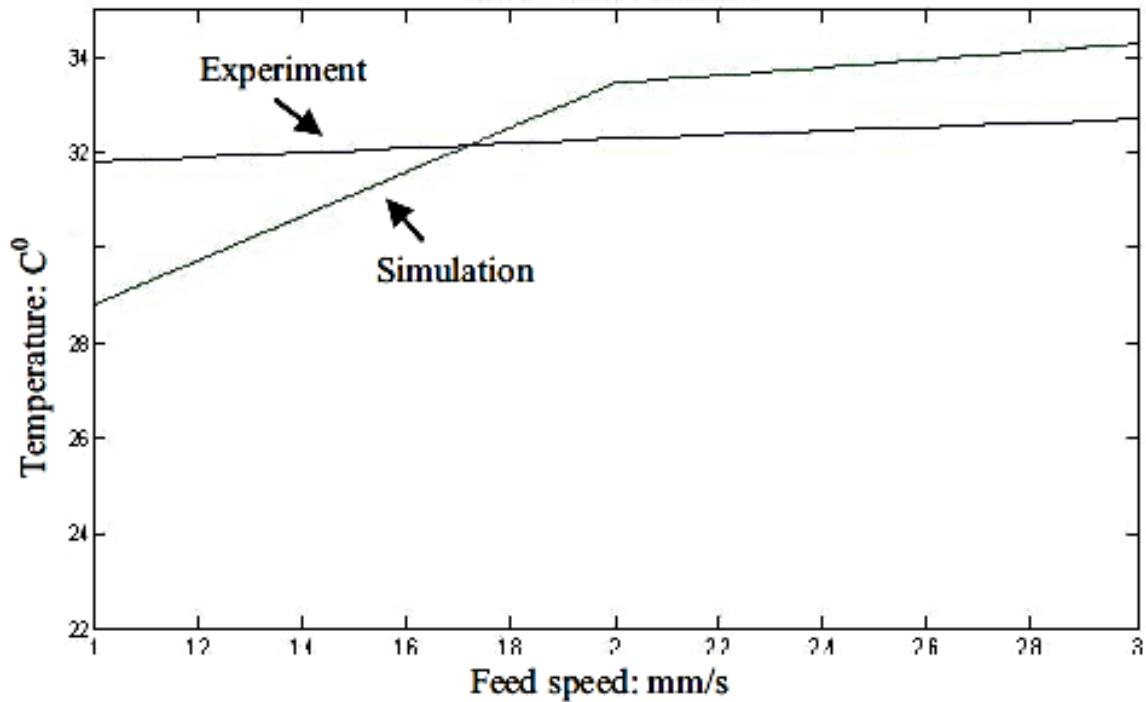
Στην Εικόνα 2.34 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών αποτελεσμάτων για διάφορες ταχύτητες κοπής.



Εικόνα 2.34: Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραμάτων υπό διαφορετικές ταχύτητες κοπής [79]

Από το διάγραμμα της Εικόνας 2.34 φαίνεται ότι η προσομοίωση συμφωνεί με το πείραμα, όσον αφορά το μοτίβο μεταβολής της θερμοκρασίας ως προς την ταχύτητα κοπής, παρόλο που εν γένει οι θερμοκρασίες στο πείραμα ήταν χαμηλότερες από αυτές της προσομοίωσης.

Στη συνέχεια, στην Εικόνα 2.35 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για διαφορετικές προώσεις.



Εικόνα 2.35: Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραμάτων υπό διαφορετικές προώσεις [79]

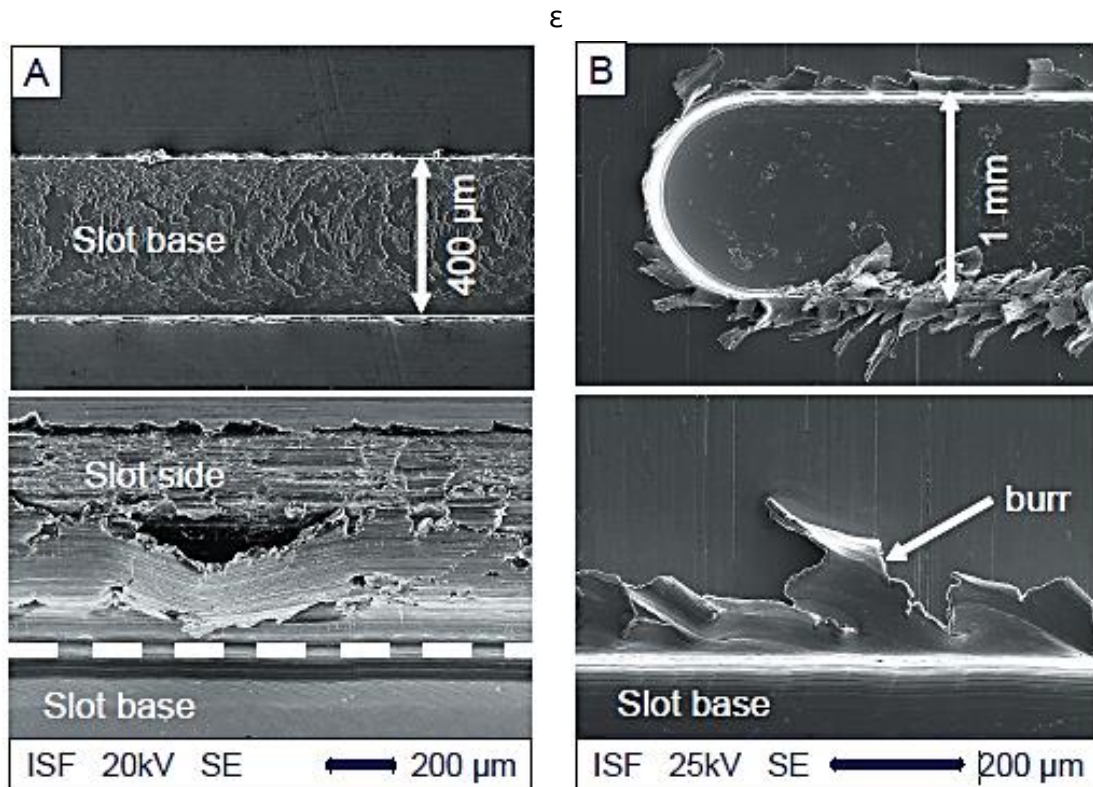
Από το διάγραμμα της Εικόνας 2.35, φαίνεται ότι κατά τη διεξαγωγή του πειράματος δεν παρατηρήθηκε ιδιαίτερη διακύμανση της θερμοκρασίας με την πρόωση, σε όλο το εύρος μεταβολής της, ενώ κατά την προσομοίωση παρατηρήθηκε αρχικά αύξηση της θερμοκρασίας κοπής με αύξηση της πρόωσης και στη συνέχεια σχετική σταθεροποίηση.

Κατά συνέπεια για να πραγματοποιηθεί ο βέλτιστος έλεγχος της θερμοκρασίας κοπής, πρέπει να αυξηθεί η ταχύτητα κοπής μέχρι του σημείου όπου η επίδραση της θερμότητας που απομακρύνεται με το απόβλιττο είναι κυρίαρχη, σε σύγκριση με την αύξηση ενέργειας που πραγματοποιείται λόγω της υψηλής ταχύτητας του κοπτικού εργαλείου. [79, 80]

2.5 Ποιότητα επιφάνειας στις μικροκατεργασίες

Τα πιο κοινά προβλήματα των συμβατικών κατεργασιών, όπως προεξοχές από την επιφάνεια, ελλειπές φινιρίσμα των άκρων και εν γένει απόβλιττα (γρέζια), εμφανίζονται και στις μικροκατεργασίες. Μερικά από αυτά τα

προβλήματα μπορούν να αποφευχθούν με μεταγενέστερη επεξεργασία ή βελτιστοποίηση της διαδικασίας. Σε πολλές περιπτώσεις, ειδικά στις μικροκατεργασίες, δεν επιτρέπουν τη χρησιμοποίηση λύσεων των μακροκατεργασιών, λόγω εγγενών χαρακτηριστικών του υλικού ή περιορισμών εξαιτίας της γεωμετρίας του εξαρτήματος. Η Εικόνα 2.36 δείχνει τη δημιουργία προεξοχών ύστερα από μικροφρεζάρισμα.



Εικόνα 2.36: Τυπικές επιφανειακές προεξοχές ύστερα από μικροφρεζάρισμα (υλικό κατεργασίας: κράμα NiTi με μνήμη σχήματος) [89]

Στη μικροκλίμακα, οι ιδιότητες του υλικού γίνονται ανομοιογενείς και έτσι η διακύμανση στη σκληρότητα του υλικού προκαλεί δόνηση στο κοπτικό εργαλείο. Η επίδραση είναι ιδιαίτερως σημαντική ειδικά σε χαμηλές προώσεις και ταχύτητες κοπής και οδηγεί σε ανομοιόμορφη τραχύτητα επιφάνειας.

Το υλικό κατεργασίας NiTi χρησιμοποιείται εκτενώς ιατρικές εφαρμογές, όπως χειρουργικά εμφυτεύματα, με το μικροφρεζάρισμα να είναι μια από τις κύριες τεχνικές κατασκευής τους. Το υλικό αυτό είναι ιδιαίτερως όλκιμο και εύκολο σε κατεργασία, μιας και σκληραίνει, προκαλώντας υψηλή δημιουργία και προσκόλληση αποβλίττου. Επιπρόσθετα, η υψηλή

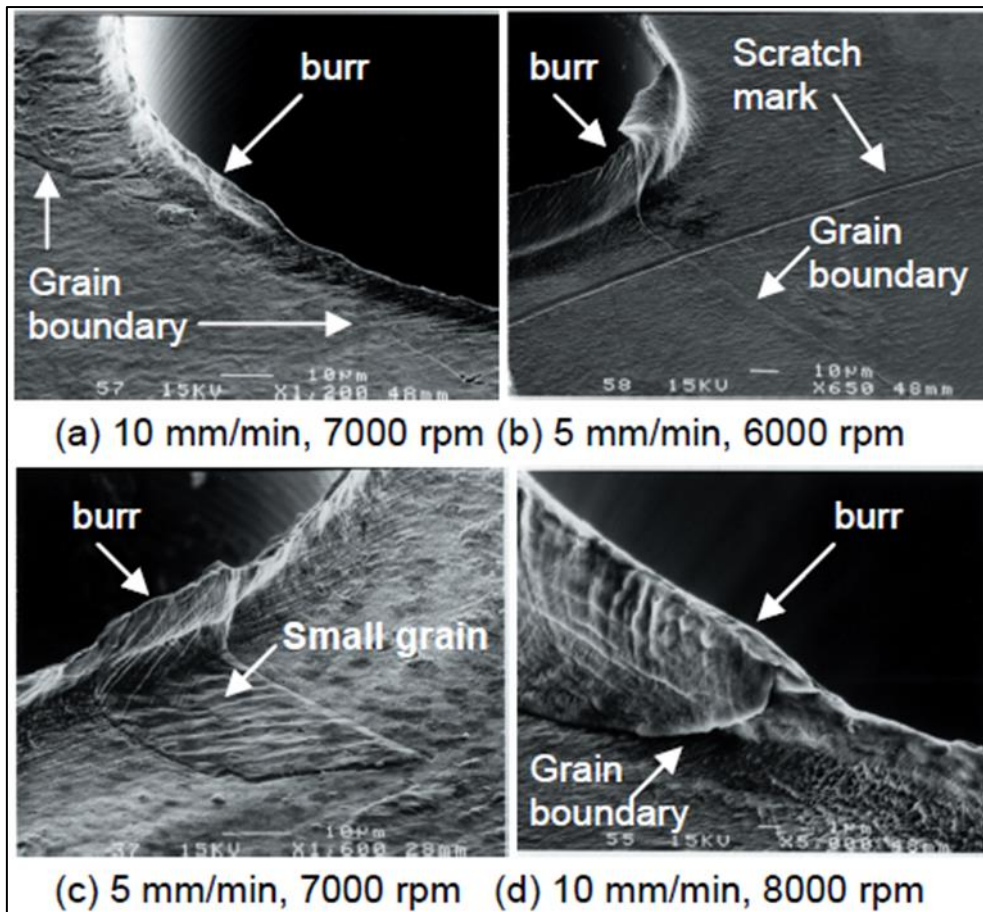
ολκιμότητα προκαλεί ανεπιθύμητη δημιουργία αποβλίττου. Στη μικροκλίμακα, αυτά τα απόβλιττα εμπλέκονται με αρνητικές συνέπειες, οδηγώντας σε κακή ποιότητα επιφάνειας των φινιρισμένων εξαρτημάτων. [89]

Οι Lee και Dornfeld [97] διεξήγαγαν φρεζάρισμα μικροαυλακώσεων σε αλουμίνιο και χαλκό και βρήκαν διάφορους τύπους σχηματιζόμενων αποβλίττων ανάλογα την τοποθεσία και τη γεωμετρία του υλικού κατεργασίας. Από τα πειράματα, προέκυψε ότι τα απόβλιττα έχουν παρόμοια σχήματα όπως στις μακροκατεργασίες, ενώ σχετίζονται και οι μηχανισμοί δημιουργίας και οι συνθήκες κοπής τους.

Οι Bissacco et al. [90] βρήκαν ότι τα επιφανειακά απόβλιττα είναι σχετικά μεγαλύτερα στο μικροφρεζάρισμα, λόγω επίδρασης κλίμακας. Όταν ο λόγος του βάθους κοπής προς την ακτίνα καμπυλότητας είναι μικρός, η υψηλή διαξονική θλιπτική τάση ωθεί το υλικό προς την ελεύθερη επιφάνεια, παράγοντας μεγάλα επιφανειακά απόβλιττα.

Από την άλλη πλευρά, οι Sugawara και Inagaki [99] διερεύνησαν την επίδραση της διαμέτρου του δραπάνου και της κρυσταλλικής δομής στη δημιουργία αποβλίττου κατά τη μικροδιάτρηση. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποίησαν μονοκρυσταλλικό και πολυκρυσταλλικό σίδηρο με πάχος 0.06 και 2.5 mm και δράπανο υψηλής ταχύτητας με διαμέτρους από 0.06 έως 2.5 mm. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι το μέγεθος του αποβλίττου μειώνεται και η κοπτική ικανότητα αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθος του δραπάνου.

Οι Min et al. [98] βρήκαν ότι ο προσανατολισμός των κόκκων επηρεάζει τη δημιουργία αποβλίττου κατά τη μικροδιάτρηση πολυκρυσταλλικού χαλκού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.37. Ένα μονοκρυσταλλικό υλικό μπορεί να εμφανίσει μηχανισμό κοπής όλκιμου υλικού σε έναν κόκκο, και μηχανισμό κοπής ψαθυρού υλικού σε έναν άλλο κόκκο, καταδεικνύοντας ότι ευνοϊκοί και μη ευνοϊκοί προσανατολισμοί κοπής για ποιοτική επιφάνεια και ακμή υπάρχουν, ως συνάρτηση του κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού.



Εικόνα 2.37: Δημιουργία αποβλίττου κατά τη μικροδιάτρηση (διάμετρος 250 μm), (a) απόβλιττο εντός των ορίων των κόκκων (b) απόβλιττο κατά μήκος των ορίων των κόκκων (c) απόβλιττο πάνω σε ένα μικρό κόκκο (d) όρια κόκκων τα οποία ακολουθούν την τοπολογία του αποβλίττου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Υλικά κοπτικών εργαλείων

3.1 Εισαγωγή

Κοπτικό εργαλείο ονομάζεται το μέσο, το οποίο χρησιμοποιείται για να απομακρύνει το ανεπιθύμητο υλικό από ένα τεμάχιο. Είναι βασικό και απαραίτητο συστατικό για την διεξαγωγή της κατεργασίας.

Στην παραγωγή κοπτικών εργαλείων, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν δύο παράγοντες: υλικό και η γεωμετρία του. Στις μέρες μας πληθώρα υλικών, όπως οι ανθρακούχοι χάλυβες, οι ταχυχάλυβες, τα σκληρομέταλλα, τα κεραμικά, ο κυβικός βοριονιτρίτης και το διαμάντι, χρησιμοποιούνται ως κοπτικά εργαλεία στη βιομηχανία. Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι υπάρχουν διαφορές μεταξύ των διαφόρων υλικών και η κατάλληλη εφαρμογή είναι διαφορετική για κάθε τύπο υλικού.

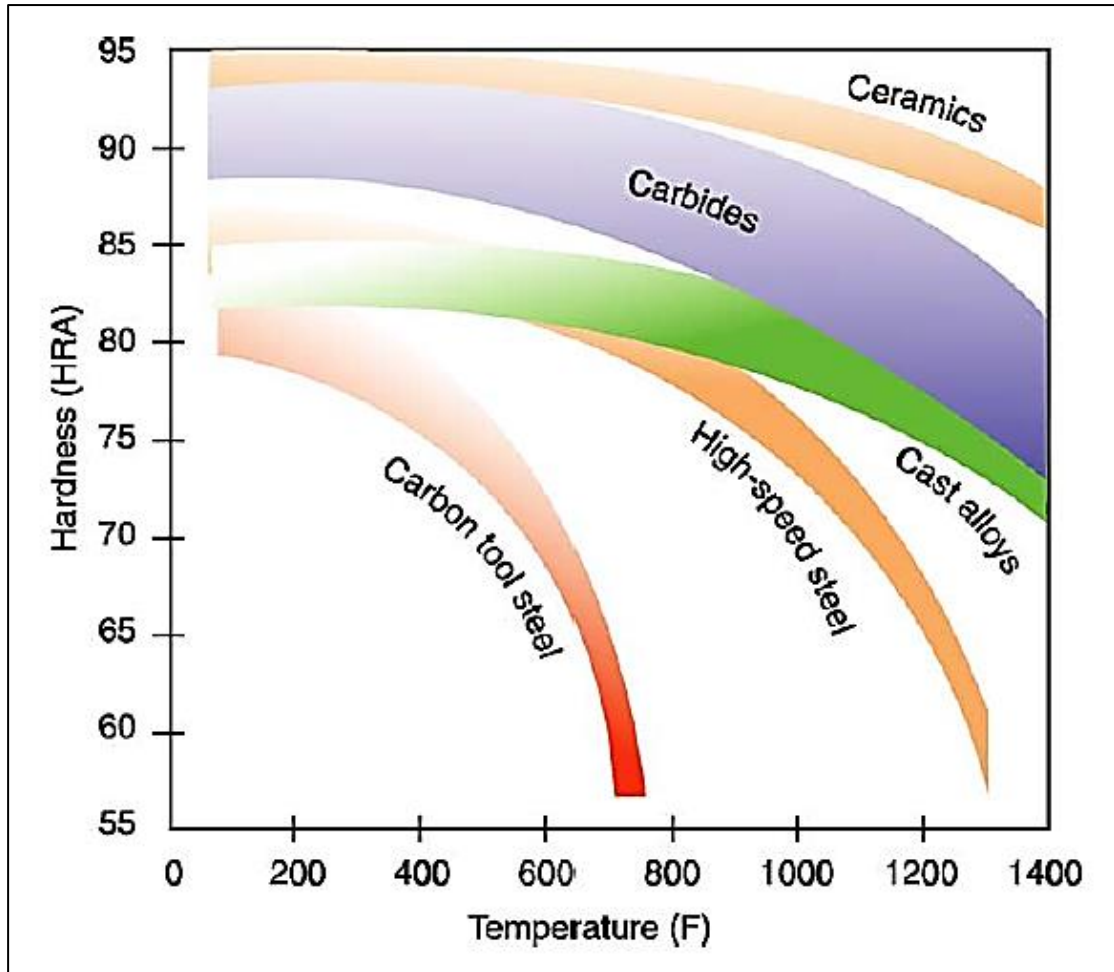
Ένα κοπτικό εργαλείο πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Σκληρότητα: Το υλικό του εργαλείου πρέπει να είναι σκληρότερο από το υλικό του τεμαχίου. Όσο μεγαλύτερη είναι η σκληρότητα του εργαλείου, τόσο ευκολότερο είναι να διεισδύσει στο τεμάχιο. Η σκληρότητα του εργαλείου συνδέεται επίσης και με άλλους παράγοντες, όπως η φθορά.
- Θερμή σκληρότητα: Είναι η ικανότητα του κοπτικού εργαλείου να διατηρεί τη σκληρότητα και την αντοχή του σε αυξημένες θερμοκρασίες. Η ιδιότητα αυτή είναι σημαντική κυρίως όταν το εργαλείο χρησιμοποιείται σε υψηλές ταχύτητες κοπής, ώστε να αυξηθεί η παραγωγικότητα
- Αντοχή: Το εργαλείο πρέπει να έχει επαρκή αντοχή, ώστε να αντέχει στα κρουστικά φορτία που εμφανίζονται κατά την έναρξη της κοπής ή όταν το εργαλείο συναντά ατέλειες στο κατεργαζόμενο υλικό και πρέπει να αντιμετωπίσει τη διακύμανση των δυνάμεων. Η αντοχή είναι απαραίτητη, ώστε το εργαλείο να μην κάνει ρωγμές, ιδίως κατά τη διάρκεια της λειτουργίας διακοπτόμενης κοπής.

*ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΑΚΡΟΚΟΣΜΟ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΟΣΜΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ
ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΤΟΥΣ*

- Αντίσταση στη φθορά: Οι διεπιφάνειες εργαλείου-αποβλίττου και αποβλίττου-τεμαχίου εκτίθενται σε συνθήκες, οι οποίες ευνοούν τη φθορά λόγω προσκόλλησης ή απόξεσης. Η αντίσταση στη φθορά αφορά στη διατήρηση αποδεκτής διάρκειας ζωής, προτού χρειαστεί η αντικατάσταση του εργαλείου. [1]
- Χαμηλή τριβή: Ο συντελεστής τριβής μεταξύ του εργαλείου και του αποβλίττου πρέπει να είναι χαμηλός. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται χαμηλότερος ρυθμός φθοράς και καλύτερη ροή του αποβλίττου.
- Θερμικά χαρακτηριστικά: Λόγω του ότι παράγεται μεγάλο ποσό θερμότητας στη ζώνη κοπής, το υλικό του κοπτικού εργαλείου πρέπει να έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, ώστε να αποβάλει τη θερμότητα αυτή στο συντομότερο δυνατό χρόνο. Διαφορετικά η θερμοκρασία του εργαλείου αυξάνεται, πράγμα το οποίο μειώνει τη διάρκεια ζωής του.
- Το υλικό του κοπτικού εργαλείου πρέπει να είναι χημικά αδρανές ως προς το υλικό κατεργασίας και το υγρό κοπής

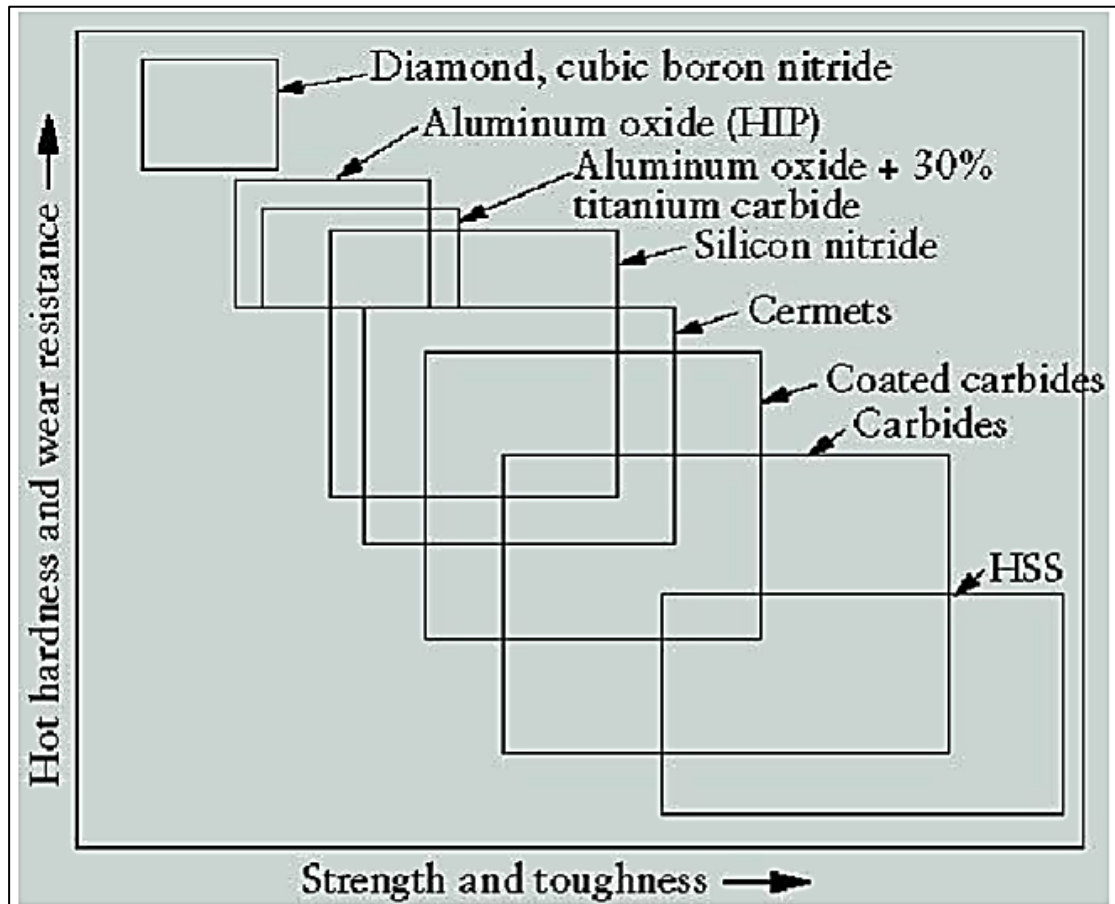
Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα, το οποίο παρουσιάζει τη μεταβολή της σκληρότητας των βασικών κατηγοριών υλικών κοπτικών εργαλείων, οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια, ως προς τη θερμοκρασία.



