

# Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή στις μικροκατεργασίες	4
1.1 Εξέλιξη των μικροκατεργασιών	4
1.2 Ανάπτυξη μικροπροϊόντων	5
1.3 Τομείς Εφαρμογών	6
1.4 Μέθοδοι μικροκατεργασιών	7
1.4.1 Κατηγορίες Μεθόδων Μικροκατεργασίας	8
1.5 Παραδείγματα Μικροκατεργασιών	.10
2. Εισαγωγή στη μικροκοπή	.14
2.1 Φυσική της μικροκοπής	.15
2. Εφαρμογές	.17
2.3 Κατεργασίες μικροκοπής	.18
2.3.1 Μικροδιάτρηση	.20
2.3.2 Μικροφραιζάρισμα	.22
2.3.3 Μικροτόρνευση	.24
3. Τοπομορφία	.25
3.1 Ελάχιστο πάχος κοπής	.25
3.1.1 Επίδραση του ελάχιστου πάχους αποβλίττου στις δυνάμεις κοπής	.27
3.2 Μορφοποίηση αποβλίττου	.28
3.3 Τραχύτητα Επιφάνειας	.30
3.3.1 Επίδραση του ελάχιστου πάχους αποβλίττου στην τραχύτητα επιφάνειας	.31
3.3.2 Επίδραση της ταχύτητας κοπής στην τραχύτητα επιφάνειας	.32
3.3.3 Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας της κόψης στην τραχύτητα επιφάνειας	.33
4. Σχηματισμός Απολήξεων	.35
4.1 Τύποι Ξεθυμασμάτων	.35
4.2 Επίδραση του προσανατολισμού της μικροδομής του υλικού στο σχηματισμό	
απολήξεων	.39
4.2.1 Πειραματική Μελέτη σχηματισμού ξεθυμάσματος στο μικροφραιζάρισμα	.39
4.2.2 Πειραματική μελέτη σχηματισμού ξεθυμάσματος στη μικροδιάτρηση	.44
5. Δυνάμεις Κοπής	.48
5.1 Δυνάμεις κοπής και ειδική ενέργεια κοπής	.48
5.2 Δυνάμεις κοπής στο μικροφραιζάρισμα	.50
5.3 Ανάλυση δυνάμεων κοπής	.54
5.4 Σχέση ανάμεσα στις δυνάμεις κοπής και στην εμπλοκή του κοπτικού με το υλικό.	.56
5.5 Πειραματική μελέτη των δυνάμεων κοπής σε κατεργασίες μικροφραιζαρίσματος	.56
5.6 Πειραματική μελέτη των δυνάμεων κοπής σε κατεργασίες μικροδιάτρησης	.61

6. Μικροεργαλεία	66
6.1 Κοπτικά μικροεργαλεία από διαμάντι	66
6.2 Κοπτικά εργαλεία μικροφραιζαρίσματος	67
6.3 Κοπτικά εργαλεία μικροδιάτρησης	70
6.4 Φθορά μικροεργαλείων	73
6.4.1 Επίδραση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου στο μικροφραιζάρισμα	74
6.4.2 Πειραματική μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας των μικροεργαλείων στη φθορά	75
6.4.3 Σχέση φθοράς των μικροεργαλείων με τις δυνάμεις κοπής	79
7. Μοντελοποίηση	82
7.1 Μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (FEM)	83
7.2 Προσομοίωση μοριακής δυναμικής	87
7.3 Πολυδιάστατη μοντελοποίηση (Multiscale modeling)	91
7.4 Μηχανιστική μοντελοποίηση (Mechanistic modeling)	91
8. Συμπεράσματα	94
9. Βιβλιογραφία	95

## 1. Εισαγωγή στις μικροκατεργασίες

Η συγκεκριμένη εργασία φιλοδοξεί να παρουσιάσει την υπάρχουσα κατάσταση στις μικροκατεργασίες, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις μελλοντικές απαιτήσεις στην ανάπτυξη των διαδικασιών, τη μοντελοποίηση, τη βελτίωση των μηχανών κατεργασίας καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα που έχουν πραγματοποιηθεί.

## 1.1 Εξέλιξη των μικροκατεργασιών

Ο τομέας των μικροκατεργασιών κερδίζει συνεχώς έδαφος λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων για μικροσκοπικά προϊόντα. Η εξέλιξη των κατασκευών στις επιστήμες, την τέχνη και την τεχνολογία αύξησε τις απαιτήσεις για νέες εφαρμογές, καλύτερη ποιότητα και μείωση του απαιτούμενου κόστους. Οι παγκόσμιες επενδύσεις σε μικροκατεργασίες υπολογίζεται σήμερα πως ξεπερνούν τα 60 τρισεκατομμύρια δολάρια, ενώ ο ρυθμός ανάπτυξής τους κυμαίνεται στο 16% ανά έτος. Τα παραγόμενα μικροπροϊόντα βρίσκουν εφαρμογές στην αεροδιαστημική, τη βιοτεχνολογία, τις τηλεπικοινωνίες, τη φαρμακευτική/ χειρουργική, σε οικιακά και σε προηγμένα βιομηχανικά προϊόντα. Οι ανάγκες οι οποίες οδηγούν στην υιοθέτηση μικροπροϊόντων σε ολοένα και περισσότερους τομείς, αποτελούν και τα βασικότερα πλεονεκτήματα:

- Χαμηλότερο κόστος
- Μαζική παραγωγή
- Νέες αγορές/ εφαρμογές
- Βελτιωμένη λειτουργικότητα προϊόντων
- Φυσική ολοκλήρωση προϊόντων
- Ευαισθησία και ακρίβεια
- Ολοκληρωμένη παραγωγή
- Ποιότητα και απόδοση επιφάνειας
- Αξιοπιστία και καλές μηχανικές αντοχές
- Μικροσκοπικές διαστάσεις
- Μικρό βάρος
- Ασφάλεια και περιβάλλον

Σήμερα χάρη στην μικροτεχνολογία υπάρχει δυνατότητα κατασκευής τεμαχίων πολύπλοκης γεωμετρίας. Οι μέθοδοι κατεργασιών που έπαιζαν πάντα σημαντικό ρόλο στις κατασκευές έχουν σημειώσει επίσης σημαντική βελτίωση όσον αφορά στην προσφερόμενη ακρίβεια κατά την εφαρμογή τους. Στο σχήμα 1.1 που ακολουθεί φαίνεται η εξελικτική πορεία των μικροκατεργασιών όπως ξεκίνησε το 1983 από την εργασία του Taniguchi μέχρι τη σημερινή εποχή. Επίσης φαίνονται οι δυνατότητες που προσφέρουν οι μικροκατεργασίες με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους όπως τη μέθοδο αφαίρεσης υλικού καθώς και την ακρίβεια των κατεργαζόμενων τεμαχίων που προκύπτουν. Παρ' όλα αυτά τα μικροπροϊόντα άργησαν να εισέλθουν στις αγορές, κυρίως λόγω των εξής περιορισμών:

- Κόστος
- Συντηρητικές αγορές
- Διαθεσιμότητα υλικών
- Άγνοια σχεδιασμού
- Μη εξειδικευμένο προσωπικό
- Ανωριμότητα /έλλειψη τεχνολογίας
- Έλλειψη πρωτοτυποποίησης

- Πολυπλοκότητα κατεργασιών στις 3 διαστάσεις
- Διαφοροποίηση τεχνολογιών/ έλλειψη προτυποποίησης
- Συναρμολόγηση και συσκευασία
- Μετρολογία



Σχήμα 1.1. Εξέλιξη μικροκατεργασιών

## 1.2 Ανάπτυξη μικροπροϊόντων

# Ορισμός της μικρομηχανικής

Η ανάπτυξη ενός μικροπροϊόντος δεν είναι μόνο η μείωση της κλίμακας ενός προϊόντος και μιας μακροδιαδικασίας, αλλά είναι θέμα ενός διαφορετικού τρόπου σκέψης με χρήση διαφορετικών αρχών και μεθοδολογιών.

Μικρομηχανική είναι η ανάπτυξη και κατασκευή προϊόντων των οποίων τα λειτουργικά χαρακτηριστικά έχουν διαστάσεις της τάξεως του 1μm. Στα προϊόντα αυτά ενσωματώνονται διαφορετικές λειτουργίες και άλλα μικρο-εξαρτήματα (σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2. Ορισμός της μικρομηχανικής

Η αλυσίδα ροής των διεργασιών για την ανάπτυξη και κατασκευή ενός μικροπροϊόντος δίνει τη δυνατότητα λεπτομερούς αναζήτησης των κατάλληλων χαρακτηριστικών των τεχνολογιών και των αντικειμένων που συμμετέχουν (σχήμα 1.3).



**Σχήμα 1.3.** Σχέση μεταξύ των αντικειμένων και των τεχνολογιών στην αλυσίδα ροής για την παραγωγή ενός μικροπροϊόντος.

# Βασικοί άξονες σχεδιασμού μικροπροϊόντων

- Λειτουργικότητα
- Ευκολία κατασκευής
- Χαμηλό κόστος κατασκευής, συναρμολόγησης και συσκευασίας
- Υψηλή αξιοπιστία και συνολική απόδοση
- Δυνατότητα βέλτιστης επιλογής υλικών
- Περιορισμένες επιπτώσεις στο περιβάλλον
- Δυνατότητα μαζικής παραγωγής

# 1.3 Τομείς Εφαρμογών

Η μίκρο και νάνο τεχνολογία βρίσκεται σχεδόν παντού σε προϊόντα της καθημερινότητας, τις περισσότερες φορές χωρίς να γίνεται αντιληπτό. Παραδείγματα σύγχρονων καινοτόμων προϊόντων τα οποία παράγονται μετά από κατεργασία σε μίκρο ή νάνο κλίμακα είναι τα εξής: Apple IPod (με στοιχεία μεγέθους 100 nm), αδιάβροχα νανοϋφάσματα Nano-Tex που δε λερώνουν και δε φθείρονται, αυτοκαθαριζόμενα τζάμια, νανοφίλτρα καθαρισμού αέρα, συσσωρευτές, οθόνες υγρών κρυστάλλων υψηλής απόδοσης, εκτυπωτές, κινητά τηλέφωνα κ.λπ.. Από το 2008 και έπειτα τα τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται από την Intel έχουν μέγεθος μικρότερο των 45 nm.

# Τομείς εφαρμογής μικροπροϊόντων:

- Εξαρτήματα πληροφορικής (πχ. για εκτυπωτές inkjet, για σκληρούς δίσκους κ.λπ.)
- Ιατρικά και βιοϊατρικά προϊόντα (βηματοδότες, εξοπλισμό αναλύσεων, αισθητήρες κ.λπ.)
- Αισθητήρες κίνησης στην αυτοκινητοβιομηχανία
- Προϊόντα αυτοματισμού
- Προϊόντα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών

Ο πίνακας 1 παρουσιάζει μια κατηγοριοποίηση κάποιων παραδειγμάτων μικροπροϊόντων. Όπως φαίνεται από τον πίνακα ο ίδιος τύπος προϊόντος, με την ίδια κύρια λειτουργία, μπορεί να πραγματοποιηθεί βασισμένος σε διαφορετικές αρχές λειτουργίας, οδηγώντας κατά συνέπεια σε ένα απολύτως διαφορετικό σχέδιο.

	Main Working Principle			incip	ole		
Product group	Physical	Chemical	Optical	Bio-medical	Mechanical	Electro-magnetic	Examples
IT/computers					X	X	Magnetic bearings [14]
Sensors	X	X	Х	X	X	X	Gyroscopes [11]-[12], Accelerometers [13] [15]-[16], Micro pumps [17], Micro total analysis systems [9] [18]
Actuators					X	X	Stick and slip actuators [19], Magnetic actuators [14], Piezoelectric elastic force motor [20], Micro motor [21], Electrostatic actuator [22]
Optical communication			Х				Holographic memories [23], Lenses [24], Micro optics [8], Optical switching devices [25], Optical network, Connectors
Displays			X		X	X	Micro mirror [26]-[27], Display devices [9]
Electronic parts						X	Ink jet printer nozzles [9] [28], Colour printing [29], Hearing aids, Micro parts on circuit boards
Medical equipment		X		X			Implants [30], Surgery devices [31]-[32]
Watches					X	Х	Gear wheels [33], Micro transmissions

 Table 1.4. Micro product categories.

#### 1.4 Μέθοδοι μικροκατεργασιών

#### Τεχνολογία μικροκατεργασιών

Οι κατεργασίες μικροεξαρτημάτων και μικροδομών υψηλής ακρίβειας διαιρούνται σε δύο γενικούς τεχνολογικούς τομείς :

# α. Micro System Technologies (MST) και

# **β. Micro Engineering Technologies (MET)**

- Οι MST τεχνολογίες είναι κατάλληλες για την κατασκευή προϊόντων Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) και Micro Opto Electro Mechanical Systems (MOEMS) συμπεριλαμβανομένων της UV-λιθογραφίας, κατεργασίες πυριτίου και LIGA.
- Οι τεχνολογίες (ΜΕΤ) περιλαμβάνουν την παραγωγή μηχανικών εξαρτημάτων υψηλής ακριβείας, καλουπιών και επιφανειακές μικροδομές. Χαρακτηριστικές μηχανικές κατεργασίες που ανήκουν σε αυτόν τον τομέα είναι κατεργασίες με διαμάντι (τόρνευση, φρεζάρισμα και λείανση).
- Επιπλέον, κατεργασίες κατασκευής όπως με δέσμη ακτινών λέιζερ (LBM) και ιονικών ακτινών (IBM), κατεργασία δέσμης ηλεκτρονίων (EBM) και ηλεκτρικής εκκένωσης (MEDM) ανήκουν στην κατηγορία των κατεργασιών με χρήση ενέργειας (Energy Assisted Processes).
- Τέλος μέθοδοι αναπαραγωγής (χύτευση, θερμοπλαστική χύτευση κ.λπ.) αποτελούν ξεχωριστή κατηγορία.





# 1.4.1 Κατηγορίες Μεθόδων Μικροκατεργασίας

# 1. Μηχανικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού

- Μικροκοπή
- Μικρολείανση
- Υπερηχητική μικροκατεργασία (MUSM- Micro Ultrasonic Machining)

# 2. Θερμικές κατεργασίες

- Κατεργασία ακτινών λέιζερ (LBM- Laser Beam Machining)
- Κατεργασία δέσμης ιόντων και ηλεκτρονίων (IBM-Ion Beam Machining και EBM-Electron Beam Machining)
- Κατεργασία ηλεκτρικής εκκένωσης (EDM- Electro discharge machining)

# 3. Κατεργασίες αναπαραγωγής

- Χύτευση
- Θερμοπλαστική χύτευση

# 4. Κατεργασίες MEMS – Micro Electro Mechanical Systems

- Electrochemical Machining- ECM
- Etching

# 5. LIGA

- X-ray lithography
- Electroforming
- Electro molding

Micro Ma- chining Processes	Geometric Complexity	Range of Materials	Prototyping	Mass Pro- duction	Surface Quality	Affordability			
Mechanical Processes	+	ο	+	ο	+	+			
EDM, ECM, USM	+	ο	+	-	0	+			
LBM	0	+	+	-	0	0			
LIGA	-	-	-	+	+	-			
Near Net Shape Processes	0	0	-	+	ο	0			
+ Good / O Fair / - Poor									

Στον πίνακα 1.6 γίνεται σύγκριση διαφόρων διαδικασιών μικροκατεργασίας.

#### Table 1.6 Σύγκριση Μικροκατεργασιών

## Προβλήματα των μικροκατεργασιών

Προκειμένου να διατηρηθεί η ακρίβεια σε μια μικροκατεργασία, πρέπει να ελαχιστοποιηθούν οι παράγοντες που προκαλούν σφάλματα ή EGFs (Error Generation Factors) όπως:

- (α) Η μηχανική παραμόρφωση είναι ένα κοινό πρόβλημα των μηχανικών κατεργασιών όπως οι κατεργασίες κοπής. Στις μικροκατεργασίες, αυτό το φαινόμενο έχει μεγαλύτερη επιρροή επειδή το εργαλείο ή/και το κομμάτι προς κατεργασία είναι συχνά πολύ λεπτά.
- (β) Η θερμική παραμόρφωση είναι λιγότερο ισχυρή όταν το μέγεθος των εργαλείων ή/και των κομματιών είναι πολύ μικρά, καθώς αυτή η παραμόρφωση είναι ανάλογη του μεγέθους.
- (γ) Η ακεραιότητα της επιφάνειας κατεργασίας είναι ένας σημαντικός παράγοντας που αφορά στη σχέση μεταξύ της τραχύτητας της επιφάνειας και των διαστάσεων των μικρο-προϊόντων. Ιδανικά, η τραχύτητα πρέπει να μειώνεται αναλογικά με το μέγεθος του προϊόντος. Εντούτοις, είναι εφικτό η τραχύτητα να είναι μικρότερη από το μέγεθος των ατόμων του κατεργαζόμενου υλικού.
- (δ) Οι αλλαγές στο διάκενο μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου. Δεδομένου ότι οι διαδικασίες με εργαλεία είναι βασισμένες στην αναπαραγωγή της μορφής της κό-ψης των εργαλείων, η συνθήκη επαφής του κομματιού και του εργαλείου είναι ση-μαντική. Στις ανέπαφες διαδικασίες όπως η EDM, υπάρχει ένα διάκενο μεταξύ των επιφανειών του εργαλείου και του τεμαχίου. Αυτό μπορεί να είναι αιτία σφαλμάτων κατά τη διάρκεια αναπαραγωγής της μορφής. Ακόμη και σε μια διαδικασία επαφής όπως μια μηχανική κοπή, η επιφάνεια κατεργασίας μπορεί να διαφέρει όπως προκύπτει από τη μοριακή ανάλυση MD (Molecular Dynamics). Στην περίπτωση της

χρήσης οπτικών εργαλείων, όπως στην κατεργασία με ακτίνες λέιζερ (LBM-Laser Beam Machining), η μορφή του εργαλείου δεν είναι τόσο σαφής όσο ενός στερεού εργαλείου.

(ε) Η μετατόπιση των συντεταγμένων κατά το χειρισμό. Είναι δύσκολο να παραμείνει το εργαλείο ή/και το προϊόν καλά ευθυγραμμισμένο, καθώς δεν υπάρχει αρκετή επιφάνεια για να οριστούν επίπεδα αναφοράς. Αυτό το πρόβλημα οδηγεί στην ανάγκη χρήσης κοινών συντεταγμένων σε όσο το δυνατόν περισσότερα στάδια παραγωγής, από την κατασκευή του εργαλείου μέχρι τη συναρμολόγηση.

Στις περισσότερες μεθόδους μικροκατεργασιών, τα παραπάνω προβλήματα έχουν λίγο πολύ λυθεί. Όλο και περισσότερες εφαρμογές θα είναι δυνατόν να υλοποιηθούν καθώς τα προβλήματα λύνονται με τις μελλοντικές τεχνολογικές βελτιώσεις.

# 1.5 Παραδείγματα Μικροκατεργασιών

# (α) Οπές

Κατεργασίες που εφαρμόζονται για το άνοιγμα οπών είναι:

- Μικρο-διάτρηση
- Μικρο-σφυρηλάτηση
- Micro-EDM,
- Micro-LBM,
- Micro-USM και
- SL-Stereo Lithography.

Μέσω των μικροκατεργασιών κατασκευάζονται διάφορα εξαρτήματα όπως φίλτρα ρευστών, πλέγματα, βιοϊατρικά φίλτρα, ακροφύσια εκτυπωτών inkjet, ακροφύσια καυσίμων, οπές οπτικών, στόμια υψηλής πίεσης, αισθητήρες και βραχίονες αεροκίνησης, οδηγοί καλώδιο-συνδέσεων και περιστρεφόμενα ακροφύσια.

# Παραδείγματα:

- Άνοιγμα οπών Ø5μm σε μέταλλα και κράματα σε μηχανή μικρο- EDM (σχήμα 1.7α).
- Οπές Ø5μm σε γυαλί χαλαζία και σε πυρίτιο μέσω USM (σχήμα 1.7β).
- FS λέιζερ χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή οπών σε ακροφύσια Ø250μm χωρίς το σχηματισμό ξεθυμάσματος. Στο σχήμα 1.7γ φαίνεται μια εφαρμογή σε ακροφύσια ψεκασμού καυσίμων.



(α) Microholes fabricatedby EDM



 $(\beta)$  A microhole in quartz glass machined by USM



 $(\gamma)$  A fuel injection nozzle cap with holes machined by an FS laser

Σχήμα 1.7 Δημιουργία οπών με εφαρμογή μκροκατεργασιών

# (β) Μικροπείροι (micropins)

Διάφοροι τύποι μικροπείρων με διαμέτρους από 10μm έως μερικές εκατοντάδες μm παράγονται συνήθως με κατεργασίες όπως WEDG, μικρο-λείανση και μικροτόρνευση.

# Παραδείγματα:

Στο σχήμα 1.8α παρουσιάζεται μικροπείρος κατεργασίας WEDG με διάμετρο Ø4,5μm και στο σχήμα 1.8β ένα εργαλείο για παραγωγή μικρο-εσοχών κατασκευασμένο με τόρνευση.



Σχήμα 1.8 Δημιουργία μικροπίρων με εφαρμογή μκροκατεργασιών

# (γ) Εγκοπές και αυλακώσεις

Η παραγωγή αυλακώσεων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με:

- Τόρνευση
- φραιζάρισμα
- λείανση
- Laser
- EDM
- EDG Electro Discharge Grinding (τύπος EDM με κίνηση του ηλεκτροδίου όπως στη λείανση)

# Παραδείγματα:

- Στο σχήμα 1.9α παρουσιάζονται διάφορες μικροδομές με μικροφραιζάρισμα με κονδυλοφόρο επίπεδης απόληξης.
- Με χρήση FS-Laser, κατασκευάστηκαν σχισμές και αυλακιά με πλάτη μικρότερα των 100μm σε διάφορα υλικά όπως ο χαλκός (σχήμα 1.9β).
- Στο σχήμα 1.9γ παρουσιάζεται ένας αντιχητής νικελίου
- Το εκμαγείο του σχήματος 1.9δ κατασκευάστηκε με μικροφραιζάρισμα και αποτελείται από τρεις εκθετικές σπείρες συνδεόμενες με ευθύγραμμη αυλάκωση σε ειδική, λίαν υψηλής ακριβείας εργαλειομηχανή μικροφραιζαρίσματος. Η διάμετρος του ήταν ~1.5mm και το βάθος των αυλακώσεων 62μm.
- Στο σχήμα 1.9ε παρουσιάζεται κυλινδρικός άξονας αλουμινίου, με διάμετρο 25mm και μήκος 100mm, που φέρει διαμήκη πτερύγια και εγκοπές κατασκευασμένες με διαμαντοκοπή.



(α) Μικροδομές κατασκευασμένες με μικροεργαλεία επίπεδης απόληξης



(γ) Αντιχητής νικελίου και μεγέθυνση των εγκοπών





(δ) Εκμαγείο σε μηχανή μικροφραιζαρίσματος και μεγέθυνση της αυλάκωσης



(ε) Διαμήκη πτερύγια και εγκοπές σε άξονα αλουμινίου με διαμαντοκοπή

**Σχήμα 1.9** Δημιουργία μικροαυλακώσεων με εφαρμογή μκροκατεργασιών

# (δ) Τρισδιάστατα προϊόντα

Οι περισσότερες από τις μεθόδους κατεργασιών μπορούν να εφαρμοστούν και στην κατασκευή τρισδιάστατων μικροπροϊόντων.

# Παραδείγματα:

- Μικρογρανάζια αντλίας (Ø 596μm) κατασκευάστηκαν με LIGA (σχήμα 1.20α)
- Μικροδομή πυριτίου κατασκευάστηκε με EDM (σχήμα 1.20β)



(β) Μικροσχισμές σε τιτάνιο με FS-laser



- Με EDM κατασκευάστηκε μικροκαλούπι αυτοκινήτου, μήκους 500μm για την αναπαραγωγή προτύπων από πλαστικό (σχήμα 1.20γ).
- Ρότορες μικροστροβίλων μέσω κατεργασίας SL (σχήμα 1.20δ)
- Μικροεργαλείο διαμόρφωσης εξαρτημάτων μικρο-ινών σε κλίμακα κάτω των 10μm με κατεργασία μικροφραιζαρίσματος και κοπτικό εργαλείο από διαμάντι (σχήμα 1.20ε).
- Με μικροφραιζάρισμα δημιουργήθηκε επίσης η τρισδιάστατη δομή με κυρτές επιφάνειες του σχήματος 1.20ζ.
- Δομές (από πλαστικό PMMA) κατασκευασμένες με λέιζερ χρησιμοποιήθηκαν ως εκμαγεία για την παραγωγή μεταλλικών προϊόντων όπως αυτά που φαίνονται στα σχήματα 1.20η-ι.

















(γ)





# Σχήμα 1.20 Δημιουργία τρισδιάστατων προιοντων με εφαρμογή μκροκατεργασιών

#### 2. Εισαγωγή στη μικροκοπή

Ως μικροκοπή ορίζεται η μηχανική κοπή τεμαχίων με χρήση εργαλείων τα οποία έχουν δυνατότητα κοπής μικρότερης του 1mm και έχουν γεωμετρικά καθορισμένες ακμές κοπής. Έτσι αποκλείονται οι ηλεκτρικές, χημικές, θερμικές και λειαντικές διεργασίες και δίνεται βαρύτητα στη φυσική των διεργασιών που θεωρείται ως βασική θεωρία για την κατανόηση των μικροκατεργασιών.

Στη μικροκοπή το βάθος κοπής είναι μικρότερο από 10 μm και είναι πλέον της ίδιας τάξης μεγέθους με την ακτίνα καμπυλότητας της κόψης. Επίσης η αναμενόμενη τραχύτητα είναι της τάξης μερικών nm. Αυτό οδηγεί στα εξής άμεσα συμπεράσματα:

- Η κόψη δεν μπορεί να θεωρηθεί οξεία.
- Η ελαστική επαναφορά της κατεργασμένης επιφάνειας δεν μπορεί να αγνοηθεί και επομένως θα ληφθεί υπόψη και η τριβή μεταξύ κοπτικού εργαλείου/ τεμαχίου στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού.
- Για την εξώθηση του αποβλίττου και την "άρωση" του τεμαχίου από το κοπτικό εργαλείο απαιτείται η εφαρμογή αρνητικής γωνίας αποβλίττου.

Η κύρια διαφορά μεταξύ των κατεργασιών στη συμβατική και στη μικροδιάσταση έγκειται στον μηχανισμό κοπής. Οι μικροκατεργασίες βασίζονται σε πιο περίπλοκους μηχανισμούς οι οποίοι εξαρτώνται από το βαθμό της επίδρασης της κλίμακας και της μικροδομής του υλικού, ενώ ο μηχανισμός κοπής στη μακροκλίμακα βασίζεται γενικά στη διάτμηση του υλικού μπροστά από την κόψη του εργαλείου και στο σχηματισμό του αποβλίττου. Ως επίδραση της κλίμακας ορίζεται το αποτέλεσμα της μικρής αναλογίας του βάθους κοπής προς την ακτίνα της κόψης. Η επίδραση της κλίμακας και η μικροδομή του υλικού έχουν επιπτώσεις στην ακεραιότητα της επιφάνειας, στην τραχύτητα και στη δύναμη κοπής είτε μιλάμε για ισοτροπικές είτε για ανισοτροπικές κατεργασίες.

Το σχήμα 2.1 δείχνει τη σύγκριση των μικροκατεργασιών κοπής (τραχύτητα επιφανείας/ μέγεθος) συγκριτικά με άλλες διαδικασίες όπως με λέιζερ (LBM), EDM, λείανση και LIGA. Όπως φαίνεται τιμές Ra γύρω στα 5nm είναι εφικτές για εφαρμογές μεγέθους 1μm.



Σχήμα 2.1 Σύγκριση μικροκατεργασιών

Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι κύριοι άξονες της εξέλιξης της τεχνολογίας της μικροκοπής.





#### 2.1 Φυσική της μικροκοπής

Για τις μικροκατεργασίες συνεχίζουν να ισχύουν αρκετά χαρακτηριστικά της συμβατικής μηχανικής με τη διαφορά ότι υπάρχει μείωση στο μέγεθος και την κλίμακα των αντικειμένων πράγμα που ελάχιστα επηρεάζει τα γενικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας. Παρόλα αυτά όταν είτε η αναλογία των διαστάσεων του τεμαχίου, είτε το μέγεθος της μικροδομής του υλικού σε σχέση με το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται (πχ. η διάμετρός του) είναι αρκετά μικρή, τότε οι επιδράσεις από την αλλαγή των διαστάσεων μπορεί να αλλάξουν την όλη προσέγγιση της κατεργασίας.

Η επίδραση της μείωσης του μεγέθους των τεμαχίων και των κοπτικών εξετάζονται από δύο πλευρές. Πρώτον για το αν το βάθος κοπής είναι της ίδιας τάξης με την ακτίνα της κόψης του εργαλείου και δεύτερον κατά πόσο η μικροδομή του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι επηρεάζει το μηχανισμό της κοπής. Το σχήμα 2.3.α παρουσιάζει τη φυσική της ορθογωνικής κοπής στη μίκρο κλίμακα όπου παρατηρούνται τέσσερις ζώνες παραμόρφωσης:



(α) Φυσική ορθογωνικής κοπής



(β) Οι δυνάμεις στις επιφάνειες τριβής του κοπτικού εργαλείου

# Σχήμα 2.3. Φυσική της μικροκοπής

- Ζώνη 1: Είναι η ζώνη διάτμησης όπου αναπτύσσεται η μέγιστη διατμητική τάση.
- Ζώνη 2: Είναι το τμήμα του αποβλίττου που εξωθείται από το καμπύλο τμήμα

της κόψης.

- Ζώνη 3: Αφορά στην περιοχή τριβής του αποβλίττου πάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου.
- Ζώνη 4: Αντιστοιχεί στην περιοχή τριβής του τεμαχίου με την ελεύθερη επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου, η οποία οφείλεται στην ελαστική επαναφορά του υλικού.

Οι **δυνάμεις** που αναπτύσσονται στις περιοχές επαφής του κοπτικού με το τεμάχιο και το απόβλιττο παρουσιάζονται στο σχήμα 2.3β.

## 2. Εφαρμογές

Οι συμβατικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, τόρνευση, διάτρηση, φραιζάρισμα, λείανση, μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή τεμαχίων πολύ μικρών διαστάσεων που απαιτούν πολύ μεγάλη ακρίβεια. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται εργαλειομηχανές πολύ υψηλής ακριβείας, εξοπλισμένες με εξαιρετικής κατασκευαστικής ακριβείας ολισθητήρες, έδρανα και εργαλεία. Ακόμη, η εφικτή τραχύτητα επιφανείας είναι της τάξης μερικών nm σε εφαρμογές νανοτεχνολογίας. Μερικές γενικές εφαρμογές μικροκοπής (υψηλής ακριβείας) αφορούν σε:

- Αξονοσυμμετρικές επιφάνειες: Επίπεδες επιφάνειες, σφαιρικά ή μη σφαιρικά σχήματα.
- Σύνθετες γεωμετρίες: Παραβολικές, ελλειψοειδείς και δακτυλιοειδείς επιφάνειες.
- Πολυγωνικά κάτοπτρα, μικροφακοί.
- Μικροκατασκευές, εκμαγεία.
- Μικροεγκοπές.