Εικόνα 3.1: Σκληρότητα του υλικού του κοπτικού εργαλείου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [16]

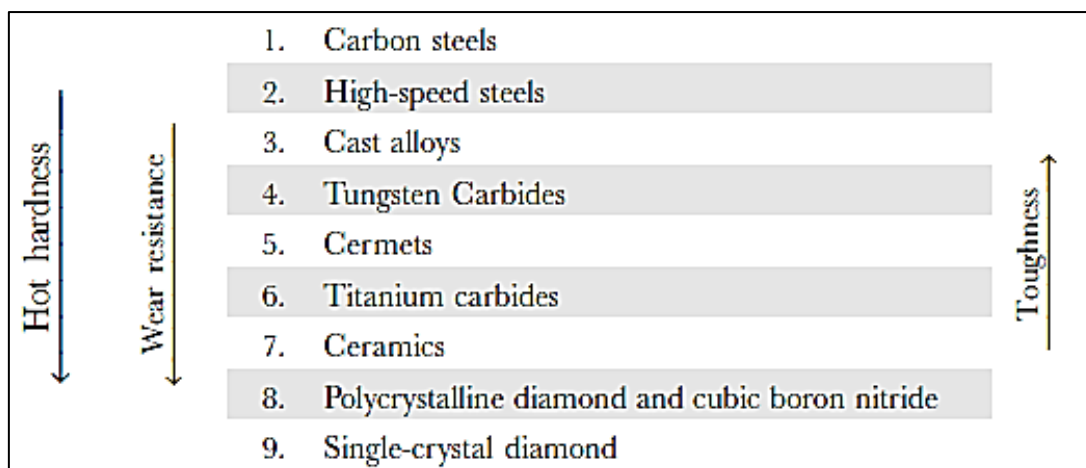
Είναι εμφανές ότι η σκληρότητα των κοπτικών εργαλείων μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας (θερμή σκληρότητα), και ανάλογα με το υλικό η μείωση αυτή είναι πιο ομαλή (π.χ. κεραμικά) ή πιο απότομη (π.χ. ταχυχάλυβας). Το εύρος που παρουσιάζεται σε κάθε κατηγορία υλικών οφείλεται στην ποικιλία που μπορεί να υπάρχει στη σύσταση του υλικού και στις διαθέσιμες επεξεργασίες σε κάθε κατηγορία, πράγμα το οποίο οδηγεί σε ορισμένες περιπτώσεις σε αλληλοεπικάλυψη των κατηγοριών.

Όμως είναι σαφές ότι οι βασικές απαιτήσεις των κοπτικών εργαλείων είναι σε ορισμένες περιπτώσεις αντικρουόμενες και κατά συνέπεια δεν υπάρχει υλικό που να ικανοποιεί όλες τις παραπάνω απαιτήσεις. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη μιας μεγάλης ποικιλίας υλικών κοπτικών εργαλείων. Μια σύγκριση μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών που θα εξεταστούν στη συνέχεια στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Εύρος ιδιοτήτων διαφόρων ομάδων κοπτικών εργαλείων [33]

Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η αντοχή των υλικών μειώνεται η θερμή σκληρότητα και η αντίσταση στη φθορά και αντίστροφα. Έτσι, υλικά με μεγάλη θερμή σκληρότητα και αντίσταση στη φθορά, όπως το διαμάντι και ο κυβικός βοριοιτρίτης, παρουσιάζουν χαμηλή σκληρότητα και αντοχή. Το ίδιο διάγραμμα, με μια ελαφρώς διαφορετική κατηγοριοποίηση παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3. [1, 2, 16]



Εικόνα 3.3: Σύγκριση μεταξύ των βασικών κατηγοριών υλικών κοπτικών εργαλείων [33]

Αναλυτικότερα οι ιδιότητες των υλικών αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Ιδιότητες υλικών κοπτικών εργαλείων [1]

Property	High-speed steel	Cast alloys	Tungsten carbides	Titanium carbide	Ceramics	Cubic boron nitride	Single-crystal diamond
Hardness	83–86 HRA	82–84 HRA	90–95 HRA	91–93 HRA	91–95 HRA	4000–5000 HK	7000–8000 HK
Compressive strength, MPa	4100–4500	1500–2300	4100–5850	3100–3850	2750–4500	6900	6900
Transverse rupture strength, MPa	2400–4800	1380–2050	1050–2600	1380–1900	345–950	700	1350
Impact strength, J	1.35–8	0.34–1.25	0.34–1.35	0.79–1.24	< 0.1	< 0.5	< 0.2
Modulus of elasticity, GPa	200	–	520–690	310–450	310–410	850	820–1050
Density, kg/m ³	8600	8000–8700	10,000–15,000	5500–5800	4000–4500	3500	3500
Volume of hard phase (%)	7–15	10–20	70–90	–	100	95	95
Melting of decomposition temperature, °C	1300	–	1400	1400	2000	1300	700
Thermal conductivity, W/mK	30–50	–	42–125	17	29	13	500–2000
Coefficient of thermal expansion, $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	12	–	4–6.5	7.5–9	6–8.5	4.8	1.5–4.8

3.2 Χάλυβας, ταχυχάλυβας και χυτά κράματα

Τα εργαλεία από απλό χάλυβα είναι τα παλαιότερα εργαλεία. Αποτελούνται από περίπου 1.05% άνθρακα. Το υψηλό αυτό περιεχόμενο σε άνθρακα προσδίδει σκληρότητα στο χάλυβα, προσφέροντας υψηλότερη αντίσταση έναντι της αποξεστικής φθοράς. Το συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιήθηκε στις κοπές για πολλά χρόνια, πλέον όμως χρησιμοποιείται σπάνια λόγω της γρήγορης υπερθέρμανσής του σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Η εφαρμογή του πλέον περιορίζεται σε εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας.

Η ανάγκη για υλικά εργαλείων, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να αντέχουν σε υψηλές ταχύτητες και θερμοκρασίες, οδήγησαν στην ανάπτυξη των ταχυχάλυβων (HSS). Τα εργαλεία από ταχυχάλυβα διαφέρουν σημαντικά από τα εργαλεία από απλό χάλυβα, λόγω της προσθήκης κραματικών στοιχείων, τα οποία τα κάνουν ανθεκτικά στη θερμότητα. Μερικά από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα στοιχεία είναι το μαγγάνιο, το χρώμιο, το βολφράμιο, το βανάδιο, το μολυβδαίνιο, το κοβάλτιο και το νιόβιο. Παρόλο που το κάθε στοιχείο εισάγει κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όλα τους βοηθούν εν γένει στην ικανότητα σκλήρυνσης, στην αντίσταση στη θερμότητα και στην αποξεστική φθορά, καθώς και στην αντοχή του εργαλείου ταχυχάλυβα. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτρέπουν υψηλότερες ταχύτητες και καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τον απλό χάλυβα.

Οι πιο κοινοί ταχυχάλυβες που χρησιμοποιούνται ως κοπτικά εργαλεία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τους ταχυχάλυβες βολφραμίου (τύπος T) και τους ταχυχάλυβες μολυβδαινίου (τύπος M). Παρόλο που παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα, η κάθε κατηγορία εξυπηρετεί συγκεκριμένους σκοπούς. Ένα σημαντικό σημείο είναι το γεγονός ότι τα στοιχεία αυτά δεν είναι σε αφθονία και η χρήση τους εκτοξεύει το κόστος. Ο τύπος M έχει καλύτερη αντιτριβική συμπεριφορά από τον τύπο T, μικρότερη παραμόρφωση σε θερμικές κατεργασίες και είναι φθηνότερος. Έτσι καλύπτει πάνω από 80% της παραγωγής ταχυχαλύβων. Ταχυχάλυβες κατασκευάζονται με σύντηξη και για καλύτερη ομοιογένεια με κονιομεταλλουργία. Η πλειοψηφία των συμβατικών ταχυχαλύβων εγχύεται σε μια ράβδο, θερμή ή ψυχρή, και κατεργάζεται στην επιθυμητή μορφή. Για την κατασκευή κονιοποιημένων μετάλλων χρησιμοποιούνται τα ίδια στοιχεία, συμπιέζονται σε μια μήτρα υπό εξαιρετικά μεγάλη πίεση και πυροσυσσωματώνονται σε έναν ατμοσφαιρικά ελεγχόμενο κλίβανο.



Εικόνα 3.4: Κοπτικά εργαλεία από ταχυχάλυβα [18]

Στην προσπάθεια επέκτασης της διάρκειας ζωής των ταχυχαλύβων, μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας και ελέγχου των υπόλοιπων παραγόντων που επηρεάζουν τις συνθήκες λειτουργίας και το κόστος, έχουν αναπτυχθεί διάφορες επιφανειακές επεξεργασίες. Μερικές από αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί για χρόνια και έχει αποδειχτεί ότι έχουν θετική συνεισφορά. Για παράδειγμα, η επίστρωση καρβιδίου του τιτανίου, η οποία χρησιμοποιείται εδώ και χρόνια στους τροχούς λειτουργεί ως πρόληψη κατά της συσσώρευσης στο εργαλείο. Μια από τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στις επιστρώσεις ταχυχαλύβων είναι η χρήση νιτρικού τιτανίου μέσω της μεθόδου φυσικής απόθεσης ατμού (PVD). Μια μονάδα φυσικής εναπόθεσης ατμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.5. Το νιτρικό τιτάνιο αποτίθεται στην επιφάνεια του εργαλείου σε έναν από τους διαφορετικούς τύπους κλιβάνων σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, πράγμα το οποίο επηρεάζει τη θερμική

επεξεργασία (σκληρότητα) του εργαλείου, στο οποίο γίνεται η επικάλυψη. Η επικάλυψη αυτή επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του εργαλείου σημαντικά και επιτρέπει στο εργαλείο να χρησιμοποιείται σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας. Η διάρκεια ζωής του εργαλείου μπορεί να επεκταθεί ως τρεις φορές ή οι ταχύτητες κατεργασίας μπορούν να αυξηθούν ως 50%. Επικάλυψη TiN σε ταχυχάλυβες τους προσδίδει χαρακτηριστικό κίτρινο-χρυσό χρώμα.



Εικόνα 3.5: Μονάδα φυσικής εναπόθεσης ατμών [35]

Η χρήση κραματικών στοιχείων σε ταχυχάλυβες, ιδίως του κοβαλτίου, του χρωμίου και του βολφραμίου, βελτίωσε σημαντικά τις ιδιότητες κοπής, σε σημείο που οι ερευνητές μεταλλουργοί δημιούργησαν τα *χυτά κράματα*, μια οικογένεια τέτοιων υλικών χωρίς σίδηρο. Μια τυπική σύσταση ενός υλικού εργαλείου αυτής της κατηγορίας είναι 45% κοβάλτιο, 32% χρώμιο, 21% βολφράμιο και 2% άνθρακας. Ο σκοπός αυτής της κραμάτωσης είναι η δημιουργία ενός κοπτικού εργαλείου με θερμή σκληρότητα μεγαλύτερη από αυτή των ταχυχαλύβων. Όταν χρησιμοποιούνται εργαλεία χυτών κραμάτων, η ευθραυστότητά τους πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και πρέπει να παρέχεται πάντα επαρκής υποστήριξη. Τα χυτά κράματα παρέχουν

υψηλή αποξεστική αντίσταση και είναι κατάλληλα για τη διακοπτόμενη κοπή υλικών ή υλικών με σκληρά εγκλείσματα. [17, 35]

3.3 Σκληρομέταλλα

Το καθαρό βολφράμιο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του βασικού εργαλείου σκληρομετάλλου, λόγω του ότι είναι εξαιρετικά σκληρό και προσφέρει μεγάλη αντίσταση έναντι της αποξεστικής φθοράς. Τα πιο συνήθη κραματικά υλικά που προστίθενται στο βασικό υλικό βολφραμίου/κοβαλτίου είναι το καρβίδιο του τανταλίου και το καρβίδιο του τιτανίου.

Τα σκληρομέταλλα αποτελούνται από καρβίδια και ένα συνδετικό υλικό. Οι τρεις βασικές κατηγορίες σκληρομετάλλων είναι:

- το καρβίδιο του βολφραμίου με κοβάλτιο ως συνδετικό
- το καρβίδιο του τιτανίου με συνδετικό νικέλιο και μολυβδαίνιο
- επικαλυμμένα καρβίδια με καρβίδιο του τιτανίου, νιτρίδιο του τιτανίου και αλούμινα

Το καρβίδιο του βολφραμίου ανακαλύφθηκε σε μια προσπάθεια δημιουργίας ενός τεχνητού διαμαντιού. Αρχικά, τα σκληρομέταλλα αποτελούνταν από το βασικό σύστημα καρβιδίου του βολφραμίου με κοβάλτιο ως συνδετικό. Τα καρβίδια αυτά είχαν εξαιρετική επίδοση στην κατεργασία του χυτού σιδήρου, των μη σιδηρούχων και μη μεταλλικών υλικών, αλλά είχαν απογοητευτική επίδοση στην κατεργασία του χάλυβα.

Οι περισσότερες από τις εξελίξεις που ακολούθησαν αποτελούν τροποποιήσεις της αρχικής πατέντας, κυρίως μέσω της αντικατάστασης μέρους ή όλων των καρβιδίων βολφραμίου με άλλα καρβίδια, ειδικά καρβίδια του τιτανίου και/ή καρβίδιο του τανταλίου. Το κύριο πλεονέκτημά τους έναντι των ταχυχάλυβων είναι η ικανότητά τους να λειτουργούν σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής, περίπου 3-5 φορές ταχύτερα. Τα σκληρομέταλλα έχουν αντικαταστήσει τους ταχυχάλυβες σε μεγάλο βαθμό σε πολλές κατεργασίες και κατέχουν ποσοστό πάνω από το 50% της παγκόσμιας παρασκευής κοπτικών εργαλείων. Το ποσοστό των

*ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΑΚΡΟΚΟΣΜΟ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΟΣΜΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ
ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΤΟΥΣ*

ταχυχάλυβων ανέρχεται στο 40%, ενώ το υπόλοιπο 10% μοιράζονται όλα τα υπόλοιπα υλικά.

Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη των σύγχρονων πολυκαρβιδικών υλικών κοπτικών εργαλείων, επιτρέποντας την κατεργασία υψηλής ταχύτητας του χάλυβα. Ένα νέο φαινόμενο αποτέλεσε η δημιουργία των επιστοιχειωμένων καρβιδίων και πάλι με σκοπό την αύξηση της ταχύτητας της κατεργασίας. Οι θερμικές κατεργασίες των προηγούμενων υλικών κοπτικών εργαλείων, εξαρτώνται σημαντικά από τις θερμικές ιδιότητες, ενώ με τη σειρά τους, οι ιδιότητες αυτές μπορούν να καταστραφούν με περαιτέρω θερμική κατεργασία. Σε υψηλές ταχύτητες και κατά συνέπεια υψηλές θερμοκρασίες, αυτά τα προϊόντα μεταλλουργίας αστοχούν. Στα επιστοιχειωμένα καρβίδια όμως ισχύουν διαφορετικές συνθήκες. Η σκληρότητα του καρβιδίου είναι μεγαλύτερη από τη σκληρότητα των περισσότερων υλικών εργαλείων σε θερμοκρασία δωματίου, και το καρβίδιο έχει τη δυνατότητα να διατηρεί τη σκληρότητά του σε υψηλές θερμοκρασίες σε μεγαλύτερο βαθμό. Με τον τρόπο αυτό οι υψηλές ταχύτητες μπορούν να υποστηριχθούν ικανοποιητικά. [24, 35]



Εικόνα 3.6: Κοπτικά εργαλεία από καρβίδιο του βολφραμίου [35]

3.3.1 Κατασκευή προϊόντων καρβιδίου

Ο όρος «καρβίδιο του βολφραμίου» περιγράφει μια περιεκτική οικογένεια σκληρών καρβιδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται για εργαλεία κοπής μετάλλων, μήτρες διαφόρων τύπων και φθαρτά μέρη. Γενικά, τα υλικά αυτά συντίθενται από καρβίδια του βολφραμίου, του τιτανίου και του τανταλίου, ή κάποιο συνδυασμό τους, πυροσυσσωματώνονται ή επικαλύπτονται σε μια συνδετική μήτρα, συνήθως από κοβάλτιο.

Ανάμιξη. Η πρώτη διεργασία μετά τη μετατροπή του βολφραμίου σε σκόνη μετάλλου βολφραμίου είναι η άλεση του βολφραμίου και του άνθρακα πριν από τη διεργασία της καρβιδοποίησης. 94 μέρη κατά βάρος βολφραμίου και 6 μέρη κατά βάρος άνθρακα σε μορφή αιθάλης, αναμιγνύονται σε ένα περιστρεφόμενο αναμείκτη ή ένα μύλο σφαιριδίων. Η διαδικασία αυτή πρέπει να πραγματοποιηθεί υπό εξαιρετικά ελεγχόμενες συνθήκες, ώστε να διασφαλιστεί η βέλτιστη διασπορά του άνθρακα εντός του βολφραμίου. Ο εξοπλισμός ανάμιξης καρβιδίων ονομάζεται μύλος σφαιριδίων.

Για να επιτευχθεί η απαραίτητη αντοχή, προστίθεται ένα συνδετικό μέσο, συνήθως το κοβάλτιο σε μορφή σκόνης, στο βολφράμιο και στη συνέχεια τα δύο αυτά συστατικά αλέθονται για αρκετές μέρες, ώστε να σχηματιστεί ένα ισχυρά συνδεδεμένο μίγμα. Για να παραχθεί ένα ομογενοποιημένο προϊόν πρέπει να εφαρμόζεται προσεκτικός έλεγχος των συνθηκών, συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου. Η αναμειγμένη κόνη καρβιδίου του βολφραμίου φαίνεται στην Εικόνα 3.7. [21]



Εικόνα 3.7: Αναμειγμένη κόνη καρβιδίου του βολφραμίου [21]

Δημιουργία συμπαγούς μορφής. Η πιο κοινή μέθοδος δημιουργίας συμπαγούς μορφής κόνεως περιλαμβάνει τη χρήση μιας μήτρας, κατασκευασμένη στο σχήμα του επιθυμητού δυναμικού προϊόντος. Το μέγεθος της μήτρας πρέπει να είναι μεγαλύτερο από αυτό του τελικού προϊόντος, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η συστολή που παρατηρείται κατά την τελική λειτουργία της συσσωμάτωσης. Οι μήτρες αυτές είναι ακριβές και κατασκευάζονται συνήθως από καρβίδιο του βολφραμίου. Κατά συνέπεια απαιτείται επαρκές πλήθος τελικών προϊόντων (συμπαγούς μορφής) για να δικαιολογηθεί το κόστος κατασκευής μιας ειδικής μήτρας. Ο εξοπλισμός μετατροπής των καρβιδίων σε συμπαγή μορφή είναι γνωστός και ως πρέσες παστίλιων.

Αν οι ποσότητες δεν είναι μεγάλες, μπορεί να συμπιεστεί ένα μεγαλύτερο κομμάτι, το οποίο στη συνέχεια θα κοπεί σε μικρότερες μονάδες και θα διαμορφωθεί στα κατάλληλα σχήματα. Και στην περίπτωση αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψη η συστολή που λαμβάνει χώρα. Συνήθεις πιέσεις που χρησιμοποιούνται σε λειτουργίες ψυχρής συμπίεσης είναι στην περιοχή των 30.000 psi.

Μια δεύτερη μέθοδος συμπίεσης είναι η θερμή συμπίεση της κόνεως σε μήτρες γραφίτη στη θερμοκρασία συσσωμάτωσης. Μετά την ψύξη, το τμήμα έχει αποκτήσει πλήρη σκληρότητα.

Μια τρίτη μέθοδος, η οποία χρησιμοποιείται περισσότερο σε μεγαλύτερα κομμάτια, είναι η ισοστατική συμπίεση. Η κόνη τοποθετείται σε ένα κλειστό, ευέλικτο δοχείο, το οποίο στη συνέχεια αναστέλλεται από ένα υγρό, σε ένα κλειστό δοχείο πίεσης. Η πίεση στο υγρό αυξάνεται, μέχρι το σημείο όπου συμπιέζεται η κόνη. Το σύστημα αυτό παρουσιάζει πλεονεκτήματα στη συμπίεση μεγάλων τμημάτων, λόγω του ότι η πίεση που ασκείται στην κόνη λειτουργεί εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις, οδηγώντας σε συμπίεση ομοιόμορφης πυκνότητας.

Πυροσυσσωμάτωση. Η πυροσυσσωμάτωση των συμπαγών μορφών των βολφραμίου- κοβαλτίου πραγματοποιείται με το συνδεδετικό κοβάλτιο σε υγρή φάση. Η συμπαγής μορφή θερμαίνεται σε ατμόσφαιρα υδρογόνου ή κλιβάνους κενού σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 1400 ως 1600 °C, ανάλογα με τη σύσταση. Τόσο ο χρόνος όσο και η θερμοκρασία πρέπει να προσαρμοσθούν κατάλληλα για να επιτευχθεί ο βέλτιστος έλεγχος στις ιδιότητες και τη γεωμετρία. Το συμπαγές υλικό θα συσταλεί κατά 16% περίπου σε γραμμικές διαστάσεις, ή κατά 40% σε όγκο. Το ακριβές ποσό συρρίκνωσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων του μεγέθους των κόκκων της κόνεως και της σύστασης των κόκκων. Ο έλεγχος του μεγέθους και του σχήματος είναι σημαντικός, και λιγότερο προβλέψιμος κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης. Αυτή ισχύει κυρίως για τους κόκκους των επικαλυμμένων καρβιδίων με υψηλότερο περιεχόμενο κοβαλτίου.