Παραδείγματα προϊόντων μικροκοπής παρουσιάζονται στο σχήμα 2.4.



(α) Μικροφακοί



(β) Αξονοσυμμετρικά κάτοπτρα



(γ) Έκκεντρη μικροκοπή παραβολικού κατόπτρου

Acc V Spot Magn WD 200 µm 3.00 kV 6.0 300k 8.9 ABW

(δ) Σφαιρική μικροκατασκευή

**Σχήμα 2.4** Εφαρμογές μικροκοπής

# 2.3 Κατεργασίες μικροκοπής

Οι κατεργασίες μικροκοπής χαρακτηρίζονται από τη μηχανική αλληλεπίδραση ενός αιχμηρού κοπτικού εργαλείου με το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, προκαλώντας θραύση μέσα στο υλικό κατά μήκος μιας καθορισμένης πορείας, με αποτέλεσμα την αφαίρεση του περιττού υλικού με τη μορφή αποβλίττου. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια τέτοια διαδικασία:

- το υλικό του εργαλείου θα πρέπει να είναι σκληρότερο από το υλικό του κομματιού και να μην διαχέεται θερμότητα μεταξύ των δύο υλικών.
- η ακτίνα της κόψης του εργαλείου θα πρέπει να είναι της ίδιας ή μικρότερης τάξης μεγέθους του πάχους κοπής. Εφόσον οι διαστάσεις των δομών κατεργασίας είναι της τάξης μερικών δεκάδων του μm, οι επιθυμητές τιμές για το πάχος του αποβλίττου και κατά συνέπεια η ακτίνα της κόψης του εργαλείου, είναι της τάξης μερικών εκατοντάδων nm. Για παράδειγμα, η προσομοίωση μοριακής δυναμικής, έδειξε ότι το ελάχιστο πιθανό πάχος κοπής έχει υπολογιστεί να είναι λιγότερο από 1nm για το χαλκό και το αλουμίνιο σε κατεργασία με κοπτικό από διαμάντι ακτίνας ακμής μικρότερη από 10nm.
- Άλλη μια απαραίτητη συνθήκη στη μικροκοπή είναι η διαθεσιμότητα εργαλειομηχανών υψηλής ακρίβειας για την επίτευξη ανοχών και πάχη αποβλίττων κάτω του 1μm. Μηχανές CNC με ακρίβεια θέσης 5nm, σε διαφορετικές κατευθύνσεις διευκολύνουν τη μικροκοπή.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των κατεργασιών μικροκοπής είναι η σχετικά μεγάλη δύναμη κοπής η οποία επηρεάζει την ακρίβεια και τα όρια του μεγέθους κατεργασίας, λόγω εκτροπής του εργαλείου και του κομματιού. Η αιχμηρότητα της κόψης του εργαλείου, δηλαδή η ακτίνα της, επηρεάζει καθοριστικά τη δύναμη κοπής. Παρά τα μειονεκτήματα τους, οι μικροκατεργασίες κοπής παρουσιάζουν μεγάλη ευελιξία. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του κομματιού δεν επηρεάζουν τη διαδικασία, κατά συνέπεια πλαστικά και μεταλλικά υλικά καθώς επίσης και συνθετικά υλικά είναι επεξεργάσιμα στη μηχανή. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διάτρηση οπών σε πίνακες κυκλωμάτων. Αντιθέτως, πολύ σκληρά ή ψαθυρά υλικά είναι δύσκολα στην κατεργασία. Εντούτοις, τα ψαθυρά υλικά μπορούν να κοπούν σε όλκιμες συνθήκες για πολύ μικρά βάθη κοπής, της τάξεως ενός δεκάτου του μm. Το ελκυστικότερο πλεονέκτημα της μικροκοπής είναι η δυνατότητα κατεργασίας 3D μικρο-δομών που χαρακτηρίζονται από υψηλές αναλογίες διαστάσεων και γεωμετρική πολυπλοκότητα.

# Παραδείγματα:

- Κατεργασία γραμμικών αυλακώσεων σε PMMA, κράμα 6061 ορείχαλκου και αλουμινίου (πλάτους 15 - 20 μm) και ομόκεντρες αυλακώσεις πλάτους 30μm σε επίπεδες επιφάνειες αλουμίνιου 6061.
- κατεργασία ελικοειδών αυλακώσεων 13μm σε κυλινδρικά τεμάχια Al 6061 και PMMA. Οι αυλακώσεις που κατασκευάστηκαν παρουσιάζουν μέση τραχύτητα Ra μικρότερη από 0,30μm για όλα τα υλικά.
- Μικροφραιζάρισμα αυλακώσεων πλάτους 15μm σε Al 6061, ορείχαλκο, χάλυβα και PMMA με κοπτικά 2, 4 και 5 ακμών.
- Μικροκοπή χάλυβα με κοπτικά από καρβίδιο βολφράμιου για την κατασκευή μιας πλήρους τρισδιάστατης μήτρας για πλαστικά, φτιαγμένη από SAE H13, επιτυγχάνοντας τραχύτητα επιφάνειας Rz ίση με 0,5μm (σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5 Εκμαγείο σε χάλυβα SAE H13 με μικροφραιζάρισμα

# Απόδοση Μικροκοπής

Διάφορα μέτρα απόδοσης συνδέονται συνήθως με την απόδοση της μικροκοπής (σχήμα 2.6). Σε αυτά μπορούμε να συμπεριλάβουμε το σχηματισμό ξεθυμάσματος και τα παρόμοια αποτελέσματα που αφορούν στην ακρίβεια.



Σχήμα 2.6 Παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση στη μικροκοπή

Ένα σημαντικό ζήτημα στη μικροκοπή είναι η αφαίρεση των ξεθυμασμάτων. Επειδή οι διαστάσεις των τελικών προϊόντων κάνουν το χειρισμό τους μετά την κατεργασία δύσκολο, οι συμβατικές μέθοδοι για την αφαίρεση των ξεθυμασμάτων είναι αδύνατον να εφαρμοστούν. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί ειδικές τεχνικές για την αφαίρεση τους καθώς και στρατηγικές κατεργασίας που μηδενίζουν το σχηματισμό τους.

Η δυνατότητα εφαρμογής εργαλείων από διαμάντι είναι περιορισμένη στα μη σιδηρούχα υλικά. Μια ελπιδοφόρος τεχνική για την κατεργασία του χάλυβα με διαμάντι είναι η κοπή ελλειπτικής δόνησης (Elliptical Vibration Cutting) όπου χρησιμοποιούνται δονήσεις σε δύο κατευθύνσεις με συχνότητα περίπου 20kHz. Καθώς η μέγιστη ταχύτητα δόνησης ορίζεται μεγαλύτερη από την ταχύτητα κοπής, η κοπή πραγματοποιείται περιοδικά σε κάθε κύκλο της δόνησης. Με αυτή την τεχνική η δύναμη κοπής μειώνεται σημαντικά, το ίδιο και η θερμική ενέργεια που παράγεται και ο χρόνος επαφής μεταξύ του εργαλείου και του κομματιού. Οι πιο συνήθεις τύποι κατεργασιών μικροκοπής είναι η μικροδιάτρηση, το μικροφραι-ζάρισμα και η μικροτόρνευση.

## 2.3.1 Μικροδιάτρηση

Η μικροδιάτρηση είναι μια πολύ σημαντική κατεργασία σε μικροκλίμακα και χαρακτηρίζεται από τα μικρών διαστάσεων τρυπάνια. Η κινηματική της καθώς και τα γενικά χαρακτηριστικά της είναι παρόμοια με τη συμβατική διάτρηση. Μια σημαντική διαφορά της διάτρησης στη μικροδιάσταση είναι η υψηλή ακρίβεια περιστροφής του μικροεργαλείου. Η ακρίβεια περιστροφής μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες όπως η λάθος τοποθέτηση ή ολίσθηση κατά την πρώτη επαφή του τρυπανιού με το ακατέργαστο τεμάχιο. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί έκκεντρη απόκλιση του εργαλείου από τον πραγματικό κύκλο περιστροφής και έχει καταστροφικές συνέπειες για την ομαλή διεξαγωγή της κατεργασίας και για το ίδιο το κοπτικό εργαλείο.

Λόγω της χαμηλής αντοχής των μικρο-εργαλείων η κατεργασία θα πρέπει να εκτελείται σε μηχανή με πνευματικό σύστημα ατράκτου και έλεγχο θέσης κλειστού βρόγχου. Οι ταλαντώσεις θα πρέπει να ελαχιστοποιούνται ενώ ο έλεγχος της πρόωσης πρέπει να γίνεται με ομαλό και συνεχή τρόπο. Ακόμα και ένα εργαλείο εξαιρετικής ακρίβειας μπορεί να οδηγηθεί σε ανεπιθύμητη έκκεντρη απόκλιση. Στη μικροδιάτρηση η κόψη του εργαλείου αφαιρεί υλικό κυρίως με συμπίεση και κοπή σε πολύ μεγάλες αρνητικές γωνίες αποβλίττου. Η περίπτωση της διάτρησης υπό κλίση αποτελεί πρόκληση για τους ερευνητές καθώς εκεί οι δυνάμεις που αναπτύσσονται οδηγούν σε εύκολη θραύση του κοπτικού εργαλείου. Επιπλέον, τα τοιχώματα των μικροοπών που ανοίγονται ανήκουν στις πιο λείες επιφάνειες που αποδίδονται μέσω συμβατικών κατεργασιών (οφείλεται κυρίως στον ειδικό κύκλο διάτρησης).

Τα μικρότερα τρυπάνια είναι τύπου-φτυαριού (spade type). Τα μικροτρύπανα αυτά δεν έχουν ελικοειδή πτερύγια όπως τα συμβατικά τρυπάνια, γεγονός που καθιστά την απομάκρυνση των αποβλίττων από την οπή πιο δυσχερή. Τρυπάνια με διάμετρο μεγαλύτερη από 50μm μπορεί να κατασκευαστούν με ελικοειδή ακμή (twist drills), ενώ τρύπανια μικρότερης διαμέτρου είναι αποκλειστικά τύπου φτυαριού λόγω των δυσκολιών κατασκευής ελικοειδούς μορφής σε αυτή την τάξη μεγέθους. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζονται εικόνες εργαλείων μικροδιάτρησης.



Σχήμα 2.7 Παραδείγματα κοπτικών μικροδιάτρησης

Η μεγάλη αρνητική γωνία αποβλίττου του τρυπανιού απαιτεί υψηλή δύναμη πρόωσης πράγμα που καταδεικνύει και την επίδραση της κλίμακας στην κατεργασία. Επίσης η απομάκρυνση των αποβλίττων είναι πιο δύσκολη, γι'αυτό η μικροδιάτρηση πρέπει να εκτελείται ως μια **επαναληπτική διαδικασία** κατά την οποία το τρυπάνι απομακρύνεται και επανεισάγεται στην προς κατεργασία οπή, ώστε να είναι δυνατή η απομάκρυνση των αποβλίττων από το εσωτερικό της, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8.α.

Το σχήμα 2.8β παρουσιάζει το μηχανολογικό σχέδιο ενός τυπικού κοπτικού εργαλείου για μικροδιάτρηση, όπου απουσιάζει η κλασική ελικοειδής γεωμετρία των συμβατικών τρυπανιών. Η απομάκρυνση αποβλίττων απαιτεί ως και τη διπλάσια αξονική δύναμη και έχει ως συνέπεια την γρήγορη φθορά των κοπτικών. Όπως και στις συμβατικές κατεργασίες, έτσι και στη μικροδιάτρηση, οι συνιστώμενες τιμές της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής εξαρτώνται από το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Τυπικές τιμές για την πρόωση είναι της τάξης του 1μm/rev και για τις στροφές ατράκτου 5000 rpm. Υψηλότερες τιμές περιστροφής μπορεί να οδηγήσουν σε σκλήρυνση του υλικού του τεμαχίου με επακόλουθη αύξηση της δύναμης πρόωσης.



(α)

Σχήμα 2.7(α,β) Μέθοδος μικροδιάτρησης και γεωμετρία μικροτρυπανιών

# Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα της μικροδιάτρησης

Τα πλεονεκτήματα είναι τα ακόλουθα:

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του κομματιού προς κατεργασία δεν επηρεάζουν τη διαδικασία. Επομένως μπορούν εύκολα να εκτελεστούν κατεργασίες στα περισσότερα μέταλλα και πλαστικά, συμπεριλαμβανομένων των συνθετικών τους. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διάτρηση οπών σε πίνακες κυκλωμάτων.

 Ο χρόνος κατεργασίας μπορεί να ελεγχθεί εύκολα επειδή η διαδικασία είναι σταθερή όταν έχει οριστεί η κατάλληλη πρόωση ανά περιστροφή.

Αφ' ετέρου, τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- Ευθύτητα του προϊόντος
- Οι τρύπες συχνά έχουν κλίση επειδή ο προσανατολισμός του τρυπανιού επηρεάζει το ήδη-κατεργασμένο μέρος των οπών. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτή η κλίση, είναι απαραίτητη η σωστή τοποθέτηση όταν αρχίζει να κόβει η κόψη του τρυπανιού. Εάν η θέση της κόψης μετατοπιστεί έστω και σε μια πολύ μικρή απόσταση από το κέντρο της οπής, το τρυπάνι τείνει να ακολουθήσει τη γωνία που καθοδηγείται από την τρύπα που το ίδιο το εργαλείο δημιουργεί.
- Πολύ σκληρά ή ψαθυρά υλικά είναι δύσκολα στην κατεργασία. Ένα τρυπάνι από διαμάντι με μικρό βάθος κοπής (ή με μικρή πρόωση) μπορεί να είναι μια λύση σε αυτό το πρόβλημα, εντούτοις λόγω ψαθυρότητας, είναι δύσκολο να κατασταλεί εντελώς η δημιουργία θραυσμάτων και η θραύση των μικροτρυπανιών.

# 2.3.2 Μικροφραιζάρισμα

Το μικροφραιζάρισμα είναι από τις πιο δημοφιλής μικροκατεργασίες. Προσφέρει υψηλές αποδόσεις κατεργασιμότητας προϊόντων με λογικό κόστος αφήνοντας έτσι μεγάλα περιθώρια κέρδους. Στο μικροφραιζάρισμα:

- η πρόωση ανά δόντι δε ξεπερνάει το 1μm
- το βάθος κοπής κυμαίνεται από 2-15 μm
- η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου ξεπερνά τις 50000 rpm
- η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου
   είναι μικρότερη από 0,3 mm (σχήμα 2.9).

Παρ' όλα αυτά το φραιζάρισμα στη μικροδιάσταση αποτελεί μια αρκετά απαιτητική κατεργασία λόγω των ιδιαίτερων φορτίσεων που ασκούνται στο ευαίσθητο αναλογικά κοπτικό εργαλείο. Στο ακρότα-



Σχήμα 2.9 Κονδυλοφόρο εργαλεία επίπεδης απόληξης συμβατικού φραιζαρίσματος μεγέθους 6mm και μικροφραιζαρίσματος μεγέθους 200μm.

το σημείο της κοπτικής ακμής επικρατούν θλιπτικές τάσεις, ενώ οι συνθήκες καταπόνησης μακριά από την κόψη μετατρέπονται σε καμπτικές.