Καθώς το κοβάλτιο έχει μικρότερη πυκνότητα από το βολφράμιο, καταλαμβάνει μεγαλύτερο τμήμα του όγκου από την προβλεπόμενη περιεκτικότητα του κόκκου σε κοβάλτιο, και λόγω του ότι το κοβάλτιο αποτελεί πολύ μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας σε υγρή φάση, απαιτείται εξαιρετική προσοχή για να προβλεφθεί με ακρίβεια το μέγεθος και η κατεύθυνση της συρρίκνωσης. [21, 24]

3.3.2 Ταξινόμηση των εργαλείων καρβιδίου

Τα καρβίδια χρησιμοποιούνται σε συμπαγή στρογγυλεμένα εργαλεία με τη μορφή πλακιδίων. Ο κάθε κατασκευαστής προσφέρει μια ποικιλία

σκληρομετάλλων για συγκεκριμένες όμως εφαρμογές. Η κατάλληλη επιλογή μπορεί να διπλασιάσει τη διάρκεια ζωής ή την ταχύτητα κοπής του ίδιου εργαλείου. Οι τύποι που παρουσιάζουν αντοχή σε κραδασμούς χρησιμοποιούνται σε διακοπτόμενες κοπές. Άλλοι σκληρότεροι, χημικά σταθεροί τύποι είναι απαραίτητη για το φινίρισμα του χάλυβα σε υψηλή ταχύτητα. Για την κατεργασία υπερκραμάτων, όπως το Inconel και το Hastelloy, απαιτείται η χρήση εργαλείων με αντοχή στη θερμοκρασία.

Τα καρβίδια χυτοσίδηρου είναι πιο ανθεκτικά στην αποξεστική φθορά. Τα καρβίδια άνθρακα απαιτούν περισσότερη αντίσταση ως προς τη δημιουργία κρατήρων και ως προς τη θερμότητα. Η υψηλή αποξεστικότητα του χυτοσίδηρου κυρίως προκαλεί φθορά στα άκρα του εργαλείου. Στο χάλυβα, η δημιουργία αποβλίττου μεγάλου μήκους, το οποίο ρέει κατά μήκος του εργαλείου σε υψηλές ταχύτητες κοπής, προκαλεί κυρίως σχηματισμό κρατήρων και θερμική παραμόρφωση στο εργαλείο.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του καρβιδίου του τιτανίου είναι ότι μειώνει τη δημιουργία κρατήρων του εργαλείου, μειώνοντας την τάση των αποβλίττων χάλυβα μεγάλου μήκους να διαβρώνουν την επιφάνεια του εργαλείου. Όσον αφορά το καρβίδιο του τανταλίου, η σημαντικότερη συνεισφορά του είναι ότι αυξάνει τη θερμή σκληρότητα του εργαλείου, η οποία με τη σειρά της μειώνει τη θερμική παραμόρφωση.

Η μεταβολή του ποσοστού του συνδετικού κοβαλτίου στο υλικό του εργαλείου τα καρβίδια με τρεις τρόπους. Το κοβάλτιο είναι πολύ πιο ευαίσθητο στη θερμότητα σε σχέση με το καρβίδιο που το περιβάλλει. Είναι επίσης πιο ευαίσθητο στην απόξεση και στην συγκόλληση του αποβλίττου. Κατά συνέπεια όσο μεγαλύτερη είναι η παρουσία του κοβαλτίου, τόσο πιο μαλακό είναι το εργαλείο, κάνοντάς το πιο ευαίσθητο στη θερμική παραμόρφωση, την αποξεστική φθορά και την τήξη του αποβλίττου, το οποίο προκαλεί δημιουργία κρατήρων. Από την άλλη πλευρά, το κοβάλτιο είναι σκληρότερο από το καρβίδιο. Κατά συνέπεια, η μεγαλύτερη ποσότητα κοβαλτίου βελτιώνει την αντοχή του εργαλείου και την αντίστασή του σε ξαφνική κρούση. Η αντοχή ενός εργαλείου καρβιδίου μετράται ως προς την εγκάρσια αντοχή σε θραύση.

Μια διαφορά μεταξύ των κοπτικών εργαλείων της κατηγορίας χυτοσίδηρου και χάλυβα είναι το μέγεθος των κόκκων καρβιδίου. Το μέγεθος των κόκκων καρβιδίου ελέγχεται από τη διαδικασία σφαιρικής άλεσης.

Υπάρχουν ορισμένες εξαιρέσεις, όπως τα καρβίδια μικρόκοκκων, αλλά γενικότερα όσο μικρότεροι είναι οι κόκκοι καρβιδίου, τόσο σκληρότερο είναι το εργαλείο. Αντίθετα, όσο μεγαλύτεροι είναι οι κόκκοι του καρβιδίου, τόσο ανθεκτικότερο είναι το εργαλείο.

Στη μέθοδο κατάταξης ως προς C, οι βαθμοί C-1 ως C-4 είναι για το χυτοσίδηρο και οι βαθμοί C-5 ως C-8 είναι για το χάλυβα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός C σε κάθε ομάδα, τόσο σκληρότερη είναι η κλάση, και όσο μικρότερος είναι ο αριθμός C, τόσο ανθεκτικότερη είναι η κλάση. Οι σκληρότερες κλάσεις χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές φινιρίσματος, ενώ οι ανθεκτικότερες κλάσεις χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές εκχόνδρισης.

Πολλοί κατασκευαστές κατασκευάζουν διαγράμματα, όπου συγκρίνουν τις διάφορες κλάσεις καρβιδίων τους, με αυτά άλλων κατασκευαστών. Τα διαγράμματα αυτά δεν είναι απολύτως ισότιμα, καθώς ο κάθε κατασκευαστής γνωρίζει καλύτερα το δικό του προϊόν και μπορεί να το τοποθετήσει με ακρίβεια στο διάγραμμα. C. Οι διάφοροι έλεγχοι έχουν δείξει ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην επίδοση καρβιδίων της ίδιας κλάσης του συστήματος ταξινόμησης C, λόγω του ότι λανθασμένα έχουν ενταχθεί στην ίδια κλάση.

Είναι σημαντικό να επιλέγεται και να χρησιμοποιείται ο σωστός τύπος καρβιδίου για κάθε εφαρμογή. Οι τύποι των καρβιδίων μπορεί να φαίνονται παρόμοιοι, όμως η διαφορές μεταξύ τους μπορεί να οδηγήσουν στην επιτυχία ή την αποτυχία. [1, 17, 21]

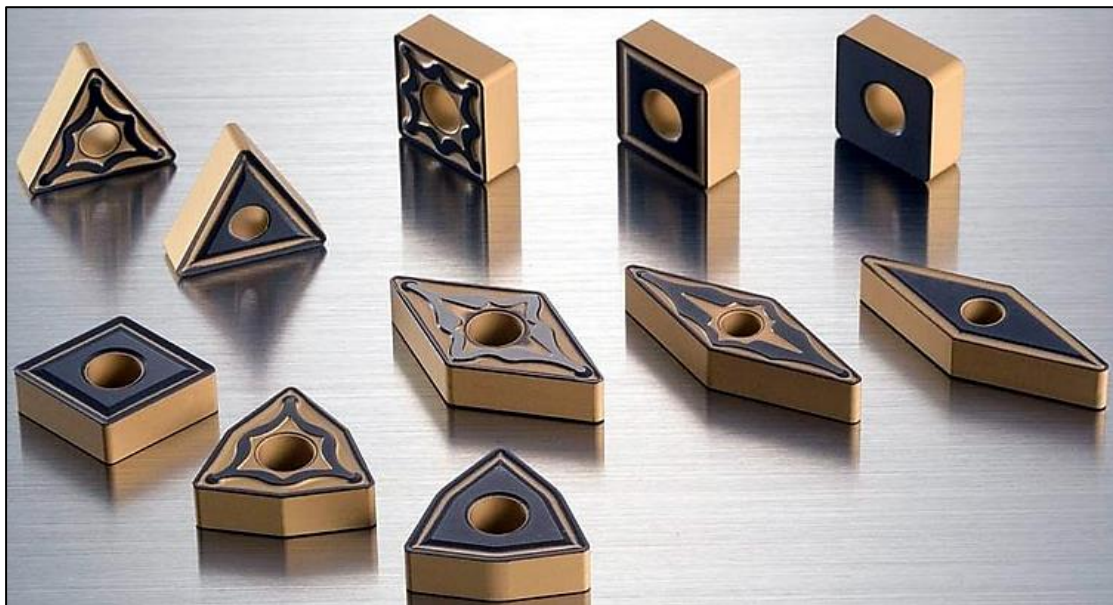
3.3.3 Εργαλεία επικαλυμμένου καρβιδίου

Τα επικαλυμμένα καρβίδια έχουν δημιουργηθεί από τη δεκαετία του 60, αλλά οι δυνατότητές τους δεν είχαν γίνει πλήρως γνωστές ως τα μέσα της δεκαετίας του 70. Τα πρώτα επικαλυμμένα καρβίδια ήταν απλώς τυπικές κλάσεις καρβιδίων, τα οποία είχαν υποστεί μια διαδικασία επένδυσης. Οι κατασκευαστές σιγά σιγά με την εμπειρία τους κατάλαβαν ότι η επένδυση μπορούσε να γίνει τόσο καλή όσο το βασικό καρβίδιο κάτω από την επένδυση (γνωστό ως υπόστρωμα). Γενικά συνίσταται η χρήση επικαλυμμένων καρβιδίων στις περισσότερες εφαρμογές. Σήμερα τα δύο τρίτα των καρβιδίων είναι επικαλυμμένα. Όταν χρησιμοποιηθεί το

κατάλληλο επικαλυμμένο καρβίδιο με την κατάλληλη προετοιμασία άκρων στη σωστή εφαρμογή, μπορεί να ξεπεράσει στην επίδοση οποιοδήποτε μη επικαλυμμένο καρβίδιο.

Ως επικάλυψη χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά, καθένα για συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα πιο συνήθη υλικά επικάλυψης είναι το καρβίδιο του τιτανίου, το νιτρίδιο του τιτανίου, η επένδυση κεραμικού, η επένδυση διαμαντιού και το καρβονιτρίδιο του τιτανίου. Επίσης, χρησιμοποιούνται πολυστρωματικοί συνδυασμοί των υλικών αυτών.

Γενικά η διαδικασία επένδυσης πραγματοποιείται μέσω της χημικής εναπόθεσης ατμών. Το υπόστρωμα τοποθετείται σε έναν περιβαλλοντικά ελεγχόμενο θάλαμο με ανεβασμένη θερμοκρασία. Το υλικό επικάλυψης τοποθετείται στη συνέχεια στο θάλαμο σε μορφή χημικού ατμού. Το υλικό επικάλυψης έλκεται από ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από το υπόστρωμα και αποτίθεται σε αυτό. Απαιτούνται αρκετές ώρες παραμονής στο θάλαμο για να επιτευχθεί πάχος επένδυσης 0.0002 ως 0.0003 in. Μια άλλη διαδικασία είναι η φυσική εναπόθεση ατμών.



Εικόνα 3.8: Εξαρτήματα επικαλυμμένου καρβιδίου για τόννευση χυτοσιδήρου υψηλής ταχύτητας [36]

- *Επικάλυψη καρβιδίου του τιτανίου*

Από όλες τους τύπους επικάλυψης, το καρβίδιο του τιτανίου είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο. Χρησιμοποιείται σε διάφορα υποστρώματα υλικών για την κοπή διαφόρων υλικών υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες. Η επικάλυψη καρβιδίου του τιτανίου επιτρέπει τη χρήση μεγαλύτερων ταχυτήτων κοπής, λόγω της μεγαλύτερης αντίστασης στην αποξεστική φθορά και τη δημιουργία κρατήρων, και της υψηλότερης θερμικής αντίστασης.

- *Επικάλυψη νιτρίδιου του τιτανίου (χρυσό χρώμα)*

Το νιτρίδιο του τιτανίου χρησιμοποιείται σε διαφορετικά υλικά υποστρώματος. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των νιτρίδιων τιτανίου είναι η αντίστασή του ως προς τη δημιουργία κρατήρων. Το νιτρίδιο του τιτανίου προσφέρει επίσης κάποια αυξημένη αντίσταση στην αποξεστική φθορά και σημαντική αύξηση στην θερμική αντίσταση, επιτρέποντας υψηλότερες ταχύτητες κοπής. Το νιτρίδιο του τιτανίου παρουσιάζει επίσης μεγαλύτερη ολισθηρότητα, επιτρέποντας στο απόβλιττο να περάσει από τη διεπιφάνεια κοπής με μικρότερη τριβή. [19, 20]



Εικόνα 3.9: Κοπτικό εργαλείο καρβιδίου με επικάλυψη νιτρικού τιτανίου [22]

- *Κεραμική επικάλυψη (μαύρο χρώμα)*

Λόγω του ότι το οξείδιο του αλουμινίου (κεραμικό) είναι εξαιρετικά σκληρό και ψαθυρό, δεν είναι η καταλληλότερη επικάλυψη για διακοπτόμενη κοπή, βαθμωτή κοπή και κοπή σκληρών σημείων στο τεμάχιο. Αυτό δε σημαίνει ότι δε μπορεί να λειτουργήσει υπό τέτοιες συνθήκες, αλλά ότι είναι πολύ περισσότερο επιρρεπής σε αστοχία λόγω θρυμματισμού. Ακόμα και με τους περιορισμούς αυτούς, το οξείδιο του αλουμινίου έχει μεγάλη συνεισφορά στα επικαλυμμένα καρβίδια. Το οξείδιο του αλουμινίου επιτρέπει πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής σε σχέση με τις υπόλοιπες επικαλύψεις λόγω της εξαιρετικά μεγαλύτερης αντίστασης στην αποξεστική φθορά και της αντίστασής του στη θερμική και χημική αλληλεπίδραση.

- *Επικάλυψη διαμαντιού*

Μια πρόσφατη εξέλιξη αφορά στη χρήση πολυκρυστάλλου διαμαντιού ως επικάλυψη στα κοπτικά εργαλεία καρβιδίου του βολφραμίου. Υπάρχουν προβλήματα όσον αφορά τη συνοχή του υμένα διαμαντιού και των υλικών του υποστρώματος. Οι εισαγωγές επικαλύψεων λεπτών υμένων διαμαντιού μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε με χημική εναπόθεση ατμών, είτε με φυσική εναπόθεση ατμών. Τα εργαλεία με επένδυση διαμαντιού είναι αποτελεσματικά στην κατεργασία αποξεστικών υλικών, όπως τα κράματα αλουμινίου που περιέχουν πυρίτιο, τα υλικά ενισχυμένων ινών και ο γραφίτης. Η βελτίωση στη διάρκεια ζωής του εργαλείου είναι ως και δέκα φορές καλύτερη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες επικαλύψεις.

- *Καρβονιτρίδιο του τιτανίου (μαύρο χρώμα, πολυστρωματική επικάλυψη)*

Το καρβονιτρίδιο του τιτανίου εμφανίζεται συνήθως ως το ενδιάμεσο στρώμα μιας επένδυσης δύο ή τριών φάσεων. Ο ρόλος του καρβονιτρίδιου του τιτανίου είναι της ουδετερότητας, βοηθώντας τα υπόλοιπα στρώματα να συνδεθούν σε μια μορφή sandwich. Αναπτύσσονται επίσης και άλλες πολυστρωματικές επικαλύψεις για να κατεργαστούν αποτελεσματικά τους ανοξειδωτους χάλυβες και τα κράματα αεροδιαστημικής. Οι επικαλύψεις με βάση το χρώμιο, όπως το καρβίδιο του χρωμίου είναι αποτελεσματικές

*ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΑΚΡΟΚΟΣΜΟ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΟΣΜΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ
ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΤΟΥΣ*

στην κατεργασία πιο μαλακών μετάλλων όπως το αλουμίνιο, ο χαλκός και το τιτάνιο.

Τα επικαλυμμένα καρβίδια δεν θα υπερτερούν πάντα των μη επικαλυμμένων, αλλά θα λαμβάνονται πάντα πρώτα υπόψη όταν πρόκειται για την επιλογή εργαλείων, λόγω των πλεονεκτημάτων τους. Αν λάβουμε υπόψη τα πλεονεκτήματα των επικαλυμμένων καρβιδίων, η διαφορά στο κόστος τους είναι μικρή. Λόγω του ότι τα επικαλυμμένα καρβίδια είναι πιο ανθεκτικά στην αποξεστική φθορά, τη δημιουργία κρατήρων και τη θερμότητα, και λόγω του ότι είναι πιο ανθεκτικά στη συσσώρευση του υλικού σε χαμηλότερες ταχύτητες κοπής, η διάρκεια ζωής του εργαλείου επεκτείνεται, μειώνοντας το κόστος αντικατάστασης του εργαλείου. Τα επικαλυμμένα καρβίδια επιτρέπουν τη λειτουργία σε υψηλότερες ταχύτητες, μειώνοντας το κόστος παραγωγής.

Όλα τα επικαλυμμένα καρβίδια έχουν ακονισμένες άκρες, ώστε να εμποδίζεται η συσσώρευση του υλικού επικάλυψης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επικάλυψης. Αυτό συμβαίνει διότι η επένδυση θα οδηγήσει γενικά σε αιχμηρές άκρες. Η ακονισμένη άκρη είναι συνήθως πολύ ελαφριά και στην πραγματικότητα επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του εργαλείου. [19, 20, 21]

Πίνακας 3.2: Χρώμα διαφόρων τύπων επικαλύψεων καρβιδίων [23]

Layer		colour characteristics
ZrN	Zirconium-nitride	brass-colored
TiZrN	Titan zirconium-nitride	brass-colored
ZrCN	Zirconium-carbonitride	gold colours
TiN	Titanium-nitride	gold-yellow
TiCN	Titanium-carbonitride	reddish yellow to violet
CrN	Chromium-nitride	metallic grey
TiC	Titanium-carbide	grey to anthracite
TiCrN	Titanium chromium-nitride	anthracite grey
AlTiN	Aluminiumtitanium-nitride	bluish-violet-black
TiAlN	Titanium aluminum-nitride	reddish-violet

3.4 Κεραμικά και μεταλλοκεραμικά εργαλεία

Το κεραμικό οξείδιο του αργιλίου ως υλικό κοπτικών εργαλείων δημιουργήθηκε πρώτη φορά στη Γερμανία γύρω στο 1940. Παρόλο που η ανάπτυξη των κεραμικών ως κοπτικών εργαλείων ήταν αργή, η εξέλιξη που ακολούθησε από τα μέσα του 1970, έδωσε μεγάλη ώθηση στη χρησιμοποίησή τους. Τα μεταλλοκεραμικά αποτελούν ένα συνδυασμό κεραμικού και καρβιδίου του τιτανίου.

- **Κεραμικά κοπτικά εργαλεία**

Τα κεραμικά είναι μη μεταλλικά υλικά. Είναι τεχνητά προϊόντα, τα οποία παράγονται μέσω πυροσυσσωμάτωσης της αλούμινας σε υψηλή θερμοκρασία (1500-1900 °C), αλλά κάτω από το σημείο τήξης σε πίεση. Για το λόγο αυτό κατατάσσονται σε μια εντελώς διαφορετική κατηγορία από τους ταχυχάλυβες και τα καρβίδια. Η χρήση κεραμικών ως κοπτικά εργαλεία έχει διακριτά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα κεραμικά εργαλεία δε μπορούν να ανταγωνιστούν τα εργαλεία καρβιδίων υψηλών τάξεων. Οι εφαρμογές των κεραμικών κοπτικών εργαλείων είναι περιορισμένες, λόγω της εξαιρετικά μεγάλης ευθραυστότητας. Η εγκάρσια αντοχή σε θραύση (TRS) είναι πολύ χαμηλή. Αυτό σημαίνει ότι θα σπάσουν πιο εύκολα, όταν εκτελούν δύσκολες ή διακοπτόμενες κοπές. Όμως, η αντοχή των κεραμικών στη συμπίεση είναι πολύ υψηλότερη από των ταχυχάλυβων και των σκληρομετάλλων.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κεραμικών υλικών: θερμής συμπίεσης και ψυχρής συμπίεσης. Στα κεραμικά θερμής συμπίεσης, τα οποία είναι συνήθως μαύρα ή γκρι στο χρώμα, οι κόκκοι της αλούμινας συμπιέζονται υπό εξαιρετικά μεγάλη πίεση και πολύ υψηλή θερμοκρασία, ώστε να σχηματίσουν μπιγιέτα. Οι μπιγιέτες στη συνέχεια κόβονται στα μέγεθος του εξαρτήματος. Στα κεραμικά ψυχρής συμπίεσης, τα οποία είναι συνήθως λευκά, οι κόκκοι της αλου αλούμινας συμπιέζονται υπό εξαιρετικά υψηλή πίεση, αλλά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Οι μπιγιέτες στη συνέχεια πυροσυσσωματώνονται, ώστε να επιτευχθεί η σύνδεση. Η διαδικασία αυτή είναι παρόμοια με την παραγωγή καρβιδίων, μόνο που δε χρησιμοποιείται μεταλλικό υλικό ως συνδετικό. Παρόλο που τα κεραμικά θερμής και ψυχρής

συμπίεσης έχουν παρόμοια σκληρότητα, τα κεραμικά ψυχρής συμπίεσης είναι ελαφρώς σκληρότερα. Τα κεραμικά θερμής συμπίεσης έχουν μεγαλύτερη εγκάρσια αντοχή σε θραύση (TRS).

Η ευθραυστότητα, η σχετική σκληρότητα, των κεραμικών υλικών είναι το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους, σε σύγκριση με τους ταχυχάλυβες και τα σκληρομέταλλα. Η κατάλληλη γεωμετρία του εργαλείου και η προετοιμασία των άκρων παίζουν σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή των κεραμικών εργαλείων και βοηθούν στο να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματά τους. Μερικά από τα πλεονεκτήματα των κεραμικών εργαλείων είναι:

- ✓ Μεγάλη αντοχή σε ελαφριές κοπές σε υλικά κατεργασίας μεγάλης σκληρότητας
- ✓ Εξαιρετικά μεγάλη αντοχή στην αποξεστική φθορά και στη δημιουργία κρατήρων
- ✓ Ικανότητα ταχυτήτων πάνων από 2000 SFPM
- ✓ Εξαιρετικά υψηλή θερμή σκληρότητα
- ✓ Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα

Τα κεραμικά δε μπορούν να εφαρμοσθούν σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά μπορούν σε χρησιμοποιηθούν με επιτυχία σε ορισμένες περιπτώσεις. Για να μπορέσουν να εφαρμοσθούν τα κεραμικά υλικά πρέπει το σχήμα του εξαρτήματος, η κατάσταση του υλικού κατεργασίας, η ικανότητα του υλικού κατεργασίας, ο εξοπλισμός και γενικά οι συνθήκες κατεργασίας να είναι σωστές. Η υψηλή στιβαρότητα του εργαλείου κατεργασίας και του εξοπλισμού είναι σημαντική στις εφαρμογές των κεραμικών εργαλείων. [24]

- **Μεταλλοκεραμικά κοπτικά εργαλεία**

Η διαδικασία κατασκευής μεταλλοκεραμικών είναι παρόμοια με τη διαδικασία που χρησιμοποιείται για τα κεραμικά θερμής συμπίεσης. Τα

υλικά , περίπου 70% κεραμικά και 30% καρβίδιο του τιτανίου, συμπιέζονται σε μπιγιέτες υπό εξαιρετικά υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Ύστερα από την πυροσυσσωμάτωση, οι μπιγιέτες κόβονται στα επιθυμητά σχήματα των εργαλείων. Οι λειτουργίες λείανσης για την επίτευξη του τελικού μεγέθους και η προετοιμασία άκρων, ολοκληρώνουν την κατεργασία.

Η αντοχή των μεταλλοκεραμικών είναι μεγαλύτερη από των κεραμικών θερμής συμπίεσης. Κατά συνέπεια, τα μεταλλοκεραμικά αποδίδουν καλύτερα σε διακοπτόμενες κοπές. Όμως, σε σύγκριση με τα στερεά κεραμικά, η παρουσία κατά 30% καρβιδίου του τιτανίου στα μεταλλοκεραμικά μειώνει τη θερμή σκληρότητα και την αντίσταση στην αποξεστική φθορά. Η θερμή σκληρότητα και η αντίσταση στην αποξεστική φθορά των μεταλλοκεραμικών είναι υψηλή σε σύγκριση με τους ταχυχάλυβες και τα σκληρομέταλλα. Λόγω της μεγαλύτερης αντοχής τους, τα μεταλλοκεραμικά είναι διαθέσιμα σε μια μεγάλη ποικιλία γεωμετριών και χρησιμοποιούνται σε υποδοχείς εξαρτημάτων και μεγαλύτερη ποικιλία εφαρμογών.