# Διαφορές φραιζαρίσματος στη συμβατική κλίμακα και τη μικροκλίμακα

- Αστοχία των κοπτικών εργαλείων. Στο κανονικό φραιζάρισμα παρατηρούμε φθορά των κοπτικών εργαλείων. Στη μίκρο διάσταση όμως είναι πιο σύνηθες τα μικροσκοπικά κοπτικά εργαλεία να φθάνουν στο όριο κάμψης τους πριν σημειωθεί αξιόλογη φθορά.
- Ταχύτητα κοπής του εργαλείου : V = r · ω

όπου:

V η περιφερειακή ταχύτητα κοπής (m/s)
 r είναι η ακτίνα του κοπτικού εργαλείου (m)
 ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (rad/s).

- Καθώς μειώνεται το μέγεθος της διαμέτρου για κατεργασίες σε μικροκλίμακα, η ταχύτητα περιστροφής πρέπει να αυξηθεί έτσι ώστε να αντισταθμιστεί η απώλεια σε περιφερειακή ταχύτητα κοπής.
- Ελαστική επαναφορά της κατεργασμένης επιφάνειας. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η τριβή μεταξύ εργαλείου-τεμαχίου στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού.
- Πάχος του αποβλίττου. Στις μικροκατεργασίες το πάχος αποβλίττου είναι μικρότερο από την ακτίνα καμπυλότητας της κόψης του εργαλείου. Στην περίπτωση που συμβεί το αντίθετο το κοπτικό εργαλείο αστοχεί. Η συμβατική κοπή υποθέτει οξεία κόψη και ανάπτυξη παραμορφώσεων στο επίπεδο διάτμησης και στην επιφάνεια μεταξύ τεμαχίου-αποβλίττου αδυνατεί να αντιμετωπίσει την επίδραση κλίμακας. Ως αποτέλεσμα αυτής της παραδοχής είναι ο σχεδιασμός των κοπτικών εργαλείων με αρνητική γωνία αποβλίττου που φτάνει τις 50 μοίρες. Σε τέτοιες γωνίες αποβλίττου η δύναμη κοπής που δημιουργείται αυξάνεται, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μικροσκοπικών αποβλίττων. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα μετάβασης από προώσεις mm/rev σε πολύ πιο παραγωγικές mm/min. Για να συμβεί αυτό χρειάζονται πολύ υψηλές ταχύτητες περιστροφής της ατράκτου που μπορούν να φτάσουν σήμερα τις 500.000 rpm (σχήμα 2.10).
- Δυνάμεις τριβής. Στο μικροφραιζάρισμα οι δυνάμεις τριβής μετρούνται με προχωρημένες μεθόδους όπως FFM (Friction Force Microscopy) ενώ στη μακροκλίμακα με απλά όργανα μέτρησης τάσεων. Επίσης η τριβολογική θεωρία του μικροφραιζαρίσματος βασίζεται στην κβαντομηχανική, ενώ στη μακροκλίμακα στην κλασσική μηχανική.
- Φθορά. Στο μικροφραιζάρισμα η φθορά μετράται με προχωρημένες μεθόδους όπως AFM (Atomic Force Microscopy), FFM κλπ ενώ, στη μακροδιάσταση με μεθόδους SEM (Scanning Microellipsometry), ή μέσω μέτρησης απώλειας μάζας ή όγκου. Επίσης η φθορά στη μικροδιάσταση πραγματοποιείται σε μοριακό ή ατομικό επίπεδο, αντίθετα με τη μακροδιάσταση όπου είναι ορατή ακόμα και με γυμνό μάτι.
- Φαινόμενα ταλαντώσεων. Στο μικροφραιζάρισμα λαμβάνουν χώρα μεγάλης έκτασης φαινόμενα ταλαντώσεων τα οποία αποτελούν και τα σοβαρότερα προβλήματα της κατεργασίας.
- Συνεχής εποπτικός έλεγχος στη μικροδιάσταση. Παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση αστοχίας του κοπτικού εργαλείου, όπου είναι αδύνατον να διαπιστωθεί με γυμνό μάτι. Στην περίπτωση αυτή χάνονται πολλές εργατοώρες αφού γίνεται κατασπατάληση του χρόνου χωρίς να υπάρχει κατεργασία.

Καθίσταται λοιπόν σαφές πως η μη βέλτιστη επιλογή συνθηκών κοπής έχει ως αποτέλεσμα να χάνονται άσκοπα χιλιάδες εργατοώρες ετησίως, με παράλληλη κατανάλωση πόρων και κεφαλαίου. Στην περίπτωση της μικρομηχανικής λόγω των ιδιαιτεροτήτων που περιγράφηκαν παραπάνω τα περιθώρια βελτίωσης σε ορισμένες περιπτώσεις αγγίζουν το 65%.



Σχήμα 2.10 Γεωμετρία μικροφραιζαρίσματος (α) στη μακρο και (β) στη μικροκλίμακα

# 2.3.3 Μικροτόρνευση

Για τη μικροκοπή κυρτών μορφών, η πιο διαδεδομένη κατεργασία είναι η μικροτόρνευση. Η αφαίρεση υλικού σε τόρνο απαιτεί ένα πολύ ανθεκτικό εργαλείο (σχήμα 11). Έτσι σε αυτές τις κατεργασίες συνηθίζεται η χρήση κοπτικού από διαμάντι. Ένα παράδειγμα μιας κυρτής μικροκατασκευής σε μικροτόρνο με κοπτικό από διαμάντι παρουσιάζεται στο σχήμα 2.12α.





Σχήμα 2.11 Παράδειγμα κατεργασίας μικροτόρνευσης

Η μικροτόρνευση για την παραγωγή μικροπίρων είναι δυνατή αλλά δυσκολότερο να πραγματοποιηθεί από τις άλλες εφαρμογές που περιγράφηκαν ανωτέρω (σχήμα 2.12β). Το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι η δύναμη κοπής που τείνει να κάμψει το κομμάτι προς κατεργασία. Είναι παρόμοιο με την περίπτωση του μικροφραιζαρίσματος εντούτοις το τεμάχιο στην μικροτόρνευση είναι συχνά ελαστικότερο από το εργαλείο. Χρησιμοποιώντας ένα εφεδρικό εργαλείο ή/και μεταβάλλοντας τη γωνία κοπής, αλλάζοντας την κλίση της κόψης είναι δυνατή η κατασκευή μικροπείρων με μεγάλες αναλογίες διαστάσεων και μικρές διαμέτρους.



Σχήμα 2.12 Παράδειγμα κατεργασίας σε μικροτόρνο

## 3. Τοπομορφία

Στην παρακάτω ενότητα ερευνούνται τομείς οι οποίοι περιλαμβάνουν:

- Την επίδραση της κλίμακας και το πώς επηρεάζει τις δυνάμεις κοπής, το σχηματισμό αποβλίττου, τη μορφολογία και την παραγωγή επιφάνειας.
- Την επίδραση του σχηματισμού ξεθυμάσματος και την ελαστική/πλαστική παραμόρφωση κατά την κατεργασία στην μικροκλίμακα.
- Την επίδραση της μικροδομής στην απόδοση της μικροκατεργασίας.

#### 3.1 Ελάχιστο πάχος κοπής

Το ελάχιστο πάχος κοπής (MTC - Minimum Thickness of Cut) στις κατεργασίες μετάλλων ορίζεται ως το ελάχιστο πάχος μη-παραμορφωμένου αποβλίττου που μπορεί να αφαιρεθεί σταθερά από μια επιφάνεια κατεργασίας κάτω από τέλεια απόδοση μιας εργαλειομηχανής (δηλ. είναι η οριακή τιμή του πάχους κοπής κάτω από την οποία δεν σχηματίζεται σταθερό απόβλιττο). Από πρακτική άποψη, το MTC αποτελεί μέτρο της μέγιστης εφικτής ακρίβειας κάτω από καθορισμένες συνθήκες κοπής με ιδανική απόδοση της εργαλειομηχανής. Από φυσική άποψη απεικονίζει την υλική συμπεριφορά του τεμαχίου υπό ακραίες μηχανικές συνθήκες στην κόψη. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα κατεργασίας της επιφάνειας με κοπτικό εργαλείο κυκλικής ακμής.



Σχήμα 3.1 Προφίλ επιφάνειας με κοπτικό κυκλικής κόψης.

Το ενεργό πάχος κοπής δεν είναι πάντα ίσο με την ονομαστική τιμή που υπολογίζεται γεωμετρικά καθώς επηρεάζεται από τη συμπεριφορά του υλικού γύρω από την κοπτική ακμή του εργαλείου. Η διαφορά μεταξύ των ονομαστικών και των πραγματικών τιμών θεωρείται ότι κυμαίνεται τυχαία και επομένως είναι δύσκολο να προβλεφθεί. Η σχέση μεταξύ των ονομαστικών και των πραγματικών παχών κοπής παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Θεωρητική σχέση μεταξύ του ονομαστικού και πραγματικού πάχους κοπής

Στα σχήματα 3.3(α) και (β) φαίνονται τα απόβλιττα κατεργασιών με ονομαστικά πάχη κοπής περίπου 1nm και 30nm αντίστοιχα. Παρατηρείται σχηματισμός σταθερού αποβλίττου ακόμη και στη νάνο κλίμακα. Έχει αποδειχθεί ότι εάν η κοπτική ακμή διατηρηθεί αρκετά αιχμηρή (ακτίνα κόψης μερικών νανομέτρων) τότε είναι δυνατή η κατεργασία ενός τεμαχίου με καλή απόδοση επιφάνειας και με ακρίβεια της τάξης του νανομέτρου.



Σχήμα 3.3 Απόβλιττα κατεργασιών με ονομαστικά πάχη κοπής (α) 1nm και (β) 30 nm

(β)

Τόσο η ισότροπη όσο και η ανισότροπη κοπή επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την αναλογία του βάθους κοπής σε σχέση με την ακτίνα της κόψης του εργαλείου. Στις μικροκατεργασίες η ακτίνα της κόψης του εργαλείου τείνει να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το πάχος του αποβλίττου. Οπότε μια μικρή αλλαγή στο βάθος κοπής επηρεάζει σημαντικά τη διαδικασία. Αυτή η αναλογία καθορίζει τον τρόπο αφαίρεσης του υλικού όπως είναι η κοπή ή η βύθιση του κοπτικού στο τεμάχιο χωρίς αφαίρεση υλικού και η ολίσθηση, και επομένως το αποτέλεσμα της τελικής ποιότητας της επιφάνειας. Η έννοια του ελάχιστου πάχους αποβλίττου κάτω από το οποίο παύει πλέον να δημιουργείται απόβλιττο ή αλλιώς του ελάχιστου βάθους κοπής κάτω από το οποίο παύει πλέον να δημιουργείται υλικό έχει εξετασθεί από αρκετούς ερευνητές. Ο προσδιορισμός του ελάχιστου πάχους αποβλίττου είναι απαραίτητος ώστε να εκτελείται ορθά η κοπή και να αποφεύγονται φαινόμενα βύθισης ή ολίσθησης του κοπτικού εργαλείου. Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η ειδική ενέργεια κοπής σε συνάρτηση με το άκοπο πάχος αποβλίττου για ένα νέο και ένα φθαρμένο εργαλείο. Όπως παρατηρούμε η ειδική ενέργεια είναι μικρότερη για φθαρμένο εργαλείο και για μικρά πάχη αποβλίττων.



Σχήμα 3.4 Ειδική ενέργεια κοπής συναρτήσει του πάχους άκοπου αποβλίττου για νέο και φθαρμένο κοπτικό εργαλείο.

Ο Kim κ.α. παρατήρησαν βύθιση του κοπτικού κάτω από ένα συγκεκριμένο βάθος κοπής διαπιστώνοντας ότι υπάρχει ένα ελάχιστο πάχος κοπής ώστε να δημιουργείται απόβλιττο. Ο Shimada κ.α. διεξήγαγαν μια ανάλογη μελέτη χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις μοριακής δυναμικής προκειμένου να προσδιορίσουν την απόλυτη απαιτούμενη ακρίβεια και βρήκαν ότι το ελάχιστο πάχος αποβλίττου είναι περίπου το 5% της ακτίνας της κόψης του εργαλείου για το χαλκό και το αλουμίνιο.

Ωστόσο ο Yuan κ.α. βρήκαν σε πειράματα τόρνευσης που υλοποίησαν με διαμάντι σε κράματα αλουμινίου ότι το ελάχιστο πάχος του αποβλίττου βρισκόταν ανάμεσα στο 20-40% της ακτίνας της κοπτικής ακμής. Οπότε η τιμή του ελάχιστου πάχους αποβλίττου ποικίλει με την ακτίνα της κόψης, το υλικό του τεμαχίου και τις συνθήκες κοπής. Όσον αφορά στη μοντελοποίηση ο Vogler κ.α. πρότειναν την ανάπτυξη δύο χωριστών μοντέλων δυνάμεων προκειμένου να γίνει σωστή απεικόνιση της επίδρασης του πάχους του αποβλίττου.

#### 3.1.1 Επίδραση του ελάχιστου πάχους αποβλίττου στις δυνάμεις κοπής

Ο Vogler κ.α. μελέτησαν πειραματικά τα αποτελέσματα του ελάχιστου πάχους αποβλίττου στις δυνάμεις κοπής. Το φάσμα συχνότητας της δύναμης βρέθηκε να περιέχει μια συνιστώσα υποαρμονική (1/3 για τις συνθήκες κοπής της μελέτης) της συχνότητας περάσματος του δοντιού, με ρυθμό πρόωσης μικρότερο από το ελάχιστο πάχος αποβλίττου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5. Αυτή η υποαρμονική συνιστώσα συχνότητας απεικονίστηκε στο χρονικό πεδίο ως επαναλαμβανόμενο σχέδιο για κάθε "n" περάσματα δοντιών (n=3 για την περίπτωση μελέτης). Λόγω της επίδρασης του ελαχίστου πάχους αποβλίττου, κατά την κατεργασία με μικρή πρόωση, το πάχος αποβλίττου συσσωρεύεται και η δύναμη αυξάνεται σε κάθε πέρασμα του εργαλείου για "n" περάσματα του δοντιού, έως ότου το πάχος του αποβλίττου γίνει μεγαλύτερο από το ελάχιστο πάχος αποβλίττου.



Σχήμα 3.5 Πειραματικά αποτελέσματα των δυνάμεων κοπής και το αντίστοιχο φάσμα ισχύος.

#### 3.2 Μορφοποίηση αποβλίττου

Εστιάζοντας στη μορφοποίηση του αποβλίττου, ο Donaldson κ.α. πραγματοποίησαν μελέτες πάνω στη διαμόρφωση μικροαποβλίττων και ο Nishiguchi κ.α. κατέδειξαν διάφορους μηχανισμούς μορφοποίησης αποβλίττου με βάση την ακτίνα της κόψης. Ο Jackson θεώρησε ότι ο σχηματισμός του αποβλίττου ήταν στενά συνδεδεμένος με την τραχύτητα της επιφάνειας κατεργασίας και συσχέτισε την ελικοειδή μορφή των αποβλίττων με τους μηχανισμούς που συνδέονται με την πρώτη και τη δεύτερη ζώνη διάτμησης. Το μοντέλο που ανέπτυξε προέβλεψε ότι η αρχική ελικοειδής μορφή του αποβλίττου οφειλόταν σε εναπομένον υλικό στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού που μετέβαλε την γωνία του αποβλίττου και έτσι άλλαζε το επίπεδο διάτμησης (σχήμα 3.6).





Σχήμα 3.6 Απόβλιττα μικροκατεργασίας αλουμινίου όπου φαίνονται πτυχώσεις σε μορφή έλικας (Jackson sel 213)

Στις συμβατικές κατεργασίες η ψευδοκοπή συνδέεται συνήθως με ξαφνικές αλλαγές στην τραχύτητας της επιφάνειας. Ο Weule κ.α. διαπίστωσαν ότι το ίδιο μπορεί να συμβεί και στις μικροκατεργασίες σε πειράματα μικροφραιζαρίσματος με μία κοπτική ακμή που πραγματοποίησαν σε χάλυβα SAE 1045. Ο Waldorf κ.α. παρατήρησαν ότι μια σταθερή ψευδοκοπή, η οποία αυξάνει σημαντικά τη δύναμη διάτμησης, σχηματίζεται όταν η πρόωση είναι μικρότερη από την ακτίνα κοπτικής ακμής. Οι Kountanya και Endres μελέτησαν επίσης το μηχανισμό παραμόρφωσης του υλικού στην περιοχή της κόψης χρησιμοποιώ-

ντας εργαλεία με αμβλεία κοπτική ακμή. Παρατήρησαν σε πραγματικό χρόνο μια σταθερή ψευδοκοπή κοντά στην ακτίνα της κόψης, σε ορείχαλκο, την οποία συνέδεσαν με τις μεταβολές των δυνάμεων κοπής που μετρήθηκαν ταυτόχρονα.

Υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη μορφοποίηση αποβλίττου ανάλογα με την ταχύτητα κοπής. Τα απόβλιττα που προκύπτουν από μικροφραιζάρισμα υψηλών ταχυτήτων παρουσιάζουν μεγαλύτερη συνοχή και στις τρείς διαστάσεις. Οι ρωγμές που παρουσιάζουν εμφανίζονται σε ίδια συχνότητα και έκταση σε όλα τα απόβλιττα, πράγμα που σημαίνει πως στο μικροφραιζάρισμα σε υψηλές ταχύτητες οι συνθήκες κοπής παραμένουν σταθερές. Σε μικρότερες ταχύτητες περιστροφής τα απόβλιττα έχουν μεγαλύτερο μήκος. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το εργαλείο παραμένει σε επαφή με το τεμάχιο για περισσότερο χρόνο. Στο σχήμα 3.7 φαίνεται η μορφή του αποβλίττου σε χαμηλές και σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής.





Σχήμα 3.7 Μορφοποίηση αποβλίττου στο μικροφραιζάρισμα υψηλής ταχύτητας

Έχει παρατηρηθεί πως η σχηματισμός αυτού του είδους των αποβλίττων είναι ο ίδιος και σε άλλα μέταλλα όπως ο χαλκός και ο ορείχαλκος. Επιπλέον έχει παρατηρηθεί πως η μορφή είναι η ίδια ακόμη και στην κατεργασία τελείως διαφορετικών υλικών. Αυτό σημαίνει πως σε υψηλές ταχύτητες φραιζαρίσματος ο μηχανισμός μορφοποίησης αποβλίττου είναι ανεξάρτητος από το κατεργαζόμενο υλικό.

Οι Lucca και Seo μελέτησαν πειραματικά την επίδραση που έχει η γεωμετρίας της κόψης εργαλείου από μονοκρυσταλλικό διαμάντι στην ειδική ενέργεια κατά την υψηλής ακρίβειας ορθογώνια κοπή εν κενό του Te-Cu. Η ονομαστική γωνία του αποβλίττου έχει μεγάλη επίδραση στην ειδική ενέργεια όταν το βάθος κοπής είναι μικρότερο από το προφίλ της κόψης όπως γίνεται και με την ενεργό γωνία του αποβλίττου όταν το βάθος κοπής πλησιάζει στο μέγεθος της κόψης. Οι Moriwaki και Okuda και οι Furukawa και Mononuki παρατήρησαν μια μεγάλη αύξηση της ενέργειας κατά τη διάρκεια των πειραμάτων τόρνευσης με διαμάντι σε βάθος κοπής μικρότερο του ενός μm. Ένα μέρος αυτής της αυξημένης ενέργειας σε μικρό βάθος κοπής οφείλεται στο γεγονός ότι η ελαστική επαναφορά του υλικού κάτω από την πλευρική επιφάνεια οδηγεί σε ολίσθηση του κοπτικού. Επιπλέον, σε αυτό το επίπεδο η ενεργός γωνία του κοπτικού γίνεται αρνητική και το κοπτικό καταλήγει να βυθίζεται στην επιφάνεια χωρίς να αφαιρεί υλικό, πράγμα που συμβάλλει ουσιαστικά στην αύξηση της ειδικής ενέργειας (σχήμα 3.8). Ο Lucca κ.α. συμπέραναν επίσης ότι η συνολική ενέργεια φαίνεται να αυξάνει σημαντικά σε μικρά βάθη κοπής κατά τη μικροκατεργασία του OFHC χαλκού. Οπότε η ειδική ενέργεια συνδέεται στενά με το ελάχιστο πάχος του αποβλίττου και μπορεί να αποτελέσει έναν ακόμα δείκτη για αλλαγές στον τρόπο κοπής και στον έλεγχο της όλης διαδικασίας.



Σχήμα 3.8 Διαμόρφωση αποβλίττου, ολίσθηση και βύθιση σε ορθογωνική κοπή μετάλλου

## 3.3 Τραχύτητα Επιφάνειας

Υπάρχουν αρκετά μοντέλα στη βιβλιογραφία στα οποία τα πειραματικά αποτελέσματα προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια τα θεωρητικά. Παρόλα αυτά λόγω των δυναμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και της μεγάλης επίδρασης των παραμέτρων του υλικού, δεν υπάρχει ακόμα κάποιο μοντέλο που να δίνει μεγάλη ακρίβεια για όλες τις περιπτώσεις. Στο σχήμα 3.9 παρουσιάζονται τοπομορφίες επιφάνειας μετά από μικροφραιζάρισμα για διάφορες προώσεις. Η τοπομορφία της επιφάνειας παίζει σημαντικό ρόλο για τον προσδιορισμός της τραχύτητας. Στο σχήμα 3.10 φαίνεται η επίδραση του κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού και του βάθους κοπής στην τραχύτητα. Όπως είναι φανερό η κοπή κατά την διεύθυνση (011) έχει τη μικρότερη επίδραση στην αναπτυσσόμενη τραχύτητα.



Σχήμα 3.9 Τοπομορφία μικροφραιζαρίσματος για διάφορες προώσεις F



Σχήμα 3.10 Επίδραση της κρυσταλλογραφικής διεύθυνσης και του βάθους κοπής στην τραχύτητα (Yi Quin)

3.3.1 Επίδραση του ελάχιστου πάχους αποβλίττου στην τραχύτητα επιφάνειας.

Ο Weule κ.α. εξήγησαν τη σχέση της τραχύτητας της επιφάνειας με το ελάχιστο βάθος κοπής. Βρήκαν ότι το ελάχιστο πάχος αποβλίττου (ή το ελάχιστο βάθος κοπής) εξαρτάται σε πρώτο βαθμό από την αιχμηρότητα του κοπτικού εργαλείου και σε δεύτερο βαθμό από τις ιδιότητες του υλικού κατεργασίας. Η τραχύτητα της επιφάνειας μπορεί να προβλεφθεί με βάση την επαναφορά του ελαστικά παραμορφωμένου υλικού όταν το βάθος κοπής φτάνει ένα άνω όριο του ελάχιστου πάχους του αποβλίττου όπου το υλικό αφαιρείται με διάτμηση.

Σε πείραμα μικροφραιζαρίσματος με κοπτικό από καρβίδιο βολφραμίου ακτίνας 5μm σε χάλυβα SAE 1045, οι ερευνητές υπέθεσαν ότι η επίδραση του ελαχίστου πάχους αποβλίττου ήταν αρμόδια για το πριονωτό προφίλ της επιφάνειας (σχήμα 3.11). Η αναλογία του ελάχιστου πάχους αποβλίττου προς την ακτίνα της κόψης υπολογίστηκε 0,293, πολύ μεγαλύτερη από αυτήν σε τόρνευση με ένα πολύ πιο αιχμηρό εργαλείο από διαμάντι.



Σχήμα 3.11 Αποτελέσματα τραχύτητας επιφάνειας με μικροφραιζάρισμα

# 3.3.2 Επίδραση της ταχύτητας κοπής στην τραχύτητα επιφάνειας

Το σχήμα 3.12 αποτελεί χαρακτηριστικό διάγραμμα παρόμοιο με τη συμβατική διαδικασία κοπής. Τα μαλακά υλικά εμφανίζουν αυξανόμενη τραχύτητα επιφάνειας σε χαμηλές ταχύτητες κοπής. Όσο πιο σκληρό είναι το υλικό, τόσο η μέγιστη τραχύτητα της επιφάνειας μετατοπίζεται προς χαμηλότερες ταχύτητες κοπής. Στις υψηλότερες ταχύτητες κοπής οι τιμές της τραχύτητας τείνουν προς μια σταθερή τιμή, η οποία δεν μπορεί να μειωθεί με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Σε γενικές γραμμές, η μέση επιφανειακή τραχύτητα σε υψηλές ταχύτητες κοπής γίνεται καλύτερη όσο πιο σκληρό είναι το υλικό.

Μελέτες έχουν δείξει ότι η ύπαρξη ψευδοκοπής αυξάνει την τραχύτητα ακόμη και σε χαμηλές ταχύτητες κοπής στην κατεργασία μαλακών υλικών. Το σχήμα 3.13 αποδεικνύει ότι οι ψευδοκοπές οδηγούν σε κακή ποιότητα επιφάνειας στη μικροκοπή, όπως είναι ήδη γνωστό από τη συμβατική κοπή.



cutting velocity v<sub>c</sub> [m/min]

**Σχήμα 3.12** Τραχύτητα επιφάνειας συναρτήσει της δύναμης κοπής για υλικά διαφορετικής σκληρότητας.



**Σχήμα 3.13** Αποτελέσματα της ψευδοκοπής στην τραχύτητα επιφάνειας σε μικροκοπή.

Προκειμένου να επιτευχθεί μια αποδεκτή ποιότητα επιφάνειας στη μικροκοπή συστήνεται η εφαρμογή υψηλών ταχυτήτων κοπής και η επιλογή σκληρών, ομοιογενών υλικών. Όμως επειδή η διάμετρος των εργαλείων που χρησιμοποιούνται είναι πολύ μικρή, η πρώτη παράμετρος είναι μάλλον δύσκολο να ικανοποιηθεί. Ως εκ τούτου, απαραίτητη προϋπόθεση για τη μικροκοπή είναι τα υλικά να βρίσκονται σε σκληρή, ομοιογενή κατάσταση.

3.3.3 Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας της κόψης στην τραχύτητα επιφάνειας

Η εφικτή τραχύτητα επιφάνειας εξαρτάται από το υλικό και την κατάστασή στην οποία βρίσκεται όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Αυτό οφείλεται στη συμπεριφορά του υλικού κατά τη διαδικασία κοπής. Καθώς το εργαλείο εισέρχεται στο υλικό, η αρχική ελαστική παραμόρφωση της επιφάνειας ακολουθείται από πλαστική παραμόρφωση. Σε ένα ορισμένο βάθος κοπής, το οποίο ονομάζεται ελάχιστο βάθος κοπής, γίνεται ο διαχωρισμός του αποβλίττου από το υλικό. Αυτό το ελάχιστο βάθος κοπής είναι συνάρτηση της αιχμηρότητας της κόψης και των ιδιοτήτων του υλικού. Κατά συνέπεια, η πορεία του εργαλείου θα πρέπει να υπερβαίνει το ελάχιστο βάθος κοπής ώστε να διασφαλιστεί η απομάκρυνση του αποβλίττου. Η εφικτή τραχύτητα ορίζεται από το ποσοστό του ελαστικά παραμορφωμένου υλικού, το οποίο γυρνάει πίσω στο αυλάκι και μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση εφόσον το *hmin* είναι γνωστό:

$$R_{th} = \frac{fz^{2}}{8r} + \frac{h_{min}}{2} \left(1 + \frac{rh_{min}}{fz^{2}}\right)$$

όπου, r :η ακτίνα της κόψης του εργαλείου
 f z :η πρόωση ανά δόντι
 hmin :το ελάχιστο βάθος κοπής
 Rth :η θεωρητική εφικτή τραχύτητα της επιφάνειας

Το σχήμα 3.14 απεικονίζει το σχηματισμό του πριονωτού προφίλ της επιφάνειας λόγω της επίδρασης του ελάχιστου πάχους αποβλίττου. Επίσης παρατηρήθηκε ότι όσο πιο μαλακό είναι το υλικό τόσο αυξάνεται η τραχύτητα επιφάνειας. Σε κάποιες περιπτώσεις εμφανίστηκε βύθιση του κοπτικού, γεγονός που επηρεάζεται δραστικά από το ελάχιστο πάχος αποβλίττου με αποτέλεσμα να αυξάνεται έντονα η τραχύτητα επιφάνειας. Επομένως, οι ερευνητές υποστήριξαν ότι το ελάχιστο πάχος αποβλίττου εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες του υλικού.





Τραχύτητες επιφάνειας της τάξης των 0.8μm(Rz) είναι δυνατόν να επιτευχθούν συνδυάζοντας ιδανικά τις παραμέτρους μιας κατεργασίας. Με την κατεργασία ενός υλικού, το οποίο συνδυάζει καλή σκληρότητα με την κατάλληλη ολκιμότητα, είναι δυνατή η κατασκευή δομών χωρίς το σχηματισμό ξεθυμασμάτων και με πολύ καλή γεωμετρία όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15. Η δομή του σχήματος αποτελείται από στήλες με βάθος 1mm και διατομή 200μm\*200μm με μικροφραιζάρισμα θερμικά επεξεργασμένου χάλυβα SAE1045. Η ταχύτητα κοπής είναι 420m/min, ο ρυθμός πρόωσης είναι της τάξης του 0,1mm ανά δόντι και βάθος κοπής μεταξύ 0,1mm στο φινίρισμα και 0,4mm για γρήγορη αφαίρεση υλικού.



Σχήμα 3.15 Διάταξη από στήλες σε SAE1045 σε μικροφραιζάρισμα με εργαλείο μιας κόψης

# Συμπεράσματα πειραματικής μελέτης της τραχύτητας επιφανείας σε κατεργασία μικροφραιζαρίσματος επίπεδης απόληξης.

- Η τραχύτητα επιφάνειας επηρεάζεται έντονα από την ακτίνα της κόψης των εργαλείων.
   Το σχήμα 3.16 δείχνει ότι η τραχύτητα επιφάνειας που παράγεται από ένα εργαλείο με ακτίνα κόψης 5μm είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που παράγεται από ένα εργαλείο με ακτίνα 2μm.
- Η τραχύτητα της επιφάνειας του τεμαχίου επηρεάζεται σημαντικά από την πρόωση. Παρατηρήθηκε ότι για ακτίνα κόψης 2μm, όσο η πρόωση μειώνεται σε μια ορισμένη τιμή, η τραχύτητα της επιφάνειας αρχίζει να αυξάνει, δείχνοντας ότι υπάρχει μια βέλτιστη πρόωση η οποία δίνει τη μικρότερη τιμή τραχύτητας επιφάνειας. Στο συμπέρασμα αυτό οδήγησαν τα σημάδια της πρόωσης όσο αυξάνεται, καθώς και η επίδραση του ελάχιστου πάχους αποβλίττου που έχει ως συνέπεια το κοπτικό να εκτελεί περάσματα χωρίς να αφαιρεί υλικό όσο η πρόωση μειώνεται.