Η τεχνική της προσθήκης μιας λεπτής πυρίμαχης επικάλυψης στα μεταλλοκεραμικά εργαλεία, έχει χρησιμοποιηθεί επίσης για να βελτιώσει την απόδοση των μεταλλικών κοπτικών εργαλείων. Σε αντίθεση με τα εργαλεία καρβιδίου με επικάλυψη βολφραμίου, δεν οδήγησαν όλοι οι τύποι επικάλυψης σε βελτίωση της απόδοσης. Μερικές από τις πιο κοινές επικαλύψεις είναι οι TiN, TiC, TiCN και Al₂O₃. Οι επικαλύψεις αυτές δεν προσφέρουν μόνο μεγάλη σκληρότητα και εξαιρετική πυριμαχικότητα , αλλά δημιουργούν και μικρότερο συντελεστή τριβής, καλή αντίσταση στην οξείδωση και χημική σταθερότητα, καθώς και βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες. [1, 25]

- **Κεραμικά με βάση το νιτρίδιο του πυριτίου**

Αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 70 και αποτελούνται από νιτρίδιο του πυριτίου με διάφορες προσθήκες αλούμινας, οξειδίου του υτρίου και καρβιδίου του τιτανίου. Τα εργαλεία αυτά έχουν υψηλή αντοχή, θερμή σκληρότητα και καλή αντίσταση σε θερμικό σοκ. [25]

3.5 Εργαλεία από διαμάντι, κυβικό βοριονιτρίτη και ενισχυμένους ινοκρυστάλλους

Τα υλικά που περιγράφονται στην ενότητα αυτή δεν απαντώνται συνήθως σε περιβάλλον βαριάς κατεργασίας μετάλλων. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε αυτόματα συστήματα παραγωγής υψηλής ταχύτητας για ελαφρύ φινιρίσμα ή επιφάνειες ακριβείας. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε τα χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές και των ειδικών αυτών υλικών.

- **Διαμάντι**

Οι δύο τύποι διαμαντιού που χρησιμοποιούνται ως κοπτικά εργαλεία είναι το φυσικό διαμάντι βιομηχανικής ποιότητας και συνθετικά πολυκρυσταλλικά διαμάντια. Λόγω του ότι το διαμάντι είναι καθαρός άνθρακας, έχει χημική συνάφεια με τον άνθρακα των σιδηρούχων μετάλλων. Κατά συνέπεια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε μη-μεταλλικά υλικά.

Κάποια εργαλεία κοπής από διαμάντι είναι κατασκευασμένα μέσω κρυσταλλικής συμπίεσης διαμαντιού (πολλοί μικροί κρύσταλλοι συμπίεσμένοι μαζί), οι οποίοι συνδέονται σε μια βάση καρβιδίου. Αυτά τα κοπτικά εργαλεία από διαμάντι πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο σε κοπές ελαφρού φινιρίσματος επιφανειών ακριβείας. Οι προώσεις πρέπει να είναι πολύ μικρές και οι ταχύτητες είναι συνήθως πάνω από 5000 SFPM. Η στιβαρότητα των εργαλείων κατεργασίας και του εξοπλισμού είναι πολύ κρίσιμη, λόγω της εξαιρετικής σκληρότητας και της ευθραυστότητας του διαμαντιού. [1]

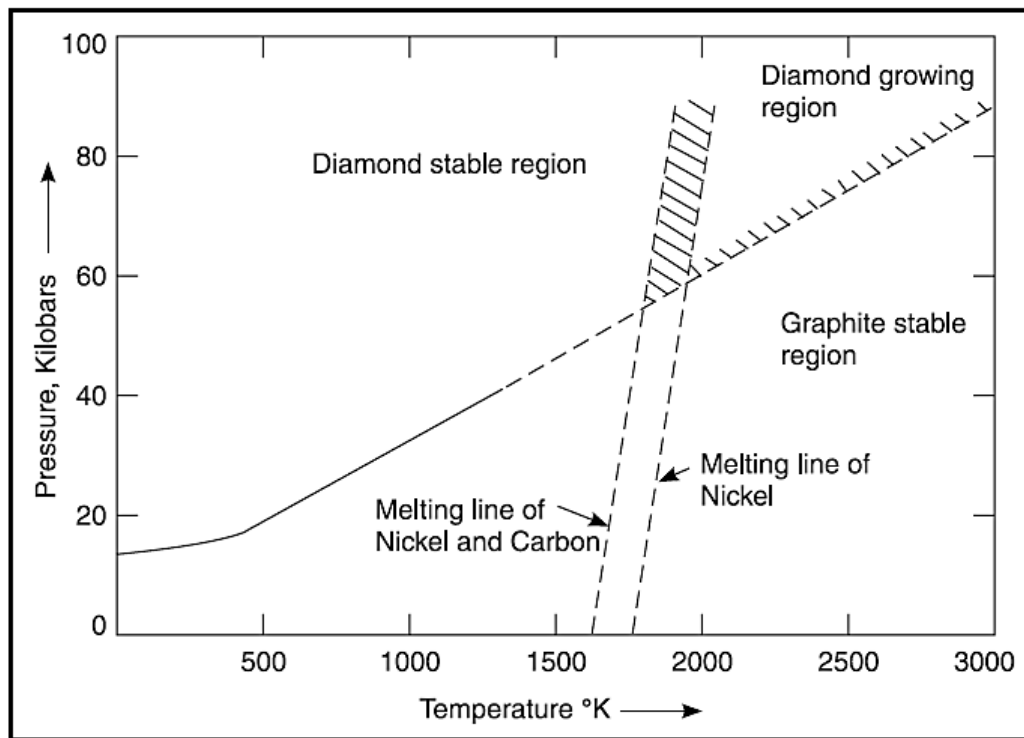
- **Φυσικό Διαμάντι**

Τα φυσικά διαμάντια αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για λείανση πολύ σκληρών μη σιδηρούχων υλικών, γυαλιού και κεραμικών, από το 1890 ενσωματώθηκαν σε πριόνια και από το 1940 υιοθετήθηκαν και σε κοπτικά

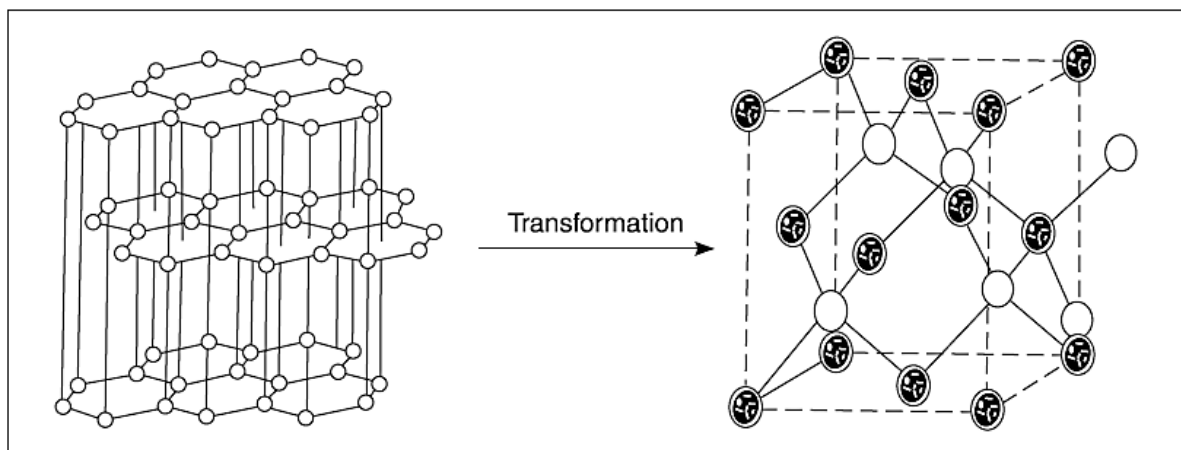
εργαλεία. Το φυσικό διαμάντι αναπτύσσεται αργά σε θερμοκρασίες από 900 έως 1300 °C και σε πιέσεις από 40 έως 60 atm. Εξορύσσεται από κόνδυλους κιμπερλίτη, το οποίο είναι μια μίξη μαρμαρυγίας και περιδοτίτη χαμηλού σε πυρίτιο και υψηλού σε μαγνήσιο, στον οποίο τα φυσικά διαμάντια διαμορφώνονται και αναπτύσσονται.

- **Συνθετικά Διαμάντια**

Τα συνθετικά διαμάντια παράγονται με θέρμανση γραφίτη σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες της τάξεως των 3000 K και σε υψηλές πιέσεις περίπου 125 kilobars, με χρήση νικελίου ως καταλύτη (Εικόνα 3.10). Το πλεονέκτημα του νικελίου ως καταλύτη είναι ότι διαλύεται στο γραφίτη, αλλά όταν μετατραπεί σε διαμάντι, γίνεται αδιάλυτο. Η Εικόνα 3.11 παρουσιάζει την εξαγωνική διάταξη των ατόμων του άμορφου άνθρακα (γραφίτη), ο οποίος μετατρέπεται σε κυβικής διάταξης κρυσταλλικός άνθρακας (διαμάντι). Ο γραφίτης αρχικά διαλύεται στον καταλύτη και στη συνέχεια μετατρέπεται σε διαμάντι υπό κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, εντός της σταθερής περιοχής του διαμαντιού. Μιας και το μέγεθος του διαμαντιού αυξάνεται με το χρόνο, οι συνθήκες αντίδρασης διατηρούνται σταθερές για αρκετά λεπτά, όταν απαιτούνται μεγαλύτεροι κόκκοι.



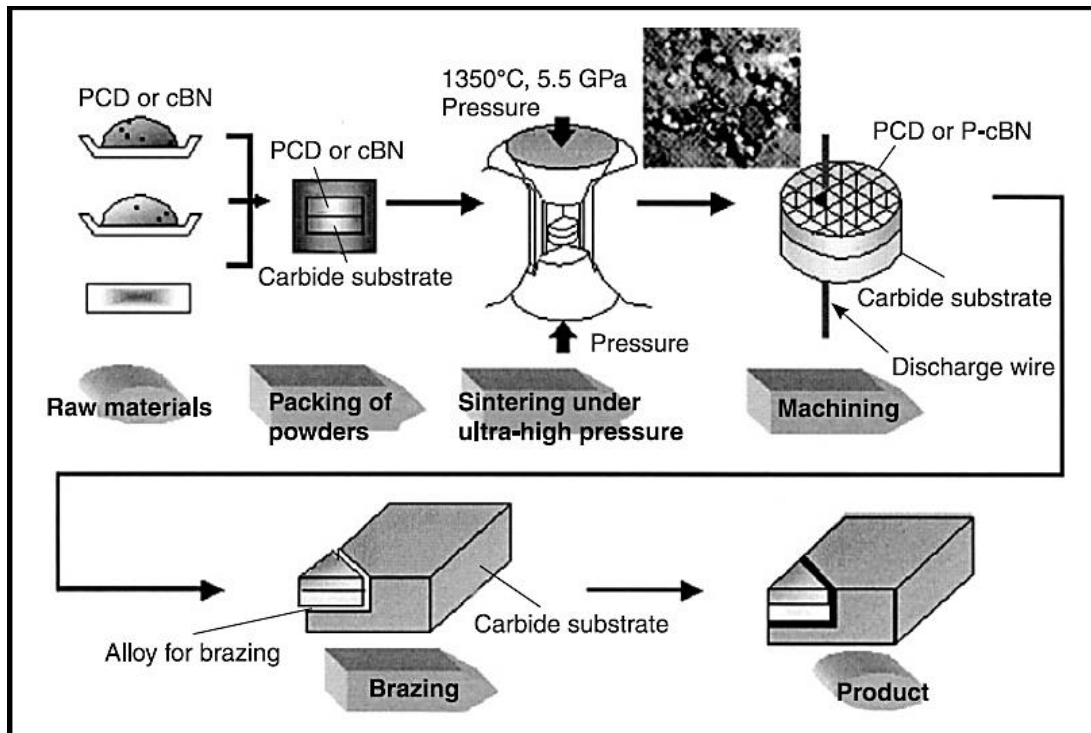
Εικόνα 3.10: Διάγραμμα σύνθεσης διαμαντιού – Το νικέλιο χρησιμοποιείται ως καταλύτης [121]



Εικόνα 3.11: Μετατροπή της εξαγωνικής διάταξης των ατόμων του γραφίτη σε κυβική διάταξη διαμαντιού [122]

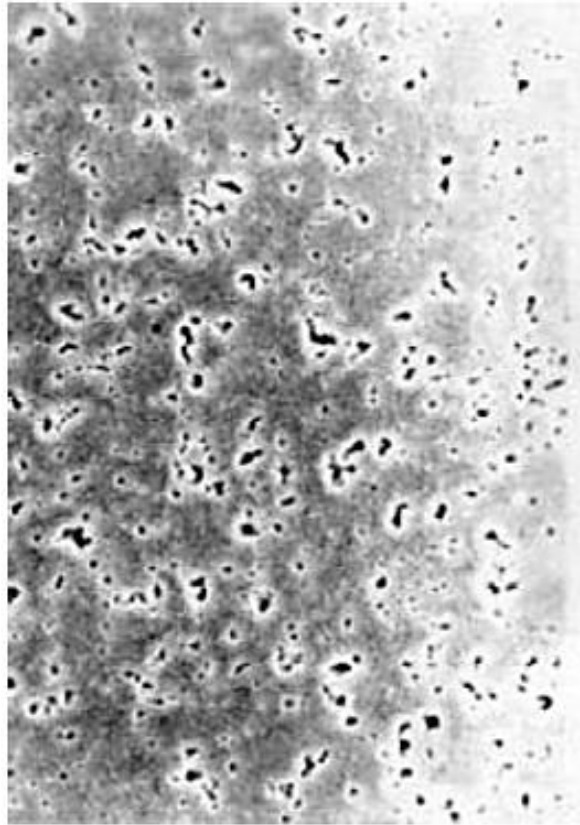
- Πολυκρυσταλλικό Διαμάντι

Τα πολυκρυσταλλικά διαμάντια αποτελούνται από πολύ μικρούς συνθετικούς κρυστάλλους, οι οποίοι κατασκευάζονται με τον τρόπο που προαναφέρθηκε, σε πάχος από 0.5 έως 1 mm. Το διαμάντι συσσωματώνεται σε υπόστρωμα καρβιδίου με συνδετικό το κοβάλτιο. Η Εικόνα 3.12 παρουσιάζει τη διαδικασία παραγωγής πολυκρυσταλλικού διαμαντιού.



Εικόνα 3.12: Σύνθεση πολυκρυσταλλικού διαμαντιού [123]

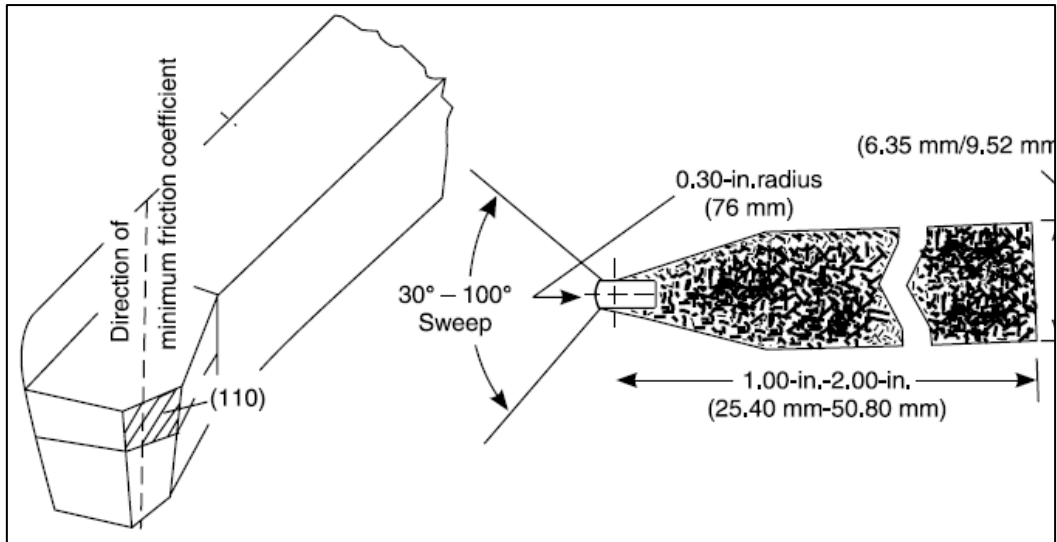
Στην Εικόνα 3.13 φαίνεται η μικροδομή πολυκρυσταλλικού διαμαντιού, η οποία αποτελείται από εκατομμύρια μικρούς, τυχαία προσανατολισμένους κρυστάλλους. Η εξαιρετικά υψηλή σκληρότητα αυτών των κρυστάλλων παρέχει αντοχή σε φθορά, ενώ ο τυχαίος προσανατολισμός τους παρέχει αντοχή και ανθεκτικότητα. Χρησιμοποιείται σε κατεργασίες σκληρών, τραχιών μη σιδηρούχων μετάλλων, γυαλιών και κεραμικών. Τα εργαλεία πολυκρυσταλλικών διαμαντιών χρησιμοποιούνται για κατασκευή δραπάνων, άκρων φρεζομηχανών, εργαλείων τόννευσης, μιας και επιτρέπουν υψηλές ταχύτητες και προώσεις. [1]



Εικόνα 3.13: Μικροδομή πολυκρυσταλλικού διαμαντιού [124]

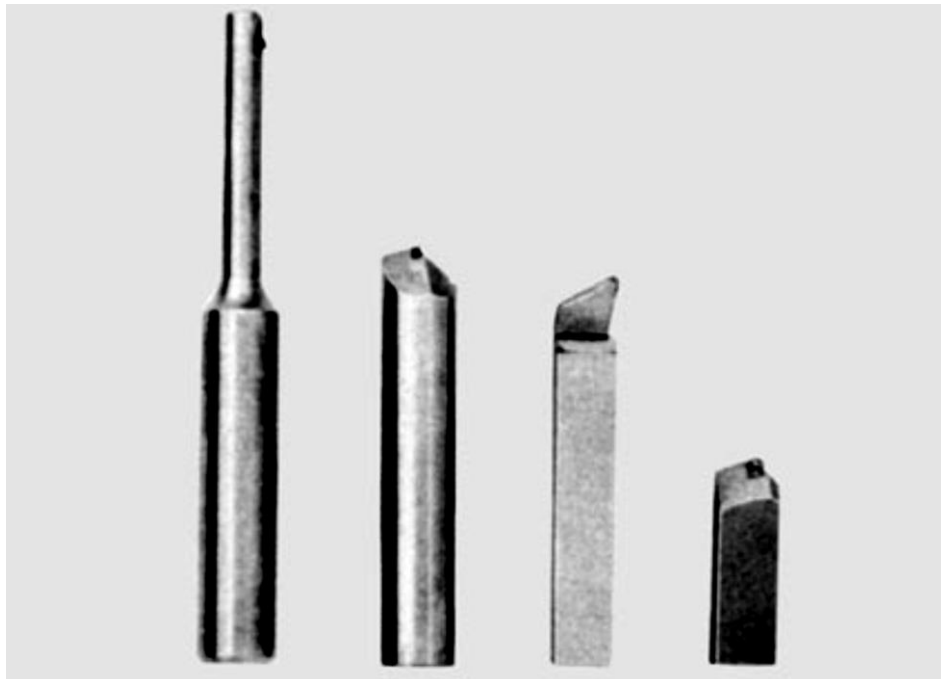
- **Μονοκρυσταλλικά διαμάντια**

Τα μονοκρυσταλλικά διαμάντια χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές, όπως κατεργασία χαλκού, για οπτικούς καθρέπτες υψηλής ακρίβειας. Τα διαμάντια για τόννευση λίνια υψηλής ακρίβειας απαιτούν μεγάλα μονοκρυσταλλικά διαμάντια, ποιότητας εφάμιλλης αυτής των πολύτιμων λίθων, που βρίσκονται μόνο στη φύση. Η απόδοση του εργαλείου διαμαντιού εξαρτάται από την ποιότητα του διαμαντιού, τον κρυσταλλικό προσανατολισμό του και το φινίρισμα της κοπτικής ακμής. Επειδή λοιπόν τα διαμάντια είναι ψαθυρά, το σχήμα και η αιχμηρότητα τους είναι πολύ σημαντικά. Επίσης για τη δημιουργία ισχυρών κοπτικών ακμών χρησιμοποιούνται μικρές αρνητικές γωνιές κοπής. Στην Εικόνα 3.14 φαίνεται ένα εργαλείο διαμαντιού με σχεδίαση για μέγιστη κοπτική δύναμη και συγκολλημένο σε λαβή εργαλείου. Οι κρύσταλλοι του διαμαντιού είναι εξαιρετικά λείοι, και μπορούν να παράγουν φινιρίσματα ακρίβειας 1 μm.



Εικόνα 3.14: Εικόνα 2.30: Τυπική γεωμετρία εργαλίου μονοκρυσταλλικού διαμαντιού [125]

Στην Εικόνα 3.15 παρουσιάζονται οι άκρες εργαλείων διαμαντιού σχεδιασμένες και διαμορφωμένες για ειδικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα σχεδιάζονται με ακτίνα 50-100% μεγαλύτερη από αυτή των εργαλείων επιστοιχειωμένων καρβιδίων, επειδή η αιχμηρή κοπτική ακμή του εργαλείου διαμαντιού παραμένει αμετάβλητη για μεγάλο χρονικό διάστημα [120].



Εικόνα 3.15: Διάφοροι τύποι κοπτικών εργαλείων διαμαντιού [120]

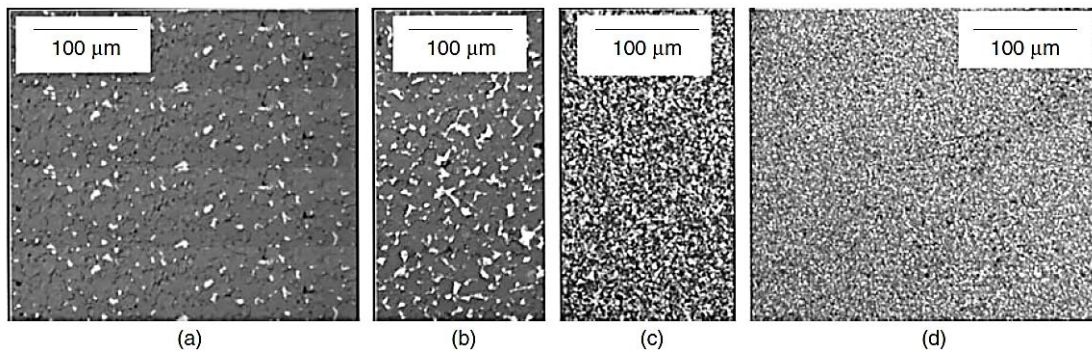
Γενικά τα διαμάντια αποδίδουν ικανοποιητικότερα σε όσο το δυνατόν υψηλότερη ταχύτητα και μικρή πρόωση. Η φθορά του διαμαντιού εμφανίζεται υπό μορφή μικρο-αποβλίττου (προκαλείται από θερμική καταπόνηση και οξείδωση) και μετατροπή του σε άνθρακα (οφείλεται στη θερμότητα που αναπτύσσεται κατά την κοπή). Η καλύτερη προστασία έναντι υψηλών θερμοκρασιών είναι η χρήση αδιάλειπτη παροχή υγρού κοπής. Παρόλα αυτά συγκεκριμένες εφαρμογές μπορούν να διεξαχθούν και χωρίς υγρό κοπής.