**Σχήμα 3.16** Επίδραση της ακτίνας κόψης του εργαλείου στην τραχύτητα επιφάνειας κατά την κατεργασία περλίτη.

# 4. Σχηματισμός Απολήξεων

Οι ατέλειες στην επιφάνεια των τεμαχίων όπως το κακό τελείωμα στις ακμές, και οι απολήξεις δημιουργούσαν για πολύ καιρό προβλήματα στις συμβατικές κατεργασίες κοπής. Μερικά από αυτά τα προβλήματα ξεπεράστηκαν με μετέπειτα επεξεργασίες και βελτιστοποίηση των κατεργασιών. Τα προβλήματα αυτά είναι εξίσου σημαντικά και στις μικροκατεργασίες και απαιτούν ακόμα μεγαλύτερη προσοχή επειδή, σε πολλές περιπτώσεις, τα χαρακτηριστικά των υλικών ή οι περιορισμοί στη γεωμετρία των τεμαχίων δεν επιτρέπουν την επίλυσή τους. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζονται μερικές χαρακτηριστικές ατέλειες κατά το μικροφραιζάρισμα.





Σχήμα 4.1 Τυπικά ελαττώματα επιφάνειας σε μικροκατεργασία

# 4.1 Τύποι Ξεθυμασμάτων

Ο Gillespie, όρισε τρία βασικά είδη απολήξεων όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 4.2:

- α) Poisson
- β) Tear
- γ) Roll-over

Ο τύπος Poisson είναι αποτέλεσμα της τάσης του υλικού να διογκώνεται στις πλευρές όταν συμπιέζεται μέχρι να επέλθει μόνιμη πλαστική παραμόρφωση. Ο τύπος tear προκύπτει όταν το υλικού αποσπάται από το τεμάχιο χωρίς όμως να κόβεται. Ενώ ο τύπος rollover είναι ουσιαστικά ένα απόβλιττο λυγισμένο και δεν αποκόπτεται οδηγώντας στη δημιουργία μιας μεγάλης απόληξης. Αυτός ο τύπος είναι επίσης γνωστός ως απόληξη εξόδου (exit-burr) γιατί συνήθως σχηματίζεται στο τέλος της κοπής στο μικροφραιζάρισμα.



Ο συνδυασμός απόληξης Poisson και μιας απόληξης tear μπορεί να καταλήξει στο λεγόμενο top-burr ή απόληξη εισόδου η οποία εμφανίζεται στην άνω πλευρά του τεμαχίου όταν το εργαλείο κόβει μια αυλάκωση ή κατά μήκος της περιφέρειας μιας τρύπας όταν το εργαλείο εισέρχεται σε ένα τεμάχιο (σχήμα 4.3). Στη συμβατική κοπή, οι απολήξεις εισόδου είναι αρκετά μικρότερες από τις απολήξεις εξόδου, και έτσι δεν είναι απαραίτητη η διαδικασία αφαίρεσης τους. Ωστόσο, στη μικροκοπή οι απολήξεις εισόδου είναι συγκριτικά μεγαλύτερες, διότι η ακτίνα της κόψης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την πρόωση ανά δόντι.





Σχήμα 4.3 Παραδείγματα απολήξεων εισόδου (α) σε μικροφραιζάρισμα και (β) σε μικροδιάτρηση

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη μελέτη των απολήξεων είναι η μέτρηση του μεγέθους τους: ύψος, πάχος, όγκος και σκληρότητα. Το ύψος και το πάχος είναι οι πιο συνήθεις και εύκολα μετρήσιμες ποσότητες. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τη μέτρηση του ύψους και του πάχους, όπως:

- η μέθοδος επαφής (contact method),
- η μέθοδος οπτικού μικροσκοπίου (optical microscope method) και
- η μέθοδος με οπτικό μηχάνημα CMM (Coordinate Mesurement Machine).

Το ύψος των ξεθυμασμάτων σε ανοξείδωτο χάλυβα του σχήματος 4.4 μετρήθηκε με προφιλόμετρο επιφάνειας.



Σχήμα 4.4 Απολήξεις εισόδου σε ανοξείδωτο χάλυβα
Ο σχηματισμός απόληξης είναι ένας σημαντικός περιορισμός στο ελάχιστο μέγεθος τεμαχίου που θα μπορούσε να υποστεί κατεργασία. Στις πειραματικές μελέτες των Lee και Dornfeld, ερευνήθηκε ο σχηματισμός απολήξεων σε μικροφραιζάρισμα αλουμινίου 6061-Τ6 και σε χαλκό-110. Εξετάστηκε μια σειρά από διαφορετικά πάχη αποβλίττων και βάθη κοπής, και χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία με διαμέτρους 127μm, 254μm, και 635μm. Τα μεγέθη των απολήξεων υπολογίστηκαν ποιοτικά χρησιμοποιώντας μικροσκόπιο SEM. Παρατηρήθηκαν διάφορες μορφές απολήξεων, κάποια κυματιστά και κάποια τυλιγόντουσαν σε ρολά. Στο σχήμα 4.5 φαίνονται οι απολήξεις (α) στην έξοδο και (β) στην είσοδο του κοπτικού, οι οποίες βρέθηκαν να είναι αναλογικά μεγαλύτερες από ότι στις συμβατικές κατεργασίες φραιζαρίσματος λαμβάνοντας υπόψη την αναλογία του μεγέθους των απολήξεων προς το πάχος του αποβλίττου.







Σχήμα 4.5 Σχηματισμός απολήξεων σε μικροφραιζάρισμα (α) στην έξοδο και (β) στην είσοδο του κοπτικού.

Οι ερευνητές απέδωσαν αυτήν τη διαφορά στη χαμηλή ταχύτητα κοπής και τη μεγάλη αναλογία της ακτίνας της κόψης προς το πάχος του αποβλίττου στο φραιζάρισμα. Σε χαμηλές ταχύτητες κοπής, συνήθως το απόβλιττο δε σπάει αλλά κάμπτεται. Όταν η κόψη εξέρχεται από το τεμάχιο, το απόβλιττο τυλίγεται αφήνοντας απόληξη. Επιπλέον, η μεγάλη αναλογία της ακτίνας της κόψης προς το αποβλίττου προκαλεί τριβή και συμπίεση αντί για κοπή δημιουργώντας περισσότερες απολήξεις. Όσο το βάθος κοπής και η πρόωση αυξάνονται τόσο το μέγεθος των απολήξεων βρέθηκε να αυξάνεται.

Οι Lee και Dornfeld πραγματοποίησαν πειράματα μικροφραιζαρίσματος αυλακώσεων σε αλουμίνιο και χαλκό και βρήκαν ότι ανάλογα με τη γεωμετρία και τη σχετική θέση κοπτικού-τεμαχίου δημιουργούνται διάφοροι τύποι απολήξεων. Αυτές οι μορφές απολήξεων ήταν παρόμοιες με αυτές που εμφανίζονται στις μακροκατεργασίες και επηρεάζουν τις παραμέτρους κοπής. Μια σημαντική παρατήρηση που έγινε ήταν ότι η έκκεντρη κίνηση των κοπτικών εργαλείων (tool run-out) επιδρούσε σημαντικά στη διαμόρφωση απόληξης στο μικροφραιζάρισμα αυλακώσεων. Ο Bissacco κ.α. βρήκαν ότι στο μικροφραιζάρισμα σχετικά μεγάλες απολήξεις που σχηματίστηκαν οφείλονταν στην επίδρασης της κλίμακας. Όταν η αναλογία του βάθους κοπής προς την ακτίνα της κόψης είναι μικρή τότε υψηλή διαξονική θλιπτική τάση σπρώχνει το υλικό προς την ελεύθερη επιφάνεια, δημιουργώντας έτσι μεγάλες απολήξεις.

Πρόσφατα πειράματα σε μικροφραιζάρισμα ανοξείδωτου χάλυβα έδειξαν ότι το ύψος της απόληξης αυξάνεται γραμμικά καθώς αυξάνεται η πρόωση και η ταχύτητα κοπής. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση όπου η ακτίνα της κόψης είναι μεγαλύτερη από την πρόωση όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6 Ύψος απολήξεων συναρτήσει της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής

Σημαντικός στόχος στη μικροκοπή είναι η αποφυγή δημιουργίας των απολήξεων. Οι απολήξεις μπορούν να μειωθούν με τη σωστή τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου, τον ορθό συνδυασμό των παραμέτρων της κατεργασίας και την κατάσταση του υλικού. Και σε αυτή την περίπτωση οι υψηλές ταχύτητες κοπής είναι πλεονεκτικές. Αντίθετα με τον ισχυρισμό ότι η ποιότητα επιφάνειας είναι καλύτερη στα σκληρότερα υλικά, οι απολήξεις σχηματίζονταν συχνότερα σε υλικά που έχουν σκληρυνθεί (σχήμα 4.7). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έχουμε ταχύτερη φθορά του εργαλείου, κατά την κοπή σκληρών υλικών.



Σχήμα 4.7 Δημιουργία απολήξεων για διαφορετική σκληρότητα του υλικού

Όπως φαίνεται τα τοιχώματα της αυλάκωσης παρεκκλίνουν στα σκληρά υλικά. Αυτό οφείλεται στην ξαφνική ψύξη η οποία προκαλεί υψηλές εσωτερικές τάσεις που απελευθερώνονται κατά τη διαδικασία κοπής. Επιπλέον μπορεί να εμφανιστούν ρωγμές στην περιθωριακή ζώνη της μικροδομής. Αντίθετα, η όλκιμη κατάσταση του υλικού, σε θερμοκρασία T=600 °C, δεν εμφανίζει απολήξεις. Καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά τη μείωση των απολήξεων και την ποιότητα της επιφάνειας πραγματοποιούνται, εάν το υλικό είναι ομοιογενές, σκληρό και χωρίς εσωτερικές τάσεις. Για το λόγο αυτό θα πρέπει κάθε διαδικασία κοπής να βελτιστοποιείται σύμφωνα με το υλικό και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται.

Το κράμα NiTi (νικελίου- τιτανίου) χρησιμοποιείται κυρίως σε ιατρικές εφαρμογές, όπως για χειρουργικά εμφυτεύματα των οποίων η παραγωγή γίνεται συνήθως με μικροφραιζάρισμα. Το συγκεκριμένο υλικό ενώ είναι όλκιμο και κατεργάζεται εύκολα, σκληραίνει κατά τη διάρκεια της κατεργασίας προκαλώντας παρεμπόδιση στο κοπτικό και έντονο σχηματισμό απόληξης. Επιπλέον, η υψηλή ολκιμότητα έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό μεγάλου μήκους, μπερδεμένου και ανάστροφου αποβλίττου. Στη μίκρο κλίμακα αυτά τα απόβλιττα έρχονται σε εμπλοκή με το εργαλείο και την απόληξη και συμβάλλουν στην κακή ποιότητα της τελικής επιφάνειας των τεμαχίων.

## 4.2 Επίδραση του προσανατολισμού της μικροδομής του υλικού στο σχηματισμό απολήξεων

Ως μικροκατεργασία ορίζεται η κατεργασία με εργαλείο του οποίου οι διαστάσεις είναι της τάξης του μέσου μεγέθους των κόκκων του κατεργαζόμενου υλικού ή κατεργασία με εργαλείο του οποίου οι διαστάσεις είναι αρκετά μικρές ώστε το υλικό να χάσει την ισοτροπική του ομοιογένεια. Στις υψηλής ακρίβειας κατεργασίες, το πάχος του μη-παραμορφωμένου αποβλίττου μπορεί να είναι της τάξης μερικών μm ή και λιγότερο. Σε αυτές τις κλίμακες, το αποτέλεσμα της επιφάνειας κατεργασίας και ο μηχανισμός για το σχηματισμό αποβλίττου επηρεάζονται πολύ περισσότερο από τις υλικές ιδιότητες και τη μικροδομή του υλικού των τεμαχίων, όπως η όλκιμή ή ψαθυρή συμπεριφορά και τα μικροτοπογραφικά χαρακτηριστικά όπως κενά, δευτερεύουσες φάσεις, και ενδιάμεσα σωματίδια.

Στην κοπή μονοκρυσταλλικών υλικών ο προσανατολισμός του υλικού ως προς τη διεύθυνση της κοπής έχει σημαντικό αντίκτυπο στην τραχύτητα της προκύπτουσας επιφάνειας. Ομοίως, κατά την κοπή πολυκρυσταλλικών υλικών με τόσο μικρά πάχη αποβλίττου, ο μηχανισμός αφαίρεσης υλικού μπορεί να επηρεαστεί από μεμονωμένους κόκκους και τους αντίστοιχους προσανατολισμούς τους. Επομένως, αντίθετα από τη συμβατική κοπή μετάλλων, ο μηχανισμός κοπής στις μικροκατεργασίες επηρεάζεται περισσότερο από την κρυσταλλογραφία και τα ενεργά συστήματα ολίσθησης μέσα στο κομμάτι προς κατεργασία (σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8 Σύγκριση σχετικής κλίμακας συμβατικής κατεργασίας και μικροκατεργασίας

Συνθήκες κατεργασίας		
Μονοκρυσταλλικός χαλκός (OFHC)	διάμετρος: πάχος:	d=12.7mm t= 1mm
	Προσανατολισμός τεμαχίων	〈100〉, 〈110〉, 〈111〉
Πολυκρυσταλλικός χαλκός (OFHC)	Τετραγωνικό τεμάχιο	α = 10mm
	Μέγεθος κόκκων :	από 0,1 έως 4mm

#### 4.2.1 Πειραματική Μελέτη σχηματισμού ξεθυμάσματος στο μικροφραιζάρισμα

Κοπτικό εργαλείο	Υλικό: ακτίνα κόψης:	διαμάντι r = 0,274mm
	γωνία αποβλίττου γωνία ελευθερίας	10 <sup>°</sup> 12,5 <sup>°</sup>
Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου	420rpm	
Ταχύτητα κοπής επιφανείας	2,1m/s	
Πρόωση (σταθερή cross-feed)	13,3µm/rev	
Θεωρητικές τιμές τελικής τραχύτη- τας επιφανείας	Rth (peak- valley finish) = 80nm Ra = 20nm	



Σχήμα 4.9 Σχηματική παράσταση της κατεύθυνσης κοπής και της σχέσης εργαλείου τεμαχίου

Το σχήμα 4.10 παρουσιάζει την αλληλεπίδραση εργαλείου-τεμαχίου σε διαφορετικούς προσανατολισμούς του τεμαχίου, με τα πιθανώς ενεργά συστήματα ολίσθησης όπως παρουσιάζονται από την πυραμίδα στο σχήμα 4.10α (κάθε έδρα της πυραμίδας αντιπροσωπεύει ένα επίπεδο και κάθε κορυφή αντιπροσωπεύει μια κατεύθυνση. Θεωρείται ότι το εργαλείο ενεργεί για να αναγκάσει τις περισσότερες μετατοπίσεις σε μια ανοδική πορεία μακριά από το κομμάτι κατεργασίας, και κάποιες μετατοπίσεις οδεύουν προς τα κάτω, πίσω στην επιφάνεια κατεργασίας. Στην περίπτωση που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.10α για κατεργασία στην (100) κατεύθυνση κατά μήκος της επιφάνειας {100}, οι μετατοπίσεις στα παρακείμενα συστήματα ολίσθησης (τα σχεδιασμένα συμπαγή βέλη) κινούνται παράλληλα το ένα στο άλλο, επιτρέποντας έτσι ένα σχετικά εύκολο σχηματισμό αποβλίττου και ομαλή τελική επιφάνεια. Αυτή η συμπεριφορά απεικονίζεται στην ομαλή εμφάνιση του αποβλίττου στο σχήμα 4.11β.