- **Κυβικός βοριονιτρίτης:**

Ο κυβικός βοριονιτρίτης (CBN) είναι παρόμοιος με το διαμάντι στην πολυκρυσταλλική δομή και συνδέεται επίσης σε βάση καρβιδίου. Με εξαίρεση τα υλικά από τιτάνιο και κράμα τιτανίου, ο κυβικός βοριονιτρίτης λειτουργεί αποδοτικά ως κοπτικό εργαλείο στα πιο συνήθη υλικά κατεργασίας. Όμως, η χρήση του CBN πρέπει να αποφεύγεται στα πολύ σκληρά και στα δύσκολης επεξεργασίας υλικά. Ο κυβικός βοριονιτρίτης λειτουργεί σε χαμηλές ταχύτητες, γύρω στα 600 SFPM , και εκτελεί βαρύτερες κοπές με μεγαλύτερες γωνίες κοπής από το διαμάντι. Επίσης, ο κυβικός βοριονιτρίτης πρέπει να θεωρείται ως υλικό εργαλείων φινιρίσματος, λόγω της εξαιρετικής σκληρότητας και ευθραυστότητας. Όπως και στην περίπτωση του διαμαντιού, η στιβαρότητα του εργαλείου κατεργασίας και του εξοπλισμού είναι κρίσιμη. [130]

Ένα εργαλείο από κυβικό βοριονιτρίτη κατασκευάζεται από ένα πυροσυσσωματωμένο προϊόν κυβικού βοριονιτρίτη, το οποίο έχει υποστεί επεξεργασία σε υψηλή θερμοκρασία (περίπου 1500°C ή παραπάνω) και υψηλή πίεση (περίπου 40000kg/mm²). Το προϊόν αυτό κατασκευάστηκε πρώτη φορά το 1972. Καθώς ο κυβικός βοριονιτρίτης είναι ένα πυροσυσσωματωμένο προϊόν, το μέγεθος των κρυστάλλων του CBN, η κατανομή τους και το ποσοστό του CBN επηρεάζουν την ικανότητα κοπής του εργαλείου CBN.

Ένα εργαλείο από κυβικό βοριονιτρίτη έχει αρκετά χαρακτηριστικά, ένα από τα οποία είναι η εξαιρετικά μεγάλη σκληρότητά του σε θερμοκρασία δωματίου και αποτελείται από συνδεδεμένους μονοκρυστάλλους CBN. Ένα εύρος υλικών CBN μπορεί να προκύψει μεταβάλλοντας το ποσοστό του CBN, το μέγεθος των κόκκων του και τα υλικά σύνδεσης. Σύμφωνα με τους Wentorf *et al* [126], ένας μονοκρύσταλλος κυβικού βοριονιτρίτη σχηματίζεται με μετατροπή από έναν εξαγωνικό κρύσταλλο κυβικού βοριονιτρίτη. Έχει τη μορφή δύο κυβικών εδροκεντρωμένων πλεγμάτων που εισέρχονται το ένα στο άλλο, ένα του βορίου και ένα του αζώτου. Στην Εικόνα 3.16 φαίνονται οι μικροδομές του υλικών CBN, όταν μελετήθηκε από τους Harris *et al.* [127] η επίδραση της θερμοκρασίας στη σκληρότητα των υλικών κοπτικών εργαλείων από πολυκρυσταλλικό κυβικό βοριονιτρίτη.



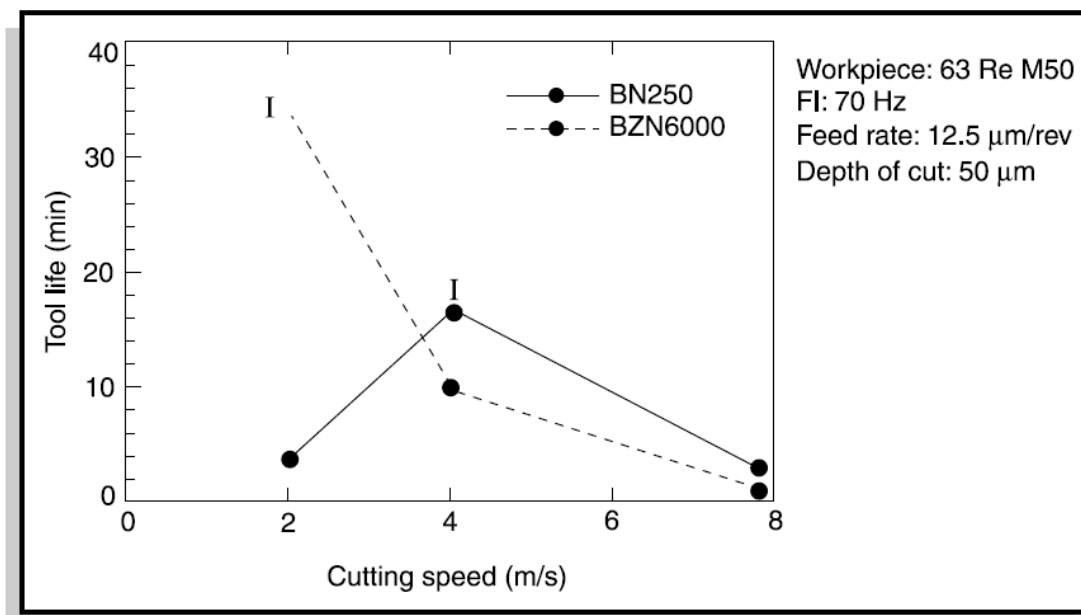
Εικόνα 3.16: Μικροδομές των πολυκρυσταλλικών υλικών κυβικού βοριονιτρίτη [127]

Μεταξύ όλων των υλικών, ο κυβικός βοριονιτρίτης θεωρείται το δεύτερο σκληρότερο υλικό, μετά το διαμάντι. Έχει επίσης σημαντική θερμή σκληρότητα, χημική αδράνεια ως προς τα σιδηρούχα υλικά, καλή θερμική αντίσταση και υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, και κατά συνέπεια η ικανότητα κοπής υπό υψηλή θερμοκρασία είναι καλύτερη από αυτή του διαμαντιού. Καθώς παρουσιάζει καλή θερμική σταθερότητα, είναι απίθανο να αντιδράσει χημικά με το τεμάχιο υπό υψηλά θερμικές συνθήκες. Κατά συνέπεια, τα εργαλεία βοριονιτρίτη χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την κατεργασία των δύσκολα κατεργάσιμων υλικών.

Προς το παρόν, η εμπορική χρήση των εργαλείων κυβικού βοριονιτρίτη περιορίζεται κυρίως σε κατεργασίες τόννευσης και boring, παρόλο που έχουν πολύ περιορισμένες εφαρμογές στο φρεζάρισμα λόγω της μεγάλης σκληρότητας αλλά της μικρότερης αντοχής, πράγμα το οποίο τους καθιστά ακατάλληλους για βαριές κοπές ή φρεζάρισμα.

Καθώς ο κυβικός βοριοιτριτίης είναι ένα νέο υλικό κοπτικών εργαλείων, διάφορες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά κοπής, όπως η διάρκεια ζωής του εργαλείου, οι δυνάμεις κοπής, η φθορά και η ποιότητα επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο.

Λόγω της μεγάλης σκληρότητας και της αντίστασης στην αποξεστική φθορά τα εργαλεία από βοριοιτριτίη έχουν εν γένει μεγαλύτερη αντίσταση στη φθορά από τα συμβατικά υλικά εργαλείων, όπως τα σκληρομέταλλα και τα κεραμικά. Τα εργαλεία κυβικού βοριοιτριτίη χωρίζονται χονδρικά σε δύο κατηγορίες: αυτά με υψηλό ποσοστό CBN (~ 90% vol) με μεταλλικό υλικό σύνδεσης, και αυτά με χαμηλό ποσοστό CBN (~ 50-70 % vol) με συνδετικό υλικό κεραμικό. Οι Chou and Evans [128] διεξήγαγαν μελέτες στη φθορά του εργαλείου CBN σε διακοπτόμενη σκληρή κοπή και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα χαρακτηριστικά φθοράς είναι αρκετά διαφορετικά μεταξύ των εργαλείων υψηλού και χαμηλού ποσοστού CBN. Η διάρκεια ζωής των εργαλείων χαμηλού ποσοστού βελτιστοποιείται σε μια μέση ταχύτητα κοπής. Από την άλλη, τα εργαλεία με υψηλό ποσοστό CBN παρουσιάζουν μονότονη μείωση της διάρκειας ζωής με αύξηση της ταχύτητας κοπής.

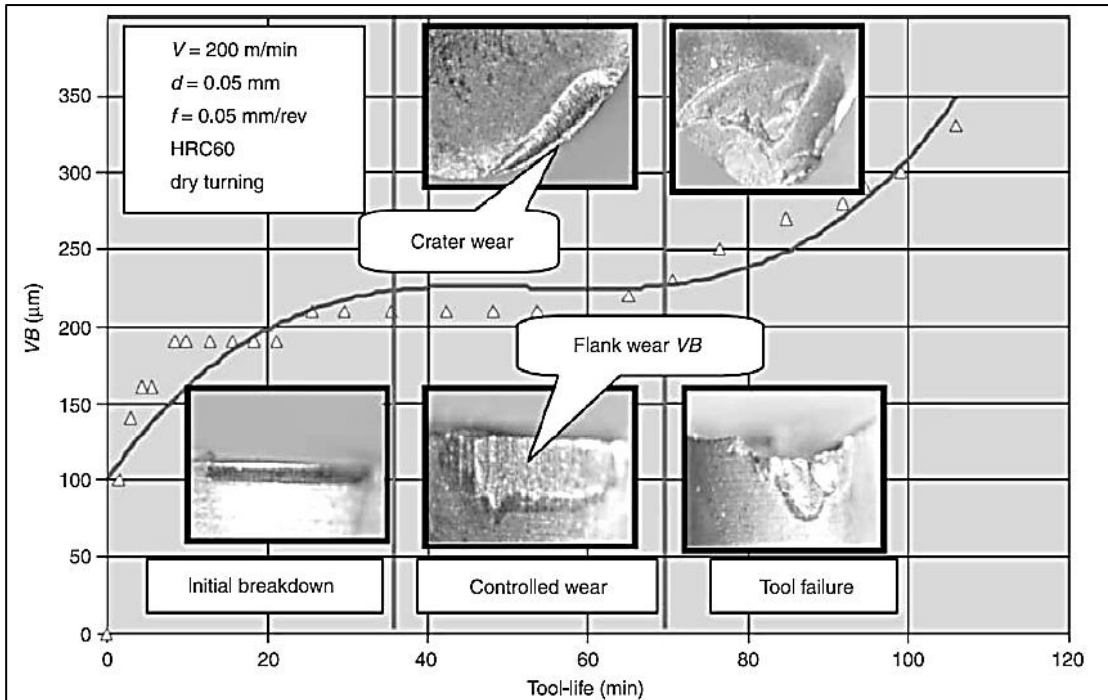


Εικόνα 3.17: Διάρκεια ζωής εργαλείων κυβικού βοριοιτριτίη σε διαφορετικές ταχύτητες κοπής [128]

Βάσει των αποτελεσμάτων των Diniz and Gomes [129], το κύριο πρόβλημα που προκάλεσε το τέλος της διάρκειας ζωής ήταν η πλευρική φθορά και η φθορά κρατήρα για τα εργαλεία με υψηλό ποσοστό CBN και η θραύση για τα εργαλεία χαμηλού ποσοστού CBN.

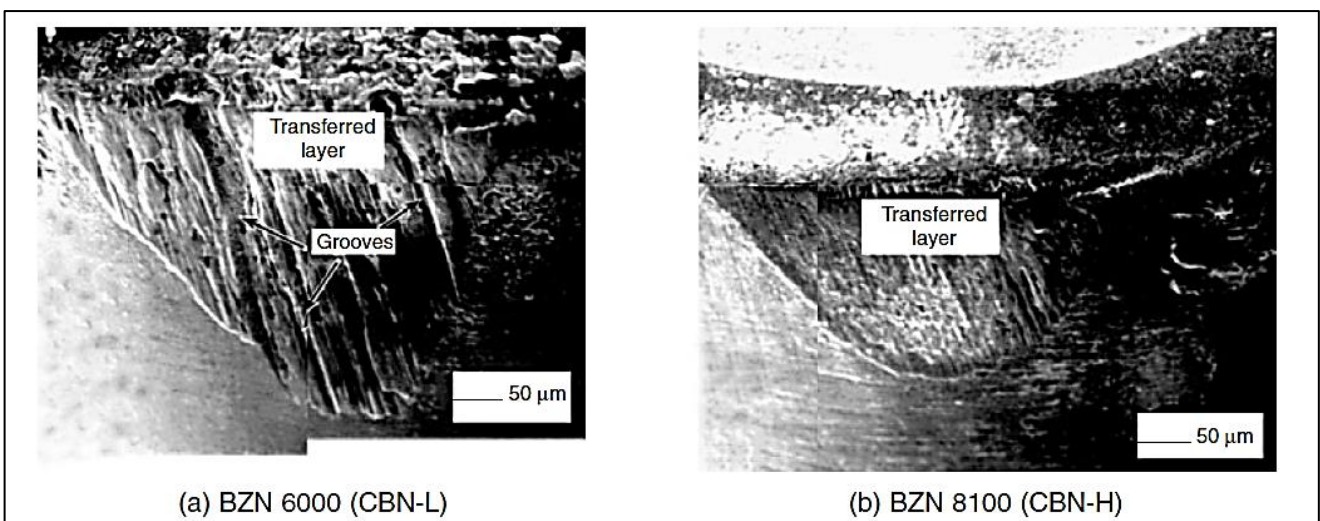
Η σκληρυμένη επιφάνεια του τεμαχίου στην τόννευση έχει αποξεστική επίδραση στο υλικό του εργαλείου και οι υψηλές θερμοκρασίες της κοπτικής ακμής προκαλούν διάχυση θερμοκρασίας μεταξύ του εργαλείου και του αποβλίττου. Η τόννευση σκληρών τεμαχίων απαιτεί κοπτικά εργαλεία υψηλής απόδοσης και εξαιρετικής στιβαρότητας.

Σε πολλές εφαρμογές η κοπή σιδηρούχων υλικών σε συνθήκες σκλήρυνσης μπορεί να αντικαταστήσει τη λείανση, πράγμα το οποίο συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του κόστους και την αύξηση της παραγωγικότητας. Τα κοπτικά εργαλεία που απαιτούνται για την τόννευση σκληρών υλικών είναι ακριβά. Η επιλογή των βέλτιστων συνθηκών κοπής μπορεί να εξισορροπήσει την αντιστάθμιση μεταξύ της παραγωγικότητας και της διάρκειας ζωής, και κατά συνέπεια την ανάγκη μελέτης της επίδρασης των συνθηκών κοπής στη συμπεριφορά φθοράς διαφόρων υλικών εργαλείων σκληρής τόννευσης. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες, οι οποίες διερευνούν την επίδοση των εργαλείων CBN στη σκληρή τόννευση, ειδικά όσον αφορά την επίδραση της σκληρότητας στο ρυθμό φθοράς. Οι Roulachon *et al.* [131] έδειξαν ότι ο κύριος μηχανισμός φθοράς των εργαλείων πολυκρυσταλλικού βοριονιστρίτη κατά την κατεργασία του χάλυβα AISI 52100 είναι η απόξεση από τα σκληρά σωματίδια του καρβιδίου που περιέχονται στο τεμάχιο. Η απόξεση του κοπτικού εργαλείου εξαρτάται από τη φύση των καρβιδίων, το μέγεθος και την κατανομή τους. Τα διαφορετικά υλικά κατεργασίας της ίδιας σκληρότητας δε μπορούν να θεωρηθούν ισάξια ως προς την άποψη της φθοράς του εργαλείου.



Εικόνα 3.18: Ρυθμός προόδου της φθοράς του εργαλείου [1]

Οι Chou and Evans [128] έδειξαν ότι τα εργαλεία χαμηλού ποσοστού CBN αποδίδουν καλύτερο φινίρισμα επιφάνειας και παρουσιάζουν χαμηλότερο ρυθμό πλευρικής φθοράς από τα εργαλεία υψηλού ποσοστού CBN στην τόννευση φινιρίσματος, με κατώτερες βέβαια μηχανικές ιδιότητες, έχουν καλύτερη αντίσταση στη φθορά από τα εργαλεία υψηλού ποσοστού CBN και η απόκλιση αυτή αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας κοπής.



Εικόνα 3.19: Φθαρμένη κοπτική ακμή εργαλείου κυβικού βοριοιτρίτη στα 240 m/min: (a) BZN 6000 (χαμηλού ποσοστού CBN) και (b) BZN 8100 (υψηλού ποσοστού CBN) [128]



Εικόνα 3.20: Λειαντικοί τροχοί και εργαλεία απόξεσης από διαμάντι και κυβικό βοριονιτρίτη [23]

- **Υλικά ενισχυμένων ινοκρυστάλλων:**

Για την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης των εργαλείων κοπής και της αντίστασης στη φθορά για την κατεργασία νέων υλικών κατεργασίας και σύνθετων υλικών, αναπτύχθηκαν τα σύνθετα υλικά ενισχυμένων ινοκρυστάλλων . Τα υλικά ενισχυμένων ινοκρυστάλλων περιλαμβάνουν εργαλεία πυριτίου βάσης νιτριδίου και εργαλεία με βάση αλούμινα, ενισχυμένα με ινοκρυστάλλους καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Τέτοια εργαλεία είναι αποτελεσματικά στην κατεργασία σύνθετων και μη μεταλλικών υλικών, αλλά δεν είναι κατάλληλα για την κατεργασία του σιδήρου και του χάλυβα. [28, 29]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μικροεργαλεία και φθορά τους

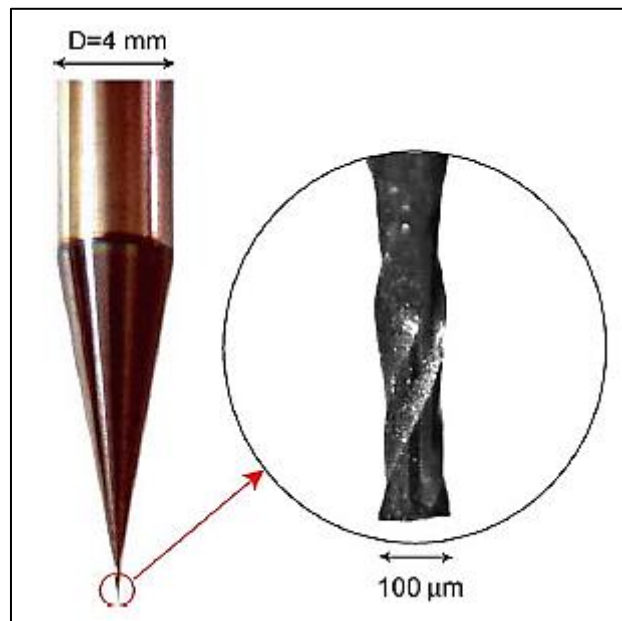
4.1 Εισαγωγή στα Μικροεργαλεία

Τα κοπτικά εργαλεία ακριβείας είναι κρίσιμα για τις κατεργασίες μικροκοπής, καθώς η ποιότητα επιφανείας και το μέγεθος των χαρακτηριστικών των μικροδομών εξαρτώνται από αυτά. Η πλειοψηφία των μικροεργαλείων βασίζονται σε συμβατικά εργαλεία λείαν υψηλής ακρίβειας, με μεγάλη ακαμψία, τα οποία λειτουργούν σε θερμοκρασιακά ελεγχόμενο περιβάλλον. Υπάρχει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον [100,101-104] για την κατασκευή μικροεργαλείων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή εξαρτημάτων μεγέθους μικρόμετρου. Το κίνητρο για τη δημιουργία μικροεργαλείων προήλθε από την ανάγκη ελαχιστοποίησης του κόστους και του μεγέθους, με αύξηση της ευελιξίας. Όμως, η ακρίβεια των μικροεργαλείων δεν είναι συγκρίσιμη με τα εργαλεία λείαν υψηλής ακρίβειας, λόγω της έλλειψης ακαμψίας και της ταλάντωσης της βάσης [102]. Τα κοπτικά εργαλεία από καρβίδιο του βολφραμίου χρησιμοποιούνται γενικά στην κατασκευή μικροεργαλείων, λόγω της σκληρότητάς τους σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.

Το μέγεθος των μικροεργαλείων προσδιορίζει το όριο του μεγέθους και της ακρίβειας των μικροδομών. Τα μικρότερα εργαλεία έχουν μειωμένη θερμική διαστολή σε σύγκριση με το μέγεθός τους, αυξημένη στατική δυσκαμψία λόγω της στενής δομής, αυξημένη δυναμική σταθερότητα λόγω της υψηλότερης φυσικής τους συχνότητας και δυνατότητα μειωμένου κόστους λόγω των μικρότερων ποσοτήτων υλικού.

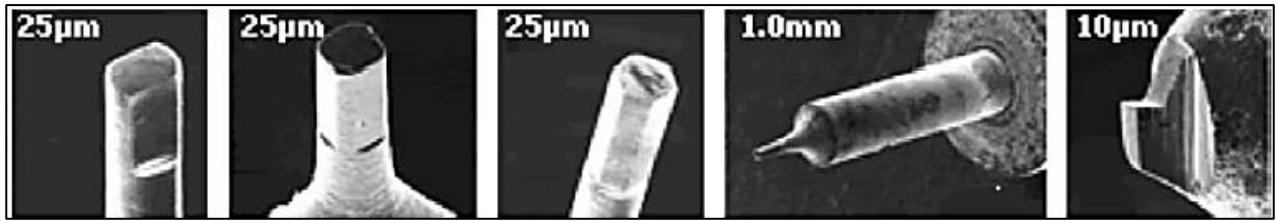
Τα εργαλεία διαμαντιού χρησιμοποιούνται συνήθως για κατεργασίες λείαν υψηλής ακρίβειας, αλλά έχουν περιορισμένες δυνατότητες κατεργασίας σιδηρούχων υλικών. Η υψηλή χημική συνάφεια μεταξύ του διαμαντιού και των σιδηρούχων υλικών προκαλεί σοβαρή φθορά [105,106], περιορίζοντας τη χρήση του σε μικροκατεργασίες μη σιδηρούχων υλικών. Κατά συνέπεια, τα μικροεργαλεία όπως τα εργαλεία μικροτόρνευσης άκρου και τα δράπανα κατασκευάζονται συνήθως από καρβίδιο του βολφραμίου, το οποίο έχει μεγάλη σκληρότητα και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες [105]. Για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών αντίστασης σε φθορά των μικροεργαλείων, καρβίδια βολφραμίου πολύ μικρού μεγέθους κόκκων (δηλ. <600 nm)

πυριουσσωματώνονται ταυτόχρονα, ώστε να σχηματίσουν το εργαλείο. Το κοβάλτιο χρησιμοποιείται συνήθως ως συνδετικό και το ποσοστό του επηρεάζει τη σκληρότητα του εργαλείου. Μικρότερο ποσοστό κοβαλτίου κάνει το εργαλείο καρβιδίου σκληρότερο, αλλά με συνέπεια τη μεγαλύτερη ευθραυστότητα. Τα εμπορικά διαθέσιμα εργαλεία φρεζαρίσματος άκρου μπορεί να είναι και 50 μm σε διάμετρο, στα οποία η γωνία ελίκωσης παράγεται με λείανση. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται ένα τυπικό εργαλείο μικροφρεζαρίσματος άκρου με δύο αυλακώσεις.



Εικόνα 4.1: Μικροεργαλείο φρεζαρίσματος άκρου καρβιδίου του βολφραμίου με δύο αυλακώσεις [16]

Μικροεργαλεία μικρότερα από 50 μm απαιτούν μηδενική γωνία ελίκωσης, για βελτίωση της δυσκαμψίας τους [107] και μείωση των περιορισμών λόγω της τεχνικής κατασκευής. Οι Onikura et al. [29] χρησιμοποίησαν λείανση υπερηχητικής δόνησης για τη μείωση των λειαντικών δυνάμεων και κατάφεραν να κατασκευάσουν ένα μικροεργαλείο καρβιδίου διαμέτρου 11 μm . Τα εργαστήρια Sandia κατασκεύασαν ένα εργαλείο φρεζαρίσματος καρβιδίου με πέντε κοπτικές άκρες χρησιμοποιώντας κατεργασία δέσμης ηλεκτρονίων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2. Η εν λόγω άκρη της μικροφρεζομηχανής χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή μικροκαναλιών βάθους και πλάτους 25 μm . [30]



Εικόνα 4.2: Εικόνα μικροεργαλείων από ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης [121]

Το υλικό και η γεωμετρία των μικροεργαλείων είναι σημαντικοί παράγοντες για τις μικροκατεργασίες. Το εκάστοτε μέγεθος των χαρακτηριστικών των εξαρτημάτων εξαρτάται από το μέγεθος των μικροεργαλείων, για αυτό και το εργαλείο καρβιδίου του βολφραμίου είναι γενικά κατάλληλο για την κατεργασία πολλών υλικών βιομηχανίας.

4.2 Μικρο-εργοστάσια

Γενικά, οι μικροκατεργασίες διεξάγονται με εργαλεία ακριβείας με συμβατικές διαστάσεις. Όμως, το μέγεθος του κατεργαζόμενου υλικού και η απαιτούμενη ισχύς είναι σχετικά μικρότερα για τις μικροκατεργασίες. Η μείωση του μεγέθους του εργαλείου αποτελεί αντικείμενο έρευνας για κατασκευαστές και ερευνητές ώστε να επιτύχουν οικονομικά οφέλη, όπως, μείωση κατανάλωσης ισχύος, μείωση του χώρου που καταλαμβάνουν τα μηχανήματα, μείωση του κόστους των υποδομών, αλλά και οφέλη απόδοσης, συμπεριλαμβανομένου, μείωση της θερμικής παραμόρφωσης, αύξηση της στατικής ακαμψίας καθώς και της δυναμικής σταθερότητας. [171, 172]

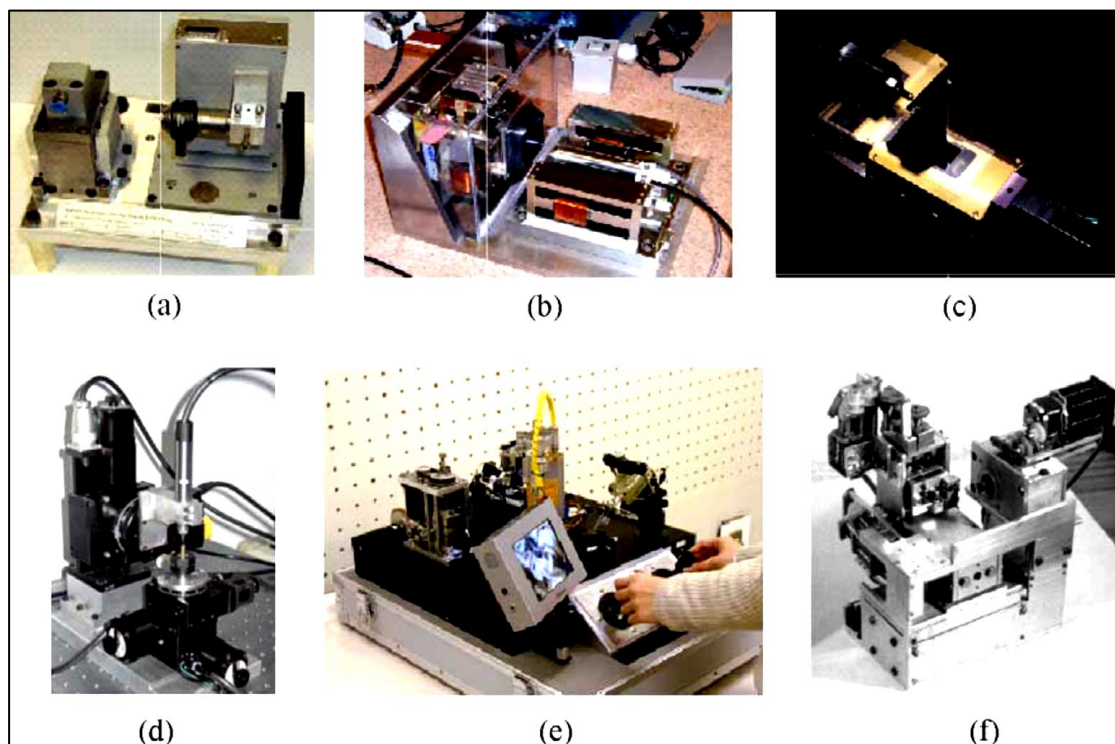
Οι προσπάθειες που καταβάλλονται στρέφονται προς την κατεύθυνση της δημιουργίας ενός μικροεργοστασίου, όπου τα μηχανήματα θα είναι αρκετά μικρά για να μπορούν να τοποθετηθούν σε γραφείο. Τη δεκαετία του '80, Ιάπωνες ερευνητές ξεκίνησαν την κατασκευή πρωτοτύπων, όπου η πρώτη προσπάθειά τους ήταν ένας μικροτόρνος μικρότερος από μια παλάμη που έφερε κινητήρα 1,5 W, ενώ στη συνέχεια ακολούθησε πληθώρα αρκετά ισχυρών, φορητών και επιτραπέζιων μηχανημάτων. [173-177]

Οι Gaugel et al. [178] κατασκεύασαν ευέλικτα μικρομηχανήματα βασιζόμενοι σε μια ιδέα κατασκευής κατά τμήματα. Η διάταξη του μηχανήματος μπορεί εύκολα να μεταβληθεί ανάλογα με τη διαδικασία κατασκευής

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΑΚΡΟΚΟΣΜΟ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΟΣΜΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΤΟΥΣ

μικροεξαρτημάτων. Η κύρια ιδέα ήταν η σύνδεση ξεχωριστών τμημάτων, ώστε να μπορεί να αναπροσαρμόζεται η λειτουργία του μηχανήματος αλλά και ο εκάστοτε αλγόριθμος ελέγχου.

Τα μικροεργαλεία είναι οικονομικά επωφελή όταν συγκρίνονται με εργαλεία λίαν υψηλής ακρίβειας, αφού απαιτούν μικρότερη ποσότητα υλικού κατεργασίας. Συνεπώς, τα κέντρα κατεργασίας μπορούν να κατασκευαστούν με ακριβότερα υλικά, έχοντας κατά συνέπεια ακόμη καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Από την άλλη τα μικροεργαλεία έχουν υψηλότερες φυσικές συχνότητες σε σύγκριση με τα συμβατικά μηχανήματα, λόγω της μικρότερης μάζας τους. Αυτό επιτρέπει τη χρησιμοποίηση μεγάλου φάσματος ταχυτήτων κοπής για την κατασκευή εξαρτημάτων χωρίς αστάθεια έναντι κραδασμών. Επιπροσθέτως, τα μικρότερα εργαλεία έχουν χαμηλότερα πλάτη δόνησης σε σχέση με τα συμβατικά εργαλεία. Η Εικόνα 4.3 παρουσιάζει διάφορες μινιατούρες μικροεργαλείων.



Εικόνα 4.3: (a) μικροεργοστάσιο (b) μηχανήματα μινιατούρων 2^{ης} γενιάς (c) εμπορικά διαθέσιμη μηχανή μινιατούρων (d) μηχανή μινιατούρων (e) μικροεργοστάσιο (f) μικροεργαλείο [36, 24]

Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι η φορητότητά τους. Έτσι για παράδειγμα, το μικρό τους μέγεθος επιτρέπει τη χρήση τους

σε οποιοδήποτε κτήριο ή τοποθεσία. Τα μικροεργοστάσια μπορεί να είναι κατάλληλα για την παραγωγή μικροεξαρτημάτων σε αποστολές εξερεύνησης του διαστήματος ή του στρατού, μιας και η προσβασιμότητα σε μεγάλα εργαλεία είναι πιο δύσκολη. Επιπρόσθετο πλεονέκτημα των εργοστασίων μινιατούρων μπορεί να έχει και ενεργειακά οφέλη, μιας και η κατανάλωση ισχύος είναι σημαντικά μειωμένη.

Οι επενεργητές των μικροεργοστασίων είναι συνήθως πιεζοηλεκτρικοί ή φωνητικοί, ώστε να επιτευχθεί ακρίβεια σε επίπεδο μικρόμετρου. Επιπροσθέτως, τα μικροεργοστάσια μπορούν να έχουν και διαφορετικές λειτουργίες, όπως μικροτόρνευση, μικροφρεζάρισμα, ή μικροπρέσα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής μικροεργοστασίου ήταν στην Ιαπωνία, το οποίο αποτελούνταν από ένα ρομπότ με δύο άκρα και μια κάμερα μινιατούρα CCD ώστε να μπορεί να χειρίζεται τα μικροεξαρτήματα. [12]

Υπάρχουν διάφορες προκλήσεις στον τομέα έρευνας και ανάπτυξης των μικροεργαλείων. Μερικές από αυτές τις απαιτήσεις είναι: αισθητήρες και επενεργητές ακριβείας, σε επαρκές μέγεθος ώστε να ταιριάζουν και να εφαρμόζουν στο εσωτερικό των μηχανημάτων. Ασφαλώς, η δομική ακαμψία των μικροεργαλείων είναι μικρότερη από αυτή των μηχανημάτων ακριβείας. Επιπρόσθετα, τα μικροεργαλεία είναι ευαίσθητα σε εξωτερικές διαταραχές, γι' αυτό απαιτούν μόνωση έναντι δονήσεων ώστε να επιτυγχάνουν τις επιθυμητές ανοχές.

Η ακρίβεια και τα χαρακτηριστικά των μικροεξαρτημάτων εξαρτώνται άμεσα από τα μηχανικά εργαλεία που τα κατασκευάζουν. Τα μικροεργαλεία καρβιδίου του βολφραμίου παρέχουν τη δυνατότητα κατασκευής σιδηρούχων και μη σιδηρούχων μικροεξαρτημάτων. Τα συμβατικά εργαλεία λίαν υψηλής ακρίβειας μπορούν να κατασκευάσουν τα επιθυμητά εξαρτήματα με ικανοποιητικές ανοχές, παρόλα αυτά για να είναι και οικονομικά επωφελής η κατασκευή τους, η έρευνα πρέπει να στραφεί στα πολλά υποσχόμενα μικροεργοστάσια. [5]

4.3 Χρόνος Ζωής Κοπτικών Εργαλείων

Η αστοχία του κοπτικού εργαλείου μπορεί να προκληθεί είτε από φθορά του ίδιου του σώματος του εργαλείου είτε από πρόβλημα στο σύστημα πρόσδεσης. Με την πρόοδο της τεχνολογίας όμως στην κατασκευή πολύ αξιόπιστων συστημάτων πρόσδεσης, η αστοχία συνδέεται άμεσα με την φθορά του υλικού του κοπτικού εργαλείου. Γενικά, η φθορά αυτή επηρεάζεται από τα υλικά εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου, τη γεωμετρία του εργαλείου, τα χαρακτηριστικά στοιχεία κοπής και τη χρήση ψυκτικών-λιπαντικών υγρών. Πριν δούμε αναλυτικά τους παράγοντες της φθοράς, αξίζει να αναφερθούμε στους μηχανισμούς της.

Η φθορά εμφανίζεται προοδευτικά με απώλεια υλικού σε συγκεκριμένα σημεία του εργαλείου, μέχρι να φτάσει στην καταστροφική φθορά, δηλαδή τη θραύση ή την πλαστική παραμόρφωση του εργαλείου. Οι μηχανισμοί της φθοράς ανάλογα με τη ζώνη που αυτή παρουσιάζεται είναι:

- Το πεδίο φθοράς, το οποίο εμφανίζεται στην πλευρά του εργαλείου που ορίζει τη γωνία ελευθερίας και οφείλεται στην τριβή του εργαλείου πάνω στο τεμάχιο, με αποτέλεσμα να μειώνεται σταδιακά το βάθος κοπής.
- Η φθορά κρατήρα, η οποία εμφανίζεται στην πλευρά του εργαλείου που ορίζει η γωνία αποβλίττου και οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτή την ζώνη, με αποτέλεσμα να σχετίζεται άμεσα με την μείωση της σκληρότητας του εργαλείου και ενδεχόμενη θραύση του. Παρατηρείται κυρίως στις υψηλές ταχύτητες κοπής, ενώ μελέτες [14] έχουν δείξει ότι η φθορά κρατήρα εμφανίζεται ως λεία επιφάνεια πάνω στο κοπτικό εργαλείο, σε αντίθεση με το πεδίο φθοράς που προκαλεί τραχιά επιφάνεια.
- Οι αποκολλήσεις, οι οποίες παρουσιάζονται συνήθως στην κοπτική ακμή και οφείλονται σε μεγάλες μηχανικές ή θερμικές διακυμάνσεις (σοκ), με αποτέλεσμα την δημιουργία ρωγμών.

Για τη μέτρηση της φθοράς στο κοπτικό εργαλείο υπάρχει ο άμεσος τρόπος με τη χρήση ειδικού μηχανουργικού μικροσκοπίου και ο έμμεσος, με το συσχετισμό της φθοράς με τα μεγέθη που την επηρεάζουν. Ο έμμεσος τρόπος προφανώς είναι λιγότερο αξιόπιστος, αλλά δεν απαιτεί τη διακοπή της κατεργασίας και άρα συμφέρει κατά την εφαρμογή του.

Με τον όρο χρόνο (ή διάρκεια) ζωής του εργαλείου, εννοούμε το συνολικό ωφέλιμο χρόνο που το εργαλείο είναι σε θέση να κόβει, μέχρι να καταστραφεί ή να στομώσει. [10, 11]

4.3.1 Υλικά τεμαχίου και εργαλείου

Η σκληρότητα του εργαλείου σε σχέση με αυτήν του τεμαχίου έχει τον καθοριστικότερο ρόλο. Όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο μεγαλύτερη και η διάρκεια ζωής. Γι' αυτό μεγάλη σημασία έχει και η θερμική αγωγιμότητα του εργαλείου, ώστε να απάγεται ευκολότερα η θερμότητα και να μην αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες μειώνεται η σκληρότητα του εργαλείου και άρα και ο χρόνος ζωής του. Τέλος, για αυξημένο χρόνο ζωής του εργαλείου είναι ανάγκη να αποφεύγεται η τάση για «συγκόλληση» μεταξύ των υλικών εργαλείου και τεμαχίου με φυσικοχημικούς μηχανισμούς, η οποία συνδέεται με τη δημιουργία ψευδοακμής στην κορυφή του κοπτικού εργαλείου και παρουσιάζεται κυρίως στις υψηλές ταχύτητες κοπής. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο με σωστή επιλογή υλικών που δεν αντιδρούν μεταξύ τους. [11]

4.3.2 Συνθήκες κοπής

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι η διακοπτόμενη κοπή προκαλεί ταλαντώσεις, κόπωση του υλικού και θερμικές διακυμάνσεις που μειώνουν σημαντικά το χρόνο ζωής του εργαλείου. Στη συνεχόμενη κοπή, τα χαρακτηριστικά στοιχεία της κοπής που αναφέραμε και προηγούμενα είναι η ταχύτητα κοπής (V_c), το βάθος κοπής (a) και η πρόωση (s).

Η ταχύτητα κοπής επηρεάζει δραστικότερα από τις υπόλοιπες συνθήκες τον χρόνο ζωής του εργαλείου. Είναι ευνόητο ότι όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο μειώνεται η διάρκεια ζωής και αυτό γιατί, παρόλο που οι δυνάμεις κοπής είναι μικρότερες, η θερμότητα δεν διαχέεται με τους ίδιους ρυθμούς στις υψηλές ταχύτητες κοπής και έτσι η σκληρότητα μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας.

Το βάθος κοπής επίσης όταν αυξηθεί μειώνει τον χρόνο ζωής του εργαλείου, εφόσον το εργαλείο έρχεται σε επαφή με περισσότερο υλικό στον ίδιο χρόνο και οι δυνάμεις που του ασκούνται είναι μεγαλύτερες, άρα έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας κοπής.

Η ταχύτητα πρόωσης αυξανόμενη οδηγεί σε μείωση της διάρκειας ζωής του εργαλείου και μάλιστα πειραματικά έχει αναφερθεί ότι αύξηση κατά 50% της ταχύτητας πρόωσης μειώνει κατά 100% (υποδιπλασιάζει) τον χρόνο ζωής. Η αιτία είναι η ίδια με το βάθος κοπής. Η φθορά που προκαλείται είναι συνήθως κρατήρα εφόσον η επιφάνεια επαφής εργαλείου-αποβλίττου δέχεται μεγαλύτερες δυνάμεις με μεγαλύτερο απόβλιττο.

Τέλος, ο χρόνος ζωής εξαρτάται και από την κατεργασία στην οποία χρησιμοποιείται το κοπτικό εργαλείο, αφού υπόκειται σε διαφορετικές καταπονήσεις. [3, 11, 20]

4.3.3 Γεωμετρική μορφή εργαλείου

Οι γωνίες κοπής επηρεάζουν πιο σημαντικά από τις υπόλοιπες τη διάρκεια ζωής του εργαλείου, καθώς με μείωση τους, αυξάνεται το ενεργό μέρος του εργαλείου (η επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο στην ακμή του εργαλείου), το πάχος του αποβλίττου μεγαλώνει και έτσι απάγεται ευκολότερα η θερμότητα, με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου ζωής. Έχει μελετηθεί πειραματικά ότι η διαφορά στον χρόνο ζωής μπορεί και να πενταπλασιασθεί αν η γωνία κοπής από 45° γίνει 30°, ειδικά όταν κόβονται πολύ σκληρά υλικά. Φυσικά δεν είναι δυνατό να έχουμε πάντα μικρή γωνία κοπής, καθώς μπορεί να ωφελούμαστε ως προς τον χρόνο ζωής του εργαλείου, αλλά χάνουμε σε σταθερότητα κατά την κοπή και ακρίβεια.

Οι γωνίες αποβλίττου μπορούν να πάρουν θετικές και αρνητικές τιμές. Με θετικές τιμές μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας κατά την κοπή και έτσι μειώνεται η δύναμη και η θερμοκρασία κοπής. Όμως ενώ θα ήταν εύλογο να χρησιμοποιούμε μεγάλες γωνίες αποβλίττου, η πράξη στην βιομηχανία δείχνει ότι αυτό δεν είναι πάντα επιθυμητό. Με μεγάλη γωνία αποβλίττου, η ακμή του κοπτικού εργαλείου δέχεται όλο και πιο συγκεντρωμένα φορτία και είναι ευκολότερο να φθαρεί. Σε αρνητική γωνία όμως, τα φορτία αυτά από καμπτικά γίνονται θλιπτικά, τα οποία αντέχει περισσότερο το υλικό

του εργαλείου, αν και είναι μεγαλύτερα. Έτσι βλέπουμε ότι η διάρκεια ζωής δεν καθορίζεται αποκλειστικά από την μείωση ή όχι της γωνίας αποβλίττου, αλλά σημαντικό ρόλο στην επιλογή μας θα έχουν οι συνθήκες κοπής που θα καθορίσουν τις δυνάμεις στην ακμή του εργαλείου.

Οι γωνίες ελευθερίας είναι συμπληρωματικές με το άθροισμα των γωνιών αποβλίττου και γωνιών της σφήνας του εργαλείου. Άρα αν θέλουμε μεγάλη γωνία αποβλίττου θα έχουμε αναγκαστικά είτε μικρή γωνία σφήνας (που δεν το θέλουμε εφόσον έτσι μειώνεται η ενεργή περιοχή της ακμής), είτε μικρή γωνία ελευθερίας. Όμως οι γωνίες ελευθερίας σχετίζονται με την επαφή εργαλείου - κατεργασμένου τεμαχίου, με αποτέλεσμα μικρές γωνίες να επιφέρουν μεγάλες δυνάμεις τριβής και αύξηση θερμοκρασίας και άρα μείωση του χρόνου ζωής του εργαλείου. Έτσι πρέπει πάντα να βρίσκεται το μέγιστο της γωνίας ελευθερίας ώστε να μην επηρεάζονται σημαντικά οι συμπληρωματικές γωνίες και να αυξάνεται έτσι η διάρκεια ζωής του εργαλείου.

Η καμπυλότητα της ακμής του κοπτικού εργαλείου με γνώμονα τον χρόνο ζωής, οφείλει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Όμως για υψηλές ταχύτητες κοπής όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα καμπυλότητας της κοπτικής ακμής του εργαλείου, τόσο χειρότερη ακρίβεια επιφανείας έχουμε, λόγω των ταλαντώσεων που δημιουργούνται και της αύξησης της δύναμης κοπής. Φυσικά υπάρχει ένα ελάχιστο όριο για την ακτίνα καμπυλότητας ανάλογα και με το υλικό που κατεργαζόμαστε, πέρα από το οποίο η ποιότητα επιφανείας χειροτερεύει. Έτσι βλέπουμε ότι ο μηχανισμός στις υψηλές ταχύτητες κοπής διαφέρει σημαντικά και καλό είναι να επιλέγονται μικρές ή μεσαίες ακτίνες καμπυλότητας.

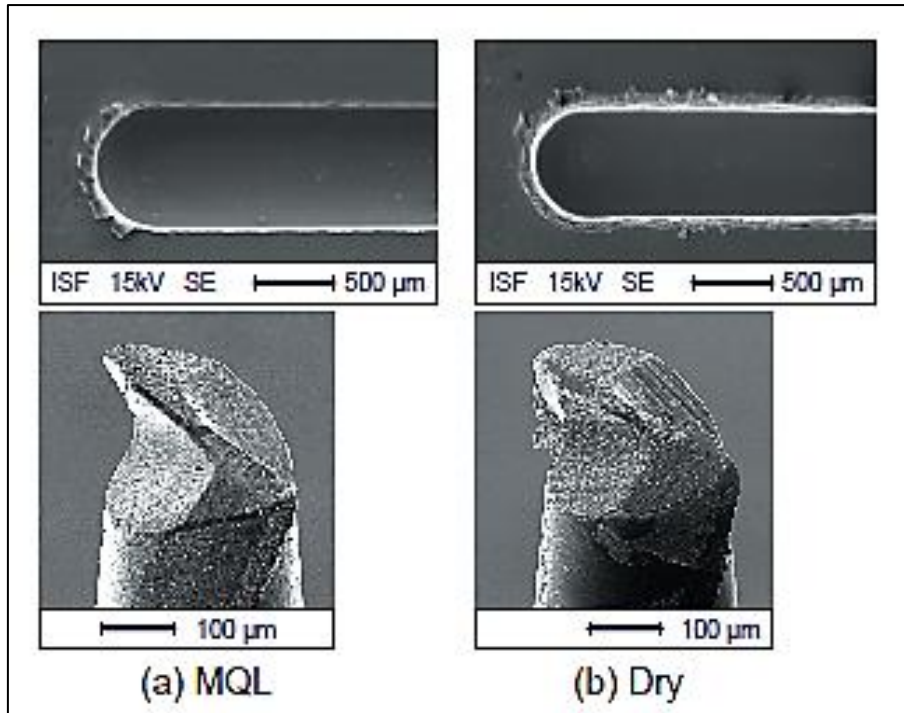
4.3.4 Υγρό κοπής

Γενικά τα υγρά κοπής μπορούμε να πούμε ότι όταν χρησιμοποιούνται αυξάνουν τον χρόνο ζωής του εργαλείου αφού απάγουν σημαντικό μέρος της θερμότητας. Αυτό στην περίπτωση βέβαια που η ροή τους είναι επαρκής και συνεχόμενη, ώστε να μην δημιουργούνται μεγάλες διακυμάνσεις στην θερμοκρασία κοπής. Παρόλα αυτά η χρήση των υγρών κοπής παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα όπως το κόστος τους, η

βλάβη που προκαλεί η απόρριψη τους στο περιβάλλον αλλά και στους εργάτες που έρχονται σε επαφή κ.α. [8, 11, 20]

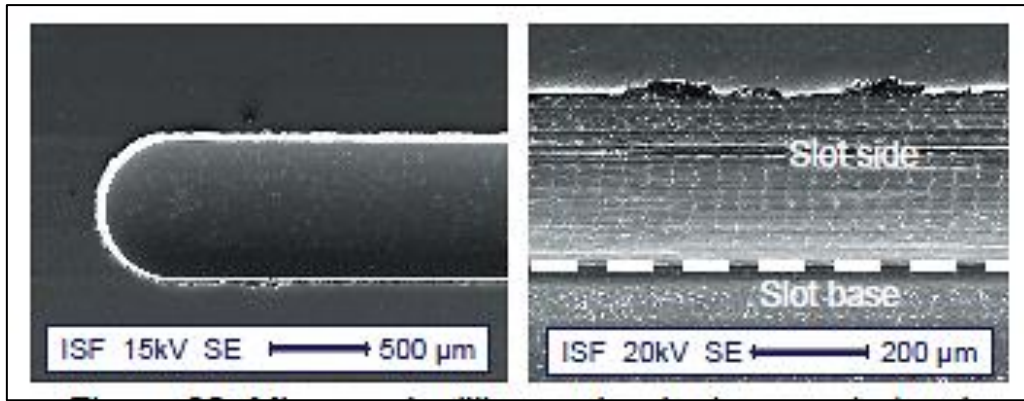
Η συνήθης παροχή για λίπανση εν γένει δεν είναι κατάλληλη για τις μικροκατεργασίες. Πρώτα, η πίεση της ροής λιπαντικών μπορεί να επηρεάσει τη συμπεριφορά του κοπτικού εργαλείου. Δεύτερον, ακόμη και με αμελητέα παροχή ή κατάλληλο έλεγχο της παροχής, η απομάκρυνση της περίσσειας εργαζόμενου μέσου μετά τη μικροκατεργασία είναι πρόκληση. Κατά συνέπεια, απαιτείται ειδική φροντίδα για τη λίπανση, την ψύξη και την απομάκρυνση των αποβλίττων και των καταλοίπων κατά τη διάρκεια της μικροκατεργασίας.