Στην περίπτωση του σχήματος 4.10β (κατεργασία στην κατεύθυνση (100) κατά μήκος της πλευράς {100}), οι μετατοπίσεις στο ίδιο {111} επίπεδο συγκρούονται η μία με την άλλη, γεγονός που καθιστά σχετικά δυσκολότερο (και καταναλώνει περισσότερη ενέργεια) το σχηματισμό αποβλίττου. Η παρεμβολή των παρακείμενων μετατοπίσεων φαίνεται τόσο στην τοπολογία του αποβλίττου όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12β (παραμορφωμένο απόβλιττο), όσο και στην αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας. Ως εκ τούτου, για κάθε μονοκρυσταλλικό κομμάτι, υπάρχουν συγκεκριμένοι κρυσταλλογραφικοί προσανατολισμοί που ευνοούν τη σχετικά ευκολότερη κίνηση των μετατοπίσεων και το σχηματισμό του αποβλίττου από άλλους προσανατολισμούς.



Σχήμα 4.10 (α) σύστημα ολίσθησης εργαλείου στη διεύθυνση (100), επίπεδο (100) (β) σύστημα ολίσθησης εργαλείου στη διεύθυνση (100), επίπεδο (110)

# Αποτελέσματα

## 1. (100) - {100}

- Το εργαλείο κόβει σε ευθεία πορεία παράλληλη στην κατεύθυνση (100) με την επιφάνεια κατεργασίας στο επίπεδο (100) (σχήμα 4.11γ)
- Ομαλή επιφάνεια με μέση τραχύτητα Ra = 23,1nm
- Σχηματίστηκε πολύ μικρή απόληξη η οποία προεξείχε 5μm (σχήμα 4.11α)
- Σχηματισμός ομοιόμορφου αποβλίττου (σχήμα 4.11β)

## 2. (100) - {110}

- Ο κρύσταλλος (100) στη συνέχεια κόπηκε κατά πλάτος του {110} επιπέδου με περιστροφή του κρυστάλλου στη βάση συγκράτησης κατά 45° (σχήμα 4.12γ).
- Βρέθηκε σημαντική αλλαγή στο ύψος και στη γεωμετρία των απολήξεων με σχετικά μεγάλες απολήξεις προσκολλημένες στην άκρη (σχήμα 4.12α).
- Η μέση τραχύτητα επιφάνειας αυξήθηκε περίπου στα 30,4nm Ra.
- Επίσης, παρατηρήθηκε σημαντική αλλαγή στην τοπολογία του αποβλίττου, με τις άκρες του αποβλίττου να έχουν μορφή φτερού (σχήμα 4.12β).

# 3. (110) - {100}

- Κατεργασία στην κατεύθυνση (110) κατά μήκος του επιπέδου {100} (σχήμα 4.13α)
- Ύψος απόληξης περίπου 10μm χωρίς σπασίματα.
- Η παρουσία κενών και τοπικών ατελειών υποβίβασε την τραχύτητα της επιφάνεια σημαντικά σε ορισμένα σημεία, αλλά στις περιοχές χωρίς ατέλειες μετρήθηκε μια μέση τραχύτητα 32,6nm R<sub>a</sub> (σχήμα 4.13γ).
- Το απόβλιττο που συλλέχθηκε εμφάνιζε μια ελαφρώς πτυχωτή μορφή (σχήμα 4.13β).
- 4. (110) {111}
- Ο κρύσταλλος (110) κόπηκε έπειτα κατά πλάτος του επιπέδου {111} με περιστροφή του τεμαχίου κατά 54,7°.
- Δημιουργία ρωγμών και μεγάλων απολήξεων μήκους περίπου 200μm (σχήμα 4.14α).
- Η τραχύτητα επιφάνειας αυξήθηκε ελαφρώς στα 37,1nm R<sub>a</sub> (σχήμα 4.14γ)
- Μικρή αύξηση των πτυχώσεων στην άκρη του αποβλίττου (σχήμα 4.14β).

## 5. (110) - {110}

 Περιστροφή του κρυστάλλου (110) κατά 90° από τον αρχικό προσανατολισμό, επιφάνεια κατεργασίας κατά μήκος του {110} επιπέδου.

- Σχηματίστηκαν απολήξεις όμοιου μεγέθους (σχήμα 4.15α),
- το απόβλιττο (σχήμα 4.15β) εμφανίζει μεγαλύτερη παραμόρφωση
- Παρατηρείται σημαντική αύξηση στην τραχύτητα της επιφάνειας (σχήμα 4.15γ), με μέση τιμή 130nm Ra, δείχνοντας ότι αυτός ο προσανατολισμός δεν ευνοεί καθόλου την κατεργασία.



Σχήμα 4.15 κατεύθυνση (110) - επίπεδο (110)

Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι η περιστροφή του τεμαχίου σε διαφορετικούς προσανατολισμούς μπορεί να επιφέρει πολύ σημαντική αλλαγή στη γεωμετρία των απολήξεων, την τοπολογία των αποβλίττων και την τραχύτητα της επιφάνειας.

## Επίδραση της ταχύτητας κοπής

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 4.16) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κατεργασίας του τεμαχίου <110> σε διάφορους προσανατολισμούς για διαφορετικές ταχύτητες κοπής. Η πρώτη στήλη του σχήματος παρουσιάζει μια σειρά κοπών με ταχύτητα 2,1m/s σε τέσσερις προσανατολισμούς με την επιφάνεια κατεργασίας παράλληλη στα επίπεδα {100}, {322}, {111} και {110} αντίστοιχα. Στη συνέχεια η ταχύτητα κοπής αυξήθηκε στα 6,8m/s και οι προκύπτουσες επιφάνειες φαίνονται στη δεύτερη στήλη με σημαντικές διαφορές στο σχηματισμό των απολήξεων. Λιγότερες απολήξεις σχηματίστηκαν στους {100}, {322} και {111} προσανατολισμούς στις υψηλότερες ταχύτητες κοπής. Οι υψηλότερες ταχύτητες οδήγησαν επίσης σε μια μικρή μείωση του συνολικού ύψους των απολήξεων.



Σχήμα 4.16 Επίδραση της ταχύτητας κοπής στο σχηματισμό απολήξεων

Το σχήμα 4.17 παρουσιάζει τα αποτελέσματα κατεργασίας δύο πολυκρυσταλλικών τεμαχίων χαλκού (μέση διάμετρος κόκκων 250μm) υπό τις ίδιες πειραματικές συνθήκες όπως στα μονοκρυσταλλικά πειράματα. Μετά την κατεργασία, οι τελικές επιφάνειες χαράχτηκαν χημικά για να αποκαλυφτεί η βαθύτερη δομή των κόκκων. Και στις δύο περιπτώσεις, η τοπομορφία της κατεργασμένης επιφάνειας και οι απολήξεις μεταβάλλονται σημαντικά συναρτήσει του προσανατολισμού των κόκκων, με κάθε κόκκο να εμφανίζει διαφορετικό ύψος απόληξης.



Σχήμα 4.17 Εικόνες SEM απολήξεων σε κατεργασία μικροφραιζαρίσματος πολυκρυσταλλικού χαλκού

# 4.2.2 Πειραματική μελέτη σχηματισμού ξεθυμάσματος στη μικροδιάτρηση

Συνθήκες κατεργασίας Διάτρησης (Drilling set-up)			
Πολυκρυσταλλικός χαλκός (OFHC)	Πάχη τεμαχίων	t1 = 130mm t2 = 250µm t3 = 375µm	
Κοπτικό εργαλείο (σχήμα 4.18)	Υλικό: Ακτίνα:	WC χωρίς επικάλυψη D= 250μm	
Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου :	από 6000 εως 8000rpm		
Πρόωση :	από 0,5 έως 10mm/min		



Σχήμα 4.18 Εργαλείο μικροδιάτρησης διαμέτρου 250μm

## Αποτελέσματα

Ο σχηματισμός απολήξεων στη μικροδιάτρηση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με κυρίαρχο την πρόωση. Γενικά, στις υψηλές προώσεις οι απολήξεις έχουν μορφή "κορώνας", ενώ στις χαμηλές είναι πιο ομοιόμορφες στα περισσότερα όλκιμα μέταλλα (σχήμα 4.19). Το όριο μεταξύ των διαφορετικών τύπων απολήξεων εξαρτάται συνήθως από τις ιδιότητες του υλικού.



- 3. Uniform Burr with drill cap
- 4. Crown Burr
- 5. Transient Burr



Σχήμα 4.19 Παραδείγματα απολήξεων μικροδιάτρησης σε όλκιμα μέταλλα

Ακολουθούν χαρακτηριστικοί τύποι απολήξεων που σχηματίστηκαν σε πειραματική μελέτη μικροδιάτρησης με μέγιστη πρόωση 10mm/min (σχήμα 4.20). Οι μορφές τους είναι όμοιες με εκείνες της συμβατικής διάτρησης, γεγονός που δείχνει ότι ο μηχανισμός σχηματισμού απόληξης είναι παρόμοιος στις δυο περιπτώσεις. Στο αρχικό στάδιο σχηματισμού της απόληξης, καθώς το τρυπάνι προχωράει, η πλαστική ζώνη στο κέντρο της κόψης του τρυπανιού φθάνει στην επιφάνεια εξόδου του τεμαχίου. Η πλαστική ζώνη που αρχικά διαμορφώνεται στην περιοχή κοντά στο κέντρο του τρυπανιού επεκτείνεται στην περιφέρεια της οπής (σχήμα 4.21α). Με την επέκταση της πλαστικής ζώνης, ένα αρχικό σπάσιμο εμφανίζεται στην περίμετρο του τρυπανιού και δημιουργείται μια ομοιόμορφη απόληξη (σχήμα 4.21β). Λόγω των ατελειών στη διαδικασία, το αρχικό σπάσιμο δεν εμφανίζεται και αυτό οδηγεί στο σχηματισμό καπέλου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.21δ.





Σχήμα 4.20 Παραδείγματα ομοιόμορφων απολήξεων μικροδιάτρησης στις 8000rev/min με διαφορετικές προώσεις (α) 10mm/min και (β) 5mm/min









Σχήμα 4.21 Διαδικασία σχηματισμού απολήξεων (α) επέκταση πλαστικής ζώνης από το κέντρο στην περίμετρο (β) δημιουργία αρχικού σπασίματος (γ) επέκταση της θραύσης στην περίμετρο (δ) σχηματισμός τελικής απόληξης

Σε γενικές γραμμές η εμφάνιση των απολήξεων στη μίκρο και στη μακροκλίμακα είναι παρόμοια, ωστόσο παρατηρήθηκε ότι στις μικροκατεργασίες το ύψος και η τοπομορφία των απολήξεων ποικίλλουν με τον προσανατολισμό των κόκκων. Εφόσον η διάμετρος του εργαλείου είναι της τάξης μεγέθους των κόκκων, στις περισσότερες περιπτώσεις, η φυσική της κοπής στην κόψη των εργαλείων διαφέρει καθώς το εργαλείο κινείται από κόκκο σε KÓKKO.

Επειδή η κατεύθυνση κοπής του τρυπανιού αλλάζει συνεχώς κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, και ο προσανατολισμός των μεμονωμένων κόκκων δεν είναι γνωστός εκ των προτέρων, είναι πολύ δύσκολο να ισχύσει μια σαφής σχέση μεταξύ αυτών των δύο παραγόντων στη διάτρηση. Εντούτοις, στο σχήμα 4.22 φαίνεται καθαρά ότι ο προσανατολισμός ενός κόκκου ευνοεί μια συγκεκριμένη κατεύθυνση κοπής, το οποίο οδηγεί σε όλκιμη κοπή και στη συνέχεια σε μεγαλύτερη απόληξη.



(α) απόληξη εντός των ορίων των κόκκων (10mm/min, 7000rpm)



απόληξη (Y) (5mm/min, 7000rpm)



(β) απόληξη πάνω στα όρια των κόκκων (5mm/min, 6000rpm)



πάνω σε μικρό κόκκο (δ) απόληξη που ακολουθεί την τοπολογία των κόκκων (10mm/min, 7000rpm)

Σχήμα 4.22 Σχηματισμός απολήξεων μικροδιάτρησης δια μέσου διαφορετικών κόκκων

Από την παραπάνω μελέτη διαπιστώθηκε ότι προσανατολισμός των κόκκων του υλικού επηρεάζει το σχηματισμό απολήξεων στις μικροκατεργασίες. Ένα ενιαίο υλικό μπορεί να παρουσιάσει όλκιμη συμπεριφορά κοπής σε έναν κόκκο του και ψαθυρή σε έναν άλλο, που δείχνει για επιθυμητά αποτελέσματα τραχύτητας επιφάνειας να λαμβάνεται υπόψη ο κρυσταλλογραφικός προσανατολισμός του υλικού. Αυτές οι παρατηρήσεις καταδεικνύουν τη σημασία περαιτέρω έρευνας σε αυτόν τον τομέα.

### 5. Δυνάμεις Κοπής

Η δύναμη κοπής είναι από τις πιο αντιπροσωπευτικές μεταβλητές που επιτρέπει την κρίση και την εξήγηση των βασικών φαινομένων των κατεργασιών όπως:

- η φθορά
- η βελτιστοποίηση των μεταβλητών εισόδου
- η πρόβλεψη της ποιότητας των τελικών τεμαχίων
- ο υπολογισμός των ενεργειακών ποσοστών στο εργαλείο, στο απόβλιττο και στο τεμάχιο

Επίσης ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής είναι πολύ σημαντικός στο σχεδιασμό των εργαλειομηχανών. Ωστόσο ο ακριβής προσδιορισμός των δυνάμεων στις μικροκατεργασίες είναι δύσκολος, λόγω της συχνότητας διέγερσης που προκαλείται από την αλληλεπίδραση του κοπτικού με το τεμάχιο κατά τη διάρκεια μιας κατεργασίας.

Το σχήμα 5.1 παρουσιάζει τις φυσικές συχνότητες ενός συμβατικού δυναμόμετρου και τις συχνότητες διέγερσης (κίτρινη περιοχή) μιας μικροκατεργασίας (ταχύτητα ατράκτου 160000rev/min). Συνεπώς οι αισθητήρες και τα συστήματα μέτρησης δύναμης πρέπει να έχουν φυσικές συχνότητες πάνω από τις συχνότητες διέγερσης, τουλάχιστον άνω των 8kHz.



Σχήμα 5.1 Φυσικές συχνότητες στον χ-άξονα και συχνότητες διέγερσης που συναντώνται σε μικροκατεργασίες.

#### 5.1 Δυνάμεις κοπής και ειδική ενέργεια κοπής

Πειραματική μελέτη ορθογώνιας κοπής με εργαλείο μιας κόψης υψηλής ακρίβειας έδειξε ότι η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου (γωνία αποβλίττου και ακτίνα της κόψης) έχει σημαντική επίδραση στις δυνάμεις κοπής καθώς και στην ειδική ενέργεια κοπής. Όταν το άκοπο πάχος αποβλίττου (uncut chip thickness) πλησιάζει το μέγεθος της ακτίνας της κόψης, τότε η ενεργός γωνία αποβλίττου φαίνεται να καθορίζει τις προκύπτουσες δυνάμεις. Αυτό φαίνεται κυρίως από τη μελέτη της διεύθυνσης του διανύσματος της δύναμης ως προς το άκοπο πάχος αποβλίττου όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2. Σε μικρά άκοπα πάχη αποβλίττου, η ενεργός και όχι η ονομαστική γωνία αποβλίττου, υπαγορεύει τη διεύθυνση της δύναμης.



Uncut Chip Thickness, t<sub>o</sub> (µm)

**Σχήμα 5.2** Διεύθυνση διανύσματος δύναμης για ένα καινούργιο και ένα φθαρμένο κοπτικό εργαλείο ίδιας γεωμετρίας

Δοκιμές μικροτόρνευσης με κοπτικό από διαμάντι (r = 200nm) σε όλκιμο Al 6061-T6 εκτελέστηκαν για τη μελέτη της γωνίας των δυνάμεων σε ορθογώνια κοπή.