Στην Εικόνα 4.4 παρουσιάζεται η ποιότητα επιφάνειας και άκρων υπό δύο διαφορετικές συνθήκες λίπανσης: (a) ελάχιστη ποσότητα λίπανσης και (b) ξηρή . Προεξοχές σχηματίζονται μόνο στο άκρο του ορύγματος υπό συνθήκες ελάχιστης ποσότητας λίπανσης, ενώ προεξοχές εμφανίζονται σε όλο το μήκος του ορύγματος υπό ξηρές συνθήκες. Η ποιότητα επιφάνειας των πλευρικών τοιχωμάτων είναι πολύ καλύτερη και η προσκόλληση του αποβλίττου στην επιφάνεια του εργαλείου είναι πολύ μικρότερη υπό συνθήκες ελάχιστης ποσότητας λίπανσης. Προφανώς, η λίπανση ελάχιστης ποσότητας αποδίδει καλύτερα σε φρεζάρισμα μικροάκρου υλικών NiTi [89].



Εικόνα 4.4: Πειράματα φρεζαρίσματος μικροάκρου υπό συνθήκες ελάχιστης ποσότητας λίπανσης και ξηρές συνθήκες (υλικό κατεργασίας: NiTi κράμα με μνήμη σχήματος, ταχύτητα κοπής: $V_c=33$ m/min, βάθος κοπής: $a_p=10\mu\text{m}$, πλάτος κοπής $a_e=40\mu\text{m}$, πρόωση $f_z=12$ μm , επιστοιχειωμένο καρβίδιο με επένδυση TiAlN, $d=400$ μm) [89]

Πρόσφατα, έχουν εφαρμοσθεί αρκετά μη συμβατικά υγρά κοπής στις μικροκατεργασίες. Ο ξηρός πάγος (CO_2) είναι πολλά υποσχόμενος στη μικροκατεργασία υλικών NiTi (Εικόνα 4.5). Ο κατάλληλος συνδυασμός απόστασης ακροφυσίου, πίεσης παροχής και μεθόδου παροχής (συνεχής ή διακοπτόμενη) για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων στην κατεργασία βρίσκεται από διερεύνηση.



Εικόνα 4.5: Φρεζάρισμα μικροάκρου υπό παροχή ξηρού πάγου (υλικό κατεργασίας: NiTi κράμα με μνήμη σχήματος, ταχύτητα κοπής: $V_c=19$ m/min, βάθος κοπής: $a_p=10\mu\text{m}$, πλάτος κοπής $a_e=10\mu\text{m}$, πρόωση $f_z=20$ μm , επιστοιχειωμένο καρβίδιο με επένδυση TiAlN, $d=400$ μm , απόσταση ακροφυσίου: 80mm, διακοπτόμενη παροχή ξηρού πάγου) [89]

Οι Bissacco et al. [90] ερεύνησαν την επίδραση του εργαζόμενου υγρού στην ακρίβεια της μικροκατεργασίας. Τα εμπορικά διαθέσιμα μικροεργαλεία ακριβείας έχουν διακριτική ικανότητα μέχρι 1 nm σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής μέχρι 100000 rpm, αλλά η πρακτική τους ακρίβεια μειώνεται, όταν λαμβάνεται υπόψη η θερμική παραμόρφωση. Στα επίπεδα αυτά, μια μικρή αντιστάθμιση μπορεί να συμβάλει σε σημαντικά σφάλματα. Σφάλματα μπορούν επίσης να προκληθούν και από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του υγρού κοπής και του άξονα περιστροφής.

4.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση φθοράς μικροεργαλείων

Το μικρό βάθος κοπής στις μικροκατεργασίες αυξάνει σημαντικά την τριβή μεταξύ του εργαλείου και του υλικού κατεργασίας, οδηγώντας σε ανάπτυξη θερμότητας και δημιουργία φθοράς. Ως αποτέλεσμα, η αυξημένη ακτίνα του εργαλείου μειώνει την ποιότητα του παραγόμενου εξαρτήματος και επιταχύνει την ενδεχόμενη αστοχία του εργαλείου. [111,112] Επιπλέον, η δημιουργία συμπιεσμένου αποβλίττου στις μικροκατεργασίες είναι πολύ σημαντική, σε αντίθεση με τις μακροκατεργασίες, μιας και δεν μπορεί να εφαρμοσθεί πάντα για την αφαίρεση του αποβλίττου από εξαρτήματα μινιατούρες.

Ενώ η παρακολούθηση της φθοράς του εργαλείου έχει μελετηθεί εκτενώς στη μακροκλίμακα, η έρευνα στο αντίστοιχο πεδίο στη μικροκλίμακα είναι

αρκετά πίσω. Οι Tansel et al. [113,114] ανέπτυξαν νευρωνικά δίκτυα για την πρόβλεψη της φθοράς του εργαλείου χρησιμοποιώντας δεδομένα δύναμης κοπής και φθοράς. Τα νευρωνικά δίκτυα εκτίμησαν τη φθορά κατά τη μικροκατεργασία αλουμινίου και χάλυβα, με τα αποτελέσματα να δείχνουν μικρότερους ρυθμούς φθοράς για το αλουμίνιο σε σχέση με το χάλυβα. Αυτό το φαινόμενο συμφωνεί με τη φθορά του εργαλείου για τον κοπή μαλακού/ σκληρού υλικού κατεργασίας. Παρόλα αυτά, τα νευρωνικά δίκτυα ως προσέγγιση απαιτούν εκτενή όγκο πειραματικών δεδομένων και είναι συχνά αναξιόπιστα για διάφορα υλικά και συνθήκες κοπής. Οι Rahman et al. [115] μελέτησαν το μικροφρεζάρισμα χαλκού. Συμπέραναν ότι η φθορά εργαλείου διαμέτρου 1 mm εξαρτάται από τη γωνία ελίκωσης και το βάθος κοπής. Τα πειράματα έδειξαν ότι για βάθος κοπής 0,15 mm ο ρυθμός φθοράς είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τον αντίστοιχο για βάθος κοπής 0,25 mm. Το φαινόμενο αυτό ερμηνεύτηκε με βάση τη συνεχή δημιουργία αποβλίττου, το οποίο αφαιρείται από την ελίκωση του μικροεργαλείου, αυξάνοντας έτσι τη δύναμη στη γωνία κοπής.

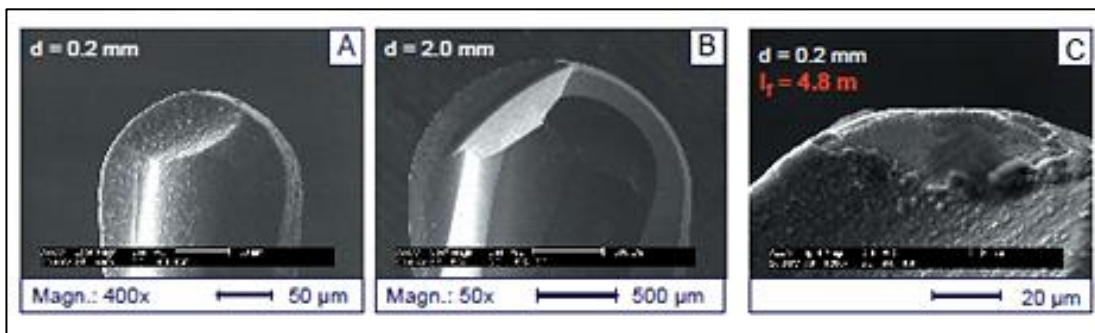
Οι Parkash et al. [116] μελέτησαν τη φθορά σε επικαλυμμένες φρεζομηχανές και βρήκαν ότι η φθορά του άκρου της κοπτικής ακμής είναι η μεγαλύτερη, και ότι η πρόωση και η ταχύτητα κοπής έχουν σημαντική επίδραση στο μικροεργαλείο σε σχέση με το αξονικό βάθος κοπής. Έτσι όσο προχωρά η φθορά του εργαλείου, η κοπτική ακμή του εργαλείου γίνεται επίπεδη. Η επίπεδη αυτή περιοχή της ακμής του εργαλείου μπορεί να παρακολουθηθεί με ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Παρόλα αυτά, αυτή η μέθοδος περιορίζεται από το μεγάλο μέγεθος και το δύσκολο χειρισμό του SEM. Η Mitsubishi [117] διερεύνησε τη σχέση μεταξύ της πίεσης του ψυκτικού και της φθοράς του εργαλείου στις μικροκατεργασίες. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ των δύο.

Στο φρεζάρισμα, η κινηματική του εργαλείου καθώς εξέρχεται από το υλικό κατεργασίας επηρεάζει σημαντικά τη διαμόρφωση του αποβλίττου λόγω πλαστικής παραμόρφωσης των αποβλίττων σε αντίθεση με τη διάτμηση τους [118] Οι Schaller et al. [119] μελέτησαν τρόπους απομάκρυνσης αποβλίττων από εξαρτήματα ορείχαλκου και ανοξείδωτου χάλυβα. Για την ελαχιστοποίηση των αποβλίττων, επικάλυψαν τον ορείχαλκο με κυανοοακρυλικό πολυμερές υλικό, το οποίο γέμισε τις ρωγμές και τις κοιλότητες στις άκρες του υλικού κατεργασίας, όπου διαμορφώνεται το απόβλιττο, επιτρέποντας στο κοπτικό εργαλείο να έρχεται σε επαφή μόνο

με το κυανοακρυλικό στρώμα. Μετά την κατεργασία, το κυανοακρυλικό στρώμα αφαιρείται με ακετόνη σε υπερηχητικό λουτρό. Για τον ανοξείδωτο χάλυβα, χρησιμοποίησαν ηλεκτροχημική στίλβωση για την αφαίρεση των αποβλίττων, η οποία βέβαια κρίνεται απαραίτητη αλλά ιδιαίτερος δαπανηρή.

Όσον αφορά στη μικροδιάτρηση, τα εμπορικά διαθέσιμα μικροδράπανα είναι συνήθως της τάξης των 50 μm σε διάμετρο, και έχουν παρόμοια γεωμετρία με τα συμβατικά δράπανα. Τα επίπεδα δράπανα με απλοποιημένες γεωμετρίες είναι πιο συνήθη για διαμέτρους μικρότερες από 50 μm .

Η κατασκευή των μικροεργαλείων είναι μια ακόμα πρόκληση στις μικροκατεργασίες. Η μη ακριβής γεωμετρία και η μη κανονικότητα των εργαλείων συχνά αναιρούν τα πλεονεκτήματα του ελέγχου λείαν υψηλής ακρίβειας, τα υπερσύγχρονα εργαλεία κατεργασίας και τον εξαιρετικά λεπτομερή προσδιορισμό των παραμέτρων της κατεργασίας. Στις Εικόνες 4.6 a-c παρουσιάζεται η απόκλιση της γεωμετρίας του εργαλείου ως προς το μέγεθος του εργαλείου. Όσο το μέγεθος του εργαλείου μειώνεται από 2 mm σε 0.2 mm, η απόκλιση της γεωμετρίας του δεδομένου εργαλείου από το εργαλείο σχεδιασμού αυξάνεται. Επίσης, η επίδραση της κλιμάκωσης παίζει σημαντικό ρόλο στη φυσική της κατεργασίας, η οποία συνδέεται στενά με το μηχανισμό κοπής, και προκαλούνται από αλλαγή της γεωμετρίας του εργαλείου κατά τη διάρκεια της κοπής.



Εικόνα 4.6: Επίδραση κλιμάκωσης στη γεωμετρία του εργαλείου και στη φθορά (υλικό κατεργασίας: 40CrMnMo7, 50 HRC, ταχύτητα κοπής $V_c=200/100$ m/min, βάθος/ πλάτος κοπής: $a_p= a_e=0.04*d$, πρόωση $f_z=0.01*d$, υλικό εργαλείου επιστοιχειωμένο καρβίδιο με επένδυση TiAlN, $d=400$ μm) [89]

Η διάρκεια ζωής του εργαλείου είναι δύσκολο να χαρακτηριστεί, ειδικά όταν η τιμή της πρόωσης ανά δόντι είναι μεγάλη. Οι Tansel et al. [91,92]

προσπάθησαν να μελετήσουν την σχέση μεταξύ της φθοράς και της τάσης στο στέλεχος του εργαλείου. Υπέθεσαν ότι οι δυνάμεις κοπής στο μικροάκρο φρεζαρίσματος είναι παρόμοιες με εκείνες των συμβατικών κατεργασιών, αλλά οι μηχανισμοί φθοράς είναι διαφορετικοί. Ο πρώτος μηχανισμός που προτάθηκε είναι η απόφραξη αποβλίττου. Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, όταν προκύπτει η απόφραξη, οι δυνάμεις κοπής και οι τάσεις αυξάνονται γρήγορα και μπορούν να προκαλέσουν θραύση του εργαλείου σε μόλις μερικές περιστροφές. Ο μηχανισμός αυτός είναι πολύ απρόβλεπτος και προκύπτει εξαιρετικά γρήγορα. Αφότου το εργαλείο ξεκινά να φθείρεται, η θραύση λόγω κόπωσης αποτελεί θέμα λόγω της αυξημένης δύναμης κοπής και της τάσης στον άξονα του εργαλείου. Ο τελευταίος μηχανισμός που θεωρείται είναι η θραύση λόγω υπερβολικής τάσης. Η ιδέα είναι ότι η κοπτική ακμή χάνει την αιχμηρότητά της. Το εργαλείο δεν είναι πλέον σε θέση να απομακρύνει αρκετό υλικό ώστε να δημιουργήσει επαρκές κενό για την κεντρική διατομή του άξονα του εργαλείου και το εργαλείο ξεκινά να εκτρέπεται. Η εκτροπή αυτή σε συνδυασμό με τη σταθερή πρόωση δημιουργεί υπερβολική τάση η οποία οδηγεί σε αστοχία του εργαλείου. Οι διακυμάνσεις στη δύναμη κοπής κατά τη μικροκατεργασία αυξάνονταν συνεχώς κατά τη διάρκεια της κατεργασίας λόγω της αυξανόμενης φθοράς του εργαλείου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένδειξη φθοράς του εργαλείου.

Οι Chen και Ehmann [93] πραγματοποίησαν μελέτες φθοράς πάνω στη μικροδιάτρηση κομματιών χαλκού-εποξικού υλικού. Δημιουργήθηκε ένα μοντέλο διάρκειας ζωής δραπάνου βάσει των εξής ανεξάρτητων παραμέτρων: πρόωση, ταχύτητα περιστροφής, λόγος πλευρών και λόγος χαλκού προς εποξικό υλικό. Βρέθηκε ότι η αύξηση οποιασδήποτε από τις παραμέτρους αυτές προκαλεί μείωση στη διάρκεια ζωής. Ο παράγοντας με την πιο χαλαρή εξάρτηση είναι ο λόγος χαλκού-εποξικού υλικού.

Οι Sugano et al. [94] μελέτησαν τα εργαλεία από μονοκρύσταλλο διαμαντιού και την επίδρασή τους στη μικροτραχύτητα και τις παραμένουσες τάσεις των επιφανειακών στρωμάτων υπό διάφορες συνθήκες κατεργασίας. Βρήκαν ότι η φθορά του εργαλείου διαμαντιού έχει μικρή επίδραση στη μικροτραχύτητα. Οι Fang et al. [89] μελέτησαν τις σχέσεις μεταξύ της γεωμετρίας του εργαλείου και της ζωής του εργαλείου (με εστίαση στη θραύση του εργαλείου) στο μικροφρεζάρισμα με χρήση ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων και κατέληξαν στο ότι ο κωνικός

σχεδιασμός εργαλείου είναι ο βέλτιστος για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής εργαλείου και απόδοση.

Οι Godlinski et al. [95] προσπάθησαν να ελαχιστοποιήσουν τη φθορά του εργαλείου βελτιστοποιώντας το υλικό του εργαλείου και τη μικροδομή τους. Χρησιμοποίησαν μια διαδικασία συσσωμάτωσης δύο βημάτων σε κόνη αλούμινας πολύ λεπτής δομής ώστε να αποφευχθεί η θραύση μεταξύ των κόκκων. Το εργαλείο αυτό παρουσίασε μεγαλύτερη αντίσταση στη φθορά.

Γενικά, τα μικροεργαλεία χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής, οι οποίες προκαλούν προβλήματα δονήσεων. Ο Huang [96] μελέτησε τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατεργασίας μικροδιάτρησης και προέκυψε ότι η φυσική συχνότητα της μικροδιάτρησης μειώνεται, καθώς αυξάνεται η δύναμη ώσης. Επίσης, η ακαμψία του μικροεργαλείου είναι σημαντική όταν κατασκευάζουμε τμήματα υψηλής ακρίβειας.

Συμπερασματικά μπορεί να αναφερθεί ότι το κίνητρο για τη χρησιμοποίηση μικροκατεργασιών υψηλών ταχυτήτων είναι η μείωση του χρόνου κατασκευής σύνθετων τρισδιάστατων σχημάτων μέσω αύξησης του ρυθμού αποβολής υλικού. Σημαντικό βήμα προς αυτό την κατεύθυνση είναι η κατανόηση της σχέσης μεταξύ του εργαλείου μικροκοπής και του υλικού κατεργασίας για την κατασκευή του επιθυμητού εξαρτήματος. Η πρόβλεψη της δύναμης κοπής και η μέτρηση της απαιτούν ιδιαίτερους και προσεκτικούς χειρισμούς. Η αύξηση της παραγωγικότητας σε διαδικασίες μικροφρεζαρίσματος απαιτούν πάχος αποβλίττου μεγαλύτερο από το ελάχιστο πάχος αποβλίττου, με ταυτόχρονη μείωση της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού κατεργασίας από το εργαλείο. Αν δεν μπορεί να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να βελτιωθεί ο σχεδιασμός του εργαλείου για να αυξηθεί η αντοχή και η ακαμψία του για να επιτρέπει και πιο δύσκολες συνθήκες κοπής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μελλοντικές Προοπτικές

Στον τομέα των μελλοντικών εξελίξεων γίνεται προσπάθεια ώστε η μικρο-μεσο-κλίμακα να μπορέσει να γεφυρώσει το κενό μεταξύ της περιοχής της μικροκλίμακας με αυτής της μακροκλίμακας. Η συγκεκριμένη έρευνα είναι ιδιαίτερα σημαντική για την κατασκευή λειτουργικών συσκευών και διατάξεων μέσα από ευρεία γκάμα υλικών.

Μικροεργαλεία και μηχανήματα

Το μικροεργαλεία προσδιορίζουν το μέγεθος των χαρακτηριστικών των μικροτμημάτων. Αν η διάμετρος των μικροεργαλείων μπορεί να μειωθεί ακόμη περισσότερο, ώστε το μέγεθος των μινιατούρων να είναι συγκρίσιμο με αυτό που παράγεται από τις λιθογραφικές τεχνικές. Μιας και η παραγωγικότητα περιορίζεται από την πρόωση, και με την αστοχία του εργαλείου και τη φθορά του να είναι από του κυρίαρχους περιορισμούς, πρέπει να αναπτυχθούν εργαλεία με μεγαλύτερη ακαμψία και αντίσταση σε φθορά, ώστε να υπάρχει δυνατότητα διεύρυνσης και ευελιξίας όσον αφορά τις παραμέτρους λειτουργίας της κατεργασίας, επιτρέποντας δημιουργία αποβλίττου, ενώ θα ελαχιστοποιεί την αστάθεια. Έχουν καταβληθεί προσπάθειες για την κατασκευή μη συμβατικών εργαλείων κάτω από 50 μm, χρησιμοποιώντας ακριβές συσκευές παραγωγής, όπως εστιασμένες δέσμες ιόντων. Επειδή τα μικροεργαλεία χρειάζονται συχνή αντικατάσταση, είναι σημαντική προτεραιότητα λοιπόν η ανάπτυξη νέων μεθόδων για την παραγωγή ποιοτικών και συμφερούσων λύσεων.

Τα κέντρα μικροκατεργασίας έχουν τη μοναδική δυνατότητα να παράγουν μικροτμήματα που μπορεί να είναι ευέλικτα και συμφέροντα από οικονομικής άποψης, δεδομένου ότι η ακαμψία και ο λόγος απόσβεσης τους είναι συγκρίσιμα με αυτές των τεχνικών υπερ υψηλής ακρίβειας. Αυτό επιτυγχάνεται με χρησιμοποίηση προηγμένων υλικών, μοναδικών σχεδίων, και την ανάπτυξη αισθητήρων και επενεργητών. Επιπροσθέτως, πρέπει να γίνει έρευνα στον τομέα των θερμοκρασιών κατά την κατεργασία, μιας και επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια των μικροεξαρθημάτων. Δυστυχώς για

τη μοντελοποίηση των διαδικασιών παραγωγής δεν υπάρχει κοινός κώδικας και αρχιτεκτονική ελέγχου συστήματος παρόμοια με τα μηχανήματα CNC. Με τις τωρινές συνθήκες, τα μικροεργαλεία ελέγχονται και ρυθμίζονται σύμφωνα με τον κατασκευαστή τους. Είναι εμφανής η ανάγκη προτυποποίησης των μικροεργαλείων, ώστε να μεγιστοποιηθεί η ευελιξία, η χρησιμότητα και η λειτουργικότητά τους.

Ένας άλλος παράγοντας που αφορά τις μικροκατεργασίες είναι οι επιπτώσεις στην υγεία των χειριστών τους. Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει να διασφαλίζεται η διεξαγωγή κατεργασιών σε κλειστά περιβάλλοντα με συστήματα αποβολής σκόνης. Μιας και τα απόβλιττα όσο πάνε και γίνονται μικρότερα, η αερομεταφερόμενη μικροσκόνη μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικά προβλήματα. Το τυπικό μέγεθος της μικροσκόνης είναι λίγα μικρόμετρα, έτσι είναι σημαντική η ενσωμάτωση συστημάτων ρόφησης και φιλτραρίσματος για μικροκατεργασίες.

Βελτιώσεις στον τομέα των Μικροκοπών

Για τη μικροκοπή σημαντική βελτίωση θα αποτελούσε η μελέτη και ανάπτυξη μοντέλων για την ακριβή πρόβλεψη των διαδικασιών μικροκοπής. Η πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής επιτρέπει την επιλογή βέλτιστης πρόωσης ώστε να διασφαλιστεί μέγιστη αποβολή αποβλίττου χωρίς αστάθεια, ενώ παράλληλα επιτρέπει συμμόρφωση του εργαλείου όσον αφορά την παραμόρφωσή του, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η φθορά του εργαλείου. Πολλοί ερευνητές έχουν αναπτύξει μοντέλα δημιουργίας αποβλίττου, για διάφορα υλικά και συνθήκες κοπής, για την ποσοτικοποίηση του απαραίτητου ελάχιστου πάχους αποβλίττου και για τη δημιουργία αποβλίττου αντί ελαστικής παραμόρφωσης. Η λεπτομερής έρευνα θα πρέπει να προσανατολιστεί στη διερεύνηση της επίδρασης παραγόντων, όπως, η απόκλιση, η ελαστική-πλαστική συμπεριφορά, η φθορά του εργαλείου και η θερμική διαστολή, αλλά και συνδυασμός αυτών.

Ένας άλλος παράγοντας προς βελτίωση των μικροεξαρτημάτων είναι η ομοιομορφία και η συνεκτικότητά τους. Μιας και το κόστος των υλικών των μικροεξαρτημάτων είναι σχετικά μικρότερο σε σχέση με αυτών των μακροκατεργασιών, πρέπει να ερευνηθούν μέθοδοι ομογενοποίησης για την επεξεργασία των υλικών κατεργασίας, όπως είναι τα μεταλλικά κράματα, τα πλαστικά και τα κεραμικά.

Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο

Η παρακολούθηση και η μέτρηση των διαδικασιών είναι ιδιαίτερα σημαντική ειδικά σε πολύ υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Στις παρούσες συνθήκες, τα μικροκατεργασμένα προϊόντα και εργαλεία γενικά παρακολουθούνται εκτός σύνδεσης, χρησιμοποιώντας ειδικά όργανα (πχ. SEM), τα οποία προϋποθέτουν ακριβό εξοπλισμό και εξειδικευμένο προσωπικό να τα χειρίζεται. Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, σε περιπτώσεις όπως, αστοχίας του εργαλείου, εντοπισμού φθοράς, κραδασμών και προσαρμοστικού ελέγχου για την αύξηση του χρόνου ζωής του εργαλείου, ελαχιστοποίηση των ανοχών σε παραβιάσεις και βελτίωση της ποιότητας και της παραγωγικότητας. Όλα αυτά μπορούν επιτευχθούν χρησιμοποιώντας ακριβείς και αξιόπιστους αισθητήρες σημάτων με μεγάλο εύρος ζώνης.

Δοκιμές/Διασφάλιση ποιότητας

Η πειραματική μοντελοποίηση και δοκιμή μικροεξαρτημάτων είναι ιδιαίτερως σημαντική για τη δημιουργία λειτουργικών συσκευών. Λόγω του πολύ μικρού μεγέθους τους, στις μινιατούρες δεν είναι εύκολα προσδιορίσιμες οι ατέλειές τους. Η εξέταση της ακρίβειας και της ποιότητας της επιφάνειας των μινιατούρων επιτυγχάνεται μόνο με προηγμένα οπτικά συστήματα. Επίσης είναι αναγκαία η ανάπτυξη τεχνικών προ- και μετα – επεξεργασίας, καθώς και συναρμολόγησης, για τη διασφάλιση του σωστού ελέγχου, χειρισμού και σύσφιξης.

Εξάλλου μερικά μακρο-φαινόμενα υιοθετήθηκαν και στη μικροκλίμακα, όχι όμως χωρίς δυσκολίες. Είναι σημαντικό λοιπόν, η εφαρμογή της γνώσης της μακροκλίμακας και η ενσωμάτωση της στη μικροκλίμακα, όπου είναι απαραίτητο, να γίνεται με τρόπο ώστε οι μικροκατεργασίες να γίνουν πιο ευέλικτες και παραγωγικές. Η μοναδική δυνατότητα της μικρομηχανικής κοπής για την παραγωγή τρισδιάστατων σχημάτων αρκετά οικονομικά, παρέχει νέες δυνατότητες και εφαρμογές. Η ολοκλήρωση και βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, της παραγωγής, της συναρμολόγησης και του ελέγχου λειτουργικών και ποιοτικών τρισδιάστατων μικροσυστημάτων αποτελεί πρόκληση.

Βιβλιογραφία

1. V. C. Venkatesh, Sudin Izman, Precision Engineering, Faculty of Engineering & Technology, Multimedia University Melaka, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 2007.
2. George E. Dieter, Mechanical Metallurgy, 3rd edition, McGraw – Hill Book Company: London, 1988
3. Δ. Μανωλάκος, Σημειώσεις μαθήματος «Κατεργασίες 1».
4. Δ. Μανωλάκος, Σημειώσεις μαθήματος «Κατεργασίες 2».
5. Γ. Βοσνιάκος, Σημειώσεις μαθήματος «Εργαλειομηχανές».
6. Α. Μαρκόπουλος, «Μικροκατεργασίες», Αθήνα, 2005
7. The Hong Kong Polytechnic University, Machining & Metrology Unit.
8. Bert P. Erdel, "High-Speed Machining", Society of Manufacturing Engineers, 2003
9. J. Paulo Davim, "Machining: Fundamentals and Recent Advances", Springer, Αζήλα 2008
10. Λαζαρίδη Λ., «Μηχανουργική Τεχνολογία», Ίδρυμα Ευγενίδου, 1997.
11. Μαρκόπουλος Α. , «Κατεργασίες αποβολής υλικού λίαν υψηλής ακρίβειας», Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2006.
12. Li Qian, Mohammad Robiul Hossan, "Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts", Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, 2007, pages 274-278.
13. M. Nouari, A. Molinari, "Experimental verification of a diffusion tool wear model using a 42CrMo4 steel with an uncoated cemented tungsten carbide at various cutting speeds", Journal of Wear, Elsevier, 2004, pages 1151-1159.
- A. Ginting, M. Nouari, "Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Elsevier, 2004, pages 758-768.
14. Dr. Saad Kariem Shather, "Studying the Effect of Tool Nose Radius on Workpiece Run Out and Surface Finish", Eng. & Tech Journal, 2008, pages 256-261.
15. J. Chae, S.S. Park, T. Freiheit, Investigation of micro-cutting operations, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006), 313–332.

16. Venkatesh, V.C. and Chandrasekaran, Experimental Techniques in Metal Cutting, Prentice Hall of India,1987.
17. <http://www.mitchellmckinney.com/high-speed-steel-cutting-tools.html>
18. Basha, M. and Venkatesh, V.C., "Metal cutting performance of sandwich carbide tools," Proc. 4th A.I.M.T.D.R. Conference, Madras, 1970, 181–193.
19. Venkatesh, V.C., Radhakrishnan, V. and Chandramowli, J., "Wear propagation in cutting tools," Annals of C.I.R.P., Vol. XVII, 317–323.
20. Carson, W.W., et al., Enhancement of Cemented Tungsten Carbide Tool Properties, N.S.F. Report (GK 29379), M.I.T., 1973, 269–347.
21. www.sparkedm.com
22. www.vtd.de
23. Stephenson, D.A. and Agapiou, J.S., Metal Cutting Theory and Practice, Marcel Dekker, Inc., New York,158–159.
24. Thomas, J.D., "Ceramic tools—find new applications," Manufacturing Engineering, May 1985, 34–39.
25. DeBeers Diamond Division, Introduction to PCD and PCND Cutting Tool Materials, Berkshire, UK, 1993.
26. Davis, R.F., Diamond Films and Coating, Noyes Publications, USA, 1993.
27. Chou, Y.K. and Evans, C.J., "Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting," Wear, 1999, 234–245
28. Greenleaf Corporation, The Application of Whisker Reinforced Ceramic/Ceramic Composites, Saegertown, PA, USA, 1989.
29. Cutting tool materials, MET-276 Machining Technology, University of Petroleum and Minerals.
30. L.N. López de Lacalle et al, Advanced Cutting Tools, Department of Mechanical Engineering.
31. Eng R. L. Nkumbwa, Cutting Tool Materials, Copperbelt University, 2010.
32. Για εικόνα → M. P. Groover, "Fundamentals of Modern Manufacturing, John Wiley & Sons, Inc., 2002
33. <http://www.mitchellmckinney.com/high-speed-steel-cutting-tools.html>
34. F. Klocke, Cutting materials, tools and coolants for machining with geometricallydefined cutting edges – part 1, Manufacturing Technology I, Laboratory for Machine Tools and Production Engineering
35. www.advancedcarbide tooling.co.uk
36. Xiaozhou Li, Huadong Yu and Jinkai Xu,2009, "Model of Micro-cutting and Analysis of Micro Cutting Force", Proceedings of the2009 IEEE International

- Conference on Mechatronics and Automation, August 9 - 12, Changchun, China.
37. K.S. Woon, M. Rahman, F.Z. Fang, K.S. Neo and K. Liu, 2008, "Investigations of tool edge radius effect in micromachining: A FEM simulation approach", journal of materials processing technology.
 38. Kai Liu, 2005, "Process modeling of micro-cutting including strain gradient effects", Georgia Institute of Technology.
 39. W. R. Backer, E. R. Marshall, and M. C. Shaw, 1952, "The size effect in metal cutting", Trans. of ASME, pp. 74-61.
 40. J. Larsen-Basse and P.L.B. Oxley, 1973, "Effect of strain rate sensitivity on scale phenomena in chip formation", Proceedings of the 13th International Machine Tool Design & Research Conference, University of Birmingham, pp. 209-216.
 41. E. M. Kopalinsky and P.L.B. Oxley, 1984, "Size effects in metal removal processes", Institute of Physics Conference Series, n70, 1984, pp. 389-396.
 42. K. Nakayama and K. Tamura, 1968, "Size effect in metal-cutting force", American Society of Mechanical Engineers, 67-Prod-9, 1967, 8p.
 43. K.W. Kim, W.Y. Lee and H.C. Sin, 1999, "A finite element analysis of machining with the tool edge considered", J. of Mat. Proc. Tech., 86, pp. 45-55.
 44. D. A. Lucca, R.L. Rhorer, and R. Komanduri, 1993, "Effect of tool edge geometry on energy dissipation in ultraprecision machining", Annals of the CIRP, 42(1), pp.83-86.
 45. E.J.A. Armarego and R.H. Brown, 1962, "On the size effect in metal cutting", International Journal of Production Research., 1, n3, pp. 75-99.
 46. A.G. Atkins, 2003, "Modeling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanations for some longstanding problems", Int. J. of Mech. Sci., 45, pp. 373-396.
 47. V. Senthilkumar, S. Muruganandam, State of the Art of Micro Turning Process, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 2, Issue 2, February 2012.
 48. M.A.Rahman, M.Rahman, A.Senthil Kumar, H.S.Lim, A.B.M.A.Asad, "Fabrication Of Miniature Components Using Microturning", Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering 2003(ICME2003), Dec 2003, 1-6.
 49. McGeough J, Micromachining of engineering materials, Dekker, New York, 2002, iii – iv.

50. Alberto Herrero, Igor Goenaga, Sabino Azcarate, Luis Uriarte, Atanas Ivanov, Andrew Rees, Christian Wenzel and Claas Muller, "Mechanical Micro-Machining Using Milling, Wire EDM, Die-Sinking EDM and Diamond Turning", *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 52, 2006, 484-494.
51. Masuzawa, T. and H.K. Tonshoff. "Three-Dimensional Micromachining by Machine Tools", *Annals of the CIRP*, 46/2, 1997, 621-628.
52. M.A.Rahman, M.Rahman, A.Senthil Kumar, H.S.Lim, A.B.M.A.Asad, "Fabrication Of Miniature Components Using Microturning", *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering 2003(ICME2003)*, Dec 2003, 1-6.
53. Groover, M. P., *Fundamentals of Modern Manufacturing*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2010, pp. 484.
54. Masuzawa, T. State of the Art of Micromachining, *Annals of the CIRP*, 49/2, 2000, 473-488.
55. Lim, H.S., A. Senthil Kumar and M. Rahman. Improvement of Form Accuracy in Hybrid Machining of Microstructures, *Journal of Electronic Materials*, 31, 2002, 1032-1038.
56. Lu, Z. and Takeshi Yoneyama. Micro cutting in the micro lathe turning system, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39, 1999, 1171-1183.
57. K.M. Rezaur rehman, M. Rahamn, K.S. Neo, M. Sawa, Y. Maeda, "Micro grooving on electroless nickel plated materials using a single crystal diamond tool", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, 2006, 911-917.
58. Choudhury, I.A., El-Baradie, M.A.: Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments. *J. Mater. Process. Technol.* 67(1-3), 1997, 55-61.
59. Oezel, T., Karpat, Y., "Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks", *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 45(4-5), 2005, 467-479.
60. Kai Liu, Shreyes N. Melkote, "Effect of plastic side flow on surface roughness in micro-turning process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol 46, 2006, 1778-1785.
61. K.A.Mahajan, Dr. M. Sadaiah and S. H. Gawande, "Experimental investigations of surface roughness on OFHC copper by diamond turning machine", *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2(10), 2010, 5215-5220.

62. K.C. Chan, C.F. Cheung, M.V. Ramesh, W.B. Lee, S. To, "A theoretical and experimental investigation of surface generation in diamond turning of an Al6061/SiCp metal matrix composite", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol 43, 2001, 2047–2068.
63. M. Azizur Rahman, M. Rahman, A. Senthil Kumar, H.S. Lim, "CNC microturning: an application to miniaturization", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, 2005, 631–639.
64. JiwangYan , ZhiyuZhang,TsunemotoKuriyagawa, "Mechanism for material removal in diamond turning of reaction-bonded silicon carbide", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, 2009, 366–374.
65. Zhiyu Zhang & Jiwang Yan & Tsunemoto Kuriyagawa, "Study on tool wear characteristics in diamond turning of reaction-bonded silicon carbide", *Int J Adv Manuf Technol*, 57, 2011, 117–125.
66. M. Aruna, V. Dhanalakshmi and S. Mohan, "Wear analysis of ceramic cutting tools in finish turning of INCONEL 718", *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2(9), 2010, 4253-4262.
67. Zhiyu Zhang & Jiwang Yan & Tsunemoto Kuriyagawa, "Study on tool wear characteristics in diamond turning of reaction-bonded silicon carbide", *Int J Adv Manuf Technol*, 57, 2011, 117–125.
68. Zinan Lu, Takeshi Yoneyama, "Micro cutting in the micro lathe turning system", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol 39, 1999, 1171–1183.
69. Kohichi Miura, Takazo Yamada and Hwa-Soo Lee, "Study on Turning of Micro Shaft : Control of Thrust Force Considering Vickers Hardness of Workpiece(Advanced machining technology)", *Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century : LEM21 2009(5)*, 347-352.
70. M. Azizur Rahman, M. Rahman, A. Senthil Kumar, H.S. Lim and A.B.M.A. Asad, "Development of micropin fabrication process using tool based micromachining", *Int J Adv Manuf Technol*, 27, 2006, 939–944.
71. W B Lee, C F Cheung and S To, "Friction-induced fluctuation of cutting forces in the diamond turning of aluminium single crystals", *Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part B: J. Engineering Manufacture, IMechE 2003*, 615-631.

72. F. Klocke, K. Gerschwiler, Mustapha Abouridouane, Size effects of micro drilling in steel, German Academic Society for Production Engineering, Prod. Eng. Res. Devel. (2009) 3:69–72.
73. Hoppe S (2004) Experimental and numerical analysis of chip formation in metal cutting. Dissertation, RWTH, Aachen
74. Klocke F, Lung D, Gerschwiler K, Risse K, Abouridouane M (2006) 3D modeling and scaling effects in drilling. In: Nineth CIRP international workshop on modelling of machining operations, Bled Slovinienpp. 263–269.
75. M. Rahman, A. Senthil Kumar, J.R.S. Prakash, Micro milling of pure copper, Journal of Materials Processing Technology 116 (2001), 39-43.
76. W. Koing, K. Kutzner, U. Schehl, Tool monitoring of small drills with acoustic emission, Int. J. Mac Tool. Manuf. 32 (1992), 487-493.
77. X.S Li, I.M. Low, Cutting forces of ceramic cutting tools, Key Eng. Mater. 96 (1994), 81-136.
78. Xuance Zhou, Qingshun Bai, Kai Yang, Zhi Luo, Relationship between Cutting Temperature and Cutting Parameters of Micro-milling, World Academy of Science, Engineering and Technology 46 2010, 568-571.
79. J. Chae, S.S. Park, T. Freiheit, Investigation of micro-cutting operations, International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006), 313–332.
80. Y. Altintas, Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
81. Y. Yao, X.D. Fang, G. Amdt, Comprehensive tool wear estimation in finish-machining via multivariate time-series analysis of 3-D cutting forces, Annals of CIRP 39 (1990) 57–60.
82. R.K. Kountanya, W.J. Endres, Flank wear of edge-radiused cutting tools under ideal straight-edged orthogonal conditions, Journal of Manufacturing Science and Engineering 126 (2004) 496–505.
83. G. Byrne, D. Dornfeld, B. Denkena, Advancing cutting technology, Annals of CIRP (2003) 483.
84. X. Liu, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, K.F. Ehman, The mechanics of machining at the micro scale: assessment of the current state of the science, Journal of Manufacturing Science and Engineering 126 (2004) 666–678.
85. S.A. Tobias, W. Fishwick, A Theory of Regenerative Chatter, The Engineer, London, 1958.
86. S.A. Tobias, Machine Tool Vibrations, Blackie and Sons, Glasgow, 1965.

87. C.J. Kim, J. Rhett Mayor, J. Ni, A static model of chip formation in micro scale milling, ASME 126 (2004) 710–718.
88. Dornfeld David, (2006) Recent advances in Mechanical Micromachining, Laboratory for Manufacturing and Sustainability, UC Berkeley.
89. Bissacco, G. Hansen H.N., De Chiffre, L. 2005, Micromilling of Hardened Tool Steel for Mould Making Applications, Journal of Materials Processing Technology, 167/2-3:201-207.
90. Tansel, I., Rodriguez, O., Trujillo, M., Paz, E., Li, W., 1998, Micro-End-Milling - I. Wear and Breakage, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 38/12:1419-1436.
91. Tansel, I.N., Arkan, T.T., Bao, W.Y., Mahendrakar, N., Shisler, B., Smith, D., McCool, M., 2000, Tool Wear Estimation in Micro-Machining. Part I: Tool Usage- Cutting Force Relationship, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40/4:599-608.
92. Chen, W.S., Ehmann, K.F., 1994, Experimental Investigation on the Wear and Performance of Micro- Drills, Proceedings of the 1994 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Tribology in Manufacturing Processes, Chicago, IL, USA, 30:145-157.
93. Sugano, T., Takeuchi, K., Goto, T., Yoshida, Y., 1987, Diamond Turning of an Aluminum Alloy for Mirror, CIRP Annals, 36/1:17-20. [161] Fang, F.Z., Wu, H., Liu, X.D., Liu, Y.C., Ng, S.T., 2003, Tool Geometry Study in Micromachining, Journal of Micromechanics and Microengineering, 13/5:726-731.
94. Godlinski, D., Grathwohl, G., Kuntz, M., 1999, Development of Ceramic Micro-Tools for Precision Machining, Proceedings of the EUSPEN, Bremen, Germany, 298-301.
95. Huang, B.-W., 2004, The Drilling Vibration Behavior of a Twisted Microdrill, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 126/4:719-726.
96. Lee, K., Dornfeld, D.A., 2002, An Experimental Study on Burr Formation in Micro Milling Aluminum and Copper, Transactions of the NAMRI/SME, 30:1-8.
97. Min, S., Lee, D., De Grave, A., De Oliveira Valente, C.M., Lin, J., Dornfeld, D., 2004, Surface and Edge Quality Variation in Precision Machining of Single Crystal and Polycrystalline Materials, Proceedings of the 7th International Conference on Deburring and Surface Finishing, Berkeley, CA, USA, 341-350.

98. Sugawara, A., Inagaki, K., 1982, Effect of Workpiece Structure on Burr Formation in Micro-Drilling, *Precision Engineering*, 4/1:9-14.
99. M.B. Jun, Modeling and Analysis of Micro-End Milling Dynamics, PhD Dissertation, University of Illinois Urbana-Champaign, 2005.
100. Y.B. Bang, K. Lee, S. Oh, 5-Axis micro milling machine for machining micro parts, *Advanced Manufacturing Technology* (2004).
101. Y. Okazaki, N. Mishima, K. Ashida, Microfactory-concept, history, and developments, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126 (2004) 837–844.
102. E. Kussul, T. Baidyk, L. Ruiz-Huerta, A. Caballero-Ruiz, G. Velasco, L. Kasatkina, Micromechanical engineering: a basis of the low-cost manufacturing of mechanical micro devices using micro equipment, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 6 (1996) 410–425.
103. E. Kussul, T. Baidyk, L. Ruiz-Huerta, A. Caballero-Ruiz, G. Velasco, L. Kasatkina, Development of micromachine tool prototypes for microfactories, *Journal*
104. S. Kalpakjian, S.R. Schmid, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Prentice-Hall, New Jersey, 2002.
105. S. Shabouk, T. Nakamoto, Micro machining of single crystal diamond by utilization of tool wear during cutting process of ferrous material, *Journal of Micromechatronics* 2 (1) (2003) 13–26.
106. Th. Schaller, L. Bohn, J. Mayer, K. Schubert, Microstructure grooves with a width of less than 50 mm cut with ground hard metal micro end mills, *Precision Engineering* 23 (1999) 229–235.
107. D.P. Adams, M.J. Vasile, G. Benavides, A.N. Cambell, Micromilling of metal alloy with focused ion beam-fabricated tools, *Journal of International Societies of Precision Engineering and Nanotechnology* 25 (2001) 107–113.
108. L. Alting, F. Kimura, H.N. Hansen, G. Bissacco, Micro engineering, *Annals of CIRP Keynote* (2003) STC-O.
109. M. Tanaka, Development of desktop machining microfactory, *Riken Review* 34 (2001) 46–49.
110. M. Xiao, K. Sato, S. Karube, T. Soutone, The effect of tool nose radius in ultrasonic vibration cutting of hard metal, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (2003) 1375–1382.
111. C.R. Liu, S. Mittal, Single-step super finish hard machining: feasibility and feasible cutting conditions, *Robotics Computer-Integrated Manufacture* 12 (1996) 15–27.

112. I.N. Tansel, T.T. Arkan, W.Y. Bao, N. Mahendrakar, B. Shisler, D. Smith, M. McCool, Tool wear estimation in micro-machining. Part 1; tool usage-cutting force relationship, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40 (2000) 599–608.
113. I.N. Tansel, T.T. Arkan, W.Y. Bao, N. Mahendrakar, B. Shisler, D. Smith, M. McCool, Tool wear estimation in micro-machining. Part 2: neural-network-based periodic inspector for non metals, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40 (2000) 609–620.
114. M. Rahman, S. Kumar, J.R.S. Prakash, Micro milling of pure copper, *Journal of materials Processing Technology* 116 (2001) 39–43.
115. J.R.S. Prakash, A. Senthil Kumar, M. Rahman, S.C. Lim, A model for predicting tool life for coated micro end mill Fourth International Machining and Grinding Troy, Michigan, 7–10 May, 2001.
116. Mitsubishi Co., Machining Performance using the Mitsubishi micro MZS drills with 2 coolant holes through
117. G. Byrne, D. Dornfeld, B. Denkena, Advancing cutting technology, *Annals of CIRP* (2003) 483.
118. Th. Schaller, L. Bohn, J. Mayer, K. Schubert, Microstructure grooves with a width of less than 50 mm cut with ground hard metal micro end mills, *Precision Engineering* 23 (1999) 229–235.
119. Swinehart, H. J., Cutting Tool Material Selection, American Society of Tool and Manufacturing Engineers, 1968.
120. Wentorf, R.H., Borazon, CBN and Man Made Diamond Compacts, *Ibid*, 511–524.
121. Horton, M.D. and Horton, L.B., "Grades of polycrystalline diamond," Proc. SME's Conference on Super abrasives '85, Chicago, April 1985, 1–9.
122. Clark, I.E. "PCD wood tools—a new design concept", *Woodworking*, 1993, Vol. 2, 73–76.
123. DeBeers Diamond Division, Introduction to PCD and PCDN Cutting Tool Materials, Berkshire, UK, 1993.
124. Venkatesh, V.C. and Enomoto, S., "Finishing methods using defined cutting edges," *ASM Handbook*, Vol. 5, Surface Engineering, 1994, 84–89.
125. Wentorf, R.H., Devries, R.C. and Bundy F.P., "Sintered super hard materials," *Science*, 1980, 208, 873–80.
126. Harris, T.K., Brookes, E.J. and Taylor, C.J., *Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2004, 22, 105–110.

*ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΑΚΡΟΚΟΣΜΟ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΟΣΜΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ
ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΤΟΥΣ*

127. Chou, Y.K. and Evans, C.J., "Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting," *Wear*, 1999, 234–245.
128. Diniz, A.E., and Gomes D.M., *Journal of Material Processing Technology*, 2004.
129. Avner, S.H., *Introduction to Physical Metallurgy*, McGraw Hill Co., 1974
130. Poulachon, G., Bandyopadhyoy, B.P. and Jawahir, I.S., *Wear*, 2004, 256, 302–310.