- Βρέθηκε ότι για τιμές πάχους αποβλίττου μικρότερες από την ακτίνα κόψης, η δύναμη ανά μονάδα πλάτους στην κατεύθυνση της πρόωσης αυξάνεται γρηγορότερα από τη δύναμη ανά μονάδα πλάτους στην κατεύθυνση της κοπής.
- Όσο το πάχος αποβλίττου μειώνεται, το διάνυσμα της δύναμης βρέθηκε πιο κοντά στην κατεύθυνση της πρόωσης απ'ότι στην κατεύθυνση της κοπής.
- Επίσης η κατάσταση της ακμής των εργαλείων (φθορά εργαλείου) βρέθηκε να έχει σημαντική επίδραση στις δυνάμεις ώθησης (thrust force) όταν το βάθος κοπής είναι μικρότερο από την ακτίνα της κόψης όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3 Επίδραση της κατάστασης της κόψης του εργαλείου στις ωστικές δυνάμεις σε ορθογώνια κοπή μικροφραιζαρίσματος με εργαλείο μιας κόψης τεμαχίου Al 6061-T6.

### 5.2 Δυνάμεις κοπής στο μικροφραιζάρισμα

Στις κατεργασίες μικροφραιζαρίσματος, η αφαίρεση υλικού επιτυγχάνεται μέσω δύο ταυτόχρονων κινήσεων, την περιστροφή του εργαλείου στην άτρακτο και την κίνηση πρόωσης του τεμαχίου προς το περιστρεφόμενο εργαλείο, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4. Σε κάθε πέρασμα του εργαλείου παράγεται απόβλιττο με μεταβλητό πάχος κατά το μήκος του. Το άκοπο πάχος h του αποβλίττου μπορεί να προσεγγιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

## $h(\theta) = f_t^* sin(\theta)$

όπου **θ** η γωνία θέσης του εργαλείου και **f**<sub>t</sub> η πρόωση ανά δόντι.

Οι δυνάμεις που ενεργούν στο εργαλείο καθορίζονται από δύο συστήματα συντεταγμένων:

- η δύναμη πρόωσης *F<sub>F</sub>* και η δύναμη cross-feed *F<sub>N</sub>* ανήκουν στο σύστημα συντεταγμένων της εργαλειομηχανής
- η ακτινική ωστική δύναμη *F<sub>T</sub>* (radial thrust force) και η εφαπτόμενη δύναμη κοπής *F<sub>c</sub>* ανήκουν στο σύστημα συντεταγμένων περιστροφής του εργαλείου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4.

Στο φραιζάρισμα στη μακροκλίμακα, η πρόωση ανά δόντι (*ft*) είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από την ακτίνα της κόψης, και το κλασικό πρότυπο σχηματισμού αποβλίττου υποθέτει ότι οποιοδήποτε υλικό εμπλέκεται με το δόντι πρέπει να αφαιρείται εντελώς από το κομμάτι προς κατεργασία.



Σχήμα 5.4 Σχηματική παράσταση της κατεργασίας μικροφραιζαρίσματος.

Το σχήμα 5.5(α) επεξηγεί την αλληλεπίδραση ενός εργαλείου μικροφραιζαρίσματος με ένα τεμάχιο και την εκτροπή του λόγω των δυνάμεων που ενεργούν στο δόντι. Το εργαλείο περιστρέφεται με την ταχύτητα της ατράκτου, ενώ το τεμάχιο, τοποθετείται σε ένα γραμμικό επίπεδο και κινείται ταυτόχρονα με κάποια ταχύτητα πρόωσης για να παρέχει την ακτινική κίνηση πρόωσης, από τα δεξιά προς τα αριστερά στο σχήμα 5.5(α). Το εργαλείο εκτρέπεται μακριά από το κομμάτι υπό τις δυνάμεις κοπής, οι οποίες μπορούν να αναλυθούν στην ακτινική δύναμη ώθησης Fr και στην εφαπτόμενη δύναμη κοπής Fc, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5(β).

Το σχήμα περιγράφει τη σχετική μετατόπιση του κοπτικού δοντιού από το κέντρο περιστροφής, όπως φαίνεται από την κορυφή προς το κατώτατο σημείο του εργαλείου. Αν και στο πραγματικό σύστημα μικροφραιζαρίσματος, το εργαλείο εκτρέπεται και στις δύο κατευθύνσεις, η μετατόπιση στην εφαπτόμενη κατεύθυνση μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα επειδή η επίδρασή της στην πραγματική εμπλοκή είναι αμελητέα.



(α) Τρισδιάστατη απεικόνιση κατεργασίας(β) Άνοψη κατεργασίας μικροφραιζαρίσματος



(γ) Ορθογώνια απεικόνιση κοπής χωρίς αφαίρεση υλικού (hg<hm)





(δ) Ορογώνια απεικόνιση κοπής (hg>hm)

Σχήμα 5.5 Εμπλοκή της κόψης του εργαλείου με το τεμάχιο κατεργασίας

Εάν η πρόωση ανά δόντι h(θ<sub>0</sub>) είναι μεγαλύτερη από το ελάχιστο πάχος αποβλίττου h<sub>m</sub>. τότε σχηματίζεται απόβλιττο σε κάθε πέρασμα του δοντιού όπως αναμένεται και στη συμβατική κλίμακα. Η ακολουθία των μαύρων σημείων που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.6(α) δείχνει τη θέση της κόψης σε κάθε πέρασμα. Αν και η θέση της κόψης παρεκκλίνει από τις ιδανικές πορείες λόγω της εκτροπής του εργαλείου, η απόσταση μεταξύ των θέσεων αναφοράς των διαδοχικών περασμάτων των δοντιών είναι σταθερή.





Εφόσον η πραγματική δέσμευση *h<sub>a</sub>* είναι μεγαλύτερη από το ελάχιστο πάχος αποβλίττου *h<sub>m</sub>*, στην περίπτωση του σχήματος 5.6(β), σε κάθε πέρασμα σχηματίζεται απόβλιττο και η διαδικασία συνεχίζεται σε ένα σταθερό καθεστώς κοπής. Πολλοί ερευνητές παγκοσμίως έχουν προσπαθήσει να μοντελοποιήσουν τις δυνάμεις κοπής στο φραιζάρισμα. Όταν ό-μως αυτό πρόκειται να γίνει στη μικροδιάσταση πρέπει να ληφθούν υπόψη ορισμένοι κα-

- Η μικροδομή του υλικού του τεμαχίου κατεργασίας δεν είναι ομογενής [5].
- Καθώς μικραίνει το μέγεθος του κοπτικού εργαλείου η επίδραση της κλίμακας γίνεται ολοένα και πιο σημαντική.
- Η επίδραση της ακτίνας της κόψης δεν είναι αμελητέα [6]. Επηρεάζει το μηχανισμό σχηματισμού αποβλίττου και καθορίζει τη μετάβαση μεταξύ της κατάστασης όπου πραγματοποιείται κοπή και αυτής όπου το εργαλείο περιστρέφεται χωρίς να αφαιρεί υλικό [5].
- Λόγω του μικροσκοπικού μεγέθους τα κοπτικά εργαλεία είναι αρκετά ελαστικά
  [7] με αποτέλεσμα να δημιουργούνται φαινόμενα όπως ο κροταλισμός και ισχυρές εξαναγκασμένες ταλαντώσεις που στο κανονικό φραιζάρισμα θεωρούνται αμελητέες.

Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζονται οι δυνάμεις κοπής στις τρείς διευθύνσεις καθώς και η διεύθυνση του διανύσματος της δύναμης σε σχέση με το πάχος του άκοπου αποβλίττου για διαφορετικές γωνίες αποβλίττου.



**Σχήμα 5.8** Δυνάμεις κοπής στις τρείς διευθύνσεις και κίνηση κοπτικού εργαλείου με δύο κοπτικές ακμές (Yi Quin sel 35)

#### 5.3 Ανάλυση δυνάμεων κοπής

Οι δυνάμεις κοπής μπορούν να θεωρηθούν ως συνάρτηση της συνεχούς γωνίας θέσης θ και του αριθμού των περασμάτων *n*, καθώς η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου είναι σταθερή και παρατηρείται περιοδικότητα των δυνάμεων κοπής κατά μήκος του αριθμού των περασμάτων σε μια σταθερή γωνία θέσης.

## $F_F(\theta_c) = F_F(\theta, n)$ Kai $F_N(\theta_c) = F_N(\theta, n)$

Οι *F<sub>F</sub>*(*θ<sub>g</sub>*) και *F<sub>N</sub>*(*θ<sub>g</sub>*) είναι οι δυνάμεις στη διεύθυνση της πρόωσης και η κάθετη σε αυτήν cross-feed , όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Η σχέση μεταξύ των *θc, θ*, και *του n* ορίζετε ως εξής:

*θc* = *θ* +2π*n* όπου 0 ≤ *θ* < 2π και *n* = 0,1,2, . . .

Η συνισταμένη των δυνάμεων πρόωσης και cross-feed μπορεί να μετασχηματιστεί στις δυνάμεις στις διευθύνσεις της ώθησης και της κοπής με την εξίσωση:

 $F_{T}(\theta, n) = F_{F}(\theta, n)^{*} \sin(\theta) + F_{N}(\theta, n)^{*} \cos(\theta)$  $F_{C}(\theta, n) = F_{F}(\theta, n)^{*} \cos(\theta) - F_{N}(\theta, n)^{*} \sin(\theta)$ 

Οι γωνίες θέσης, στις οποίες υπάρχει εμπλοκή του κοπτικού με το τεμάχιο προς κατεργασία, καταγράφονται και ξανά μηδενίζονται σε κάθε πέρασμα δοντιών, δηλ.θ=0. Γι' αυτό η γωνία εισόδου του εργαλείου καταγράφεται στα στοιχεία της δύναμης, όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 5.9. Τα κυκλάκια σε κάθε γραφική παράσταση του σχήματος 5.9 αντιστοιχούν σε τοπική γωνία θέσης 90°.



**Σχήμα 5.9** Δυνάμεις κοπής συναρτήσει της γωνίας του κοπτικού (measured and transformed cutting forces (ft=3µm))

Στο σχήμα 5.10(α), οι δυνάμεις κοπής και ώθησης που ασκούνται σε θ<sub>0</sub>=90° με πρόωση 3μm ανά δόντι έχουν σχεδιαστεί ως συνάρτηση του αριθμού των περασμάτων για να φανεί η μεταβολή αυτών των δυνάμεων, δείχνοντας το διακεκομμένο σχηματισμό του αποβλίττου. Όταν η πρόωση ανά δόντι αυξάνεται σε 12μm, μεγαλύτερη από το ελάχιστο πάχος αποβλίττου, δεν παρατηρείται μεταβολή στις δυνάμεις κοπής και ώθησης για θ<sub>0</sub>=90° (σχήμα 5.10β), δείχνοντας το σχηματισμό συνεχούς αποβλίττου.



**Σχήμα 5.10** Δυνάμεις κοπής συναρτήσει των περασμάτων του κοπτικού (Cutting forces versus number of tooth passes ( $\theta$ =90°)).

Τα διαγράμματα 5.11(α,β,γ) δείχνουν ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου τόσο αυξάνεται το επίπεδο ασυνέπειας της περιοδικότητας των δυνάμεων κοπής, το οποίο δείχνει ότι η δυναμική απόκριση των εργαλείων φραιζαρίσματος επηρεάζει τη διαδικασία σχηματισμού του αποβλίττου.



**Σχήμα 5.11** Δυνάμεις κοπής συναρτήσει των περασμάτων του κοπτικού για διαφορετικές προώσεις.

## Παρατηρήσεις:

- Υπάρχει χαρακτηριστική μεταβολή των δυνάμεων κοπής και ώθησης σε κάθε πείραμα.
- Ο αριθμός περασμάτων για τον οποίο οι δυνάμεις κοπής μεγιστοποιούνται δεν συμπίπτει για τις δυνάμεις ώθησης.
- Η δύναμη κοπής μεγιστοποιείται ένα πέρασμα πριν από αυτό όπου η δύναμη ώθησης μεγιστοποιείται. Το φαινόμενο αυτό είναι σημαντικό για τον καθορισμό της σχέσης μεταξύ των δυνάμεων κοπής και της πραγματικής εμπλοκής.

5.4 Σχέση ανάμεσα στις δυνάμεις κοπής και στην εμπλοκή του κοπτικού με το υλικό

Η μελέτη της σχέσης των δυνάμεων κοπής με την πραγματική εμπλοκή του εργαλείου στο μικροφραιζάρισμα δείχνει τη μη γραμμική συμπεριφορά, χαρακτηριστική της πραγματικής εμπλοκής κάτω από το ελάχιστο πάχος αποβλίττου. Σύμφωνα με τον Merchant, οι δυνάμεις κοπής αυξάνονται αναλογικά με το πάχος του αποβλίττου όταν αυτό είναι πολύ μεγαλύτερο από την ακτίνα της κόψης. Αλλά όταν το πάχος αποβλίττου είναι τόσο μικρό όσο η ακτίνα της κόψης, η σχέση του με τις δυνάμεις κοπής γίνεται περίπλοκη λόγω της επίδρασης της καμπυλότητας της κοπτικής ακμής των εργαλείων.



Σχήμα 5.12 Δυνάμεις κοπής συναρτήσει της εμπλοκής του κοπτικού

Το σχήμα 5.12 παρουσιάζει τις σχέσεις μεταξύ των δυνάμεων ώθησης και κοπής και της πραγματικής εμπλοκής του εργαλείου. Τα δεδομένα της δύναμης έχουν εξομαλυνθεί με το πλάτος κοπής *w*. Κατά τη διάρκεια του σχηματισμού συνεχούς αποβλίττου, η πραγματική εμπλοκή του εργαλείου είναι η ίδια με την πρόωση ανά δόντι. Κατά συνέπεια, όταν έχουμε κοπή τα σημεία υπολογίζονται από το μέσο όρο των φορτίων της δύναμης στην επιθυμητή- πραγματική εμπλοκή του εργαλείου.

Για παράδειγμα, τα φορτία των δυνάμεων στα 12μm πραγματικής εμπλοκής, (οι μαύροι κύκλοι στα σχήματα 5.12(α) και (β) αντιπροσωπεύουν το μέσο όρο των δυνάμεων ώθησης και κοπής αντίστοιχα, που ασκούνται στα 12μm της πρόωσης ανά δόντι, όπως παρουσιάστηκαν στο σχήμα 5.10(β). Οι δυνάμεις που ανταλλάσσονται μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου στις κατεργασίες μικροφραιζαρίσματος είναι ασυνεχείς και εμφανίζονται σε κάθε εμπλοκή του κοπτικού με το τεμάχιο. Η ένταση της δύναμης ποικίλλει κάθε φορά που το κοπτικό προχωράει κατά μήκος της γωνίας εμπλοκής, ως αποτέλεσμα της μεταβολής του άκοπου πάχους αποβλίττου.

**5.5 Πειραματική μελέτη των δυνάμεων κοπής σε κατεργασίες μικροφραιζαρίσματος** Εκτελέσθηκαν πειράματα μικροφραιζαρίσματος σε μια 3-άξονική μηχανή κάθετης κατεργασίας με μέγιστη ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου 50000rpm (σχήμα 5.13).



**Σχήμα 5.13α** 

Χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία φραιζαρίσματος επίπεδης απόληξης (2- fluted), με επικάλυψη TiAlN της Hitachi, με διαμέτρους 0,5mm, 0,2mm και 0,1mm και μήκη λαιμών 3mm, 1mm και 0,5mm αντίστοιχα, ώστε να έχουν λόγο διάστασης 5 για κάθε διάμετρο (σχήμα 5.13β).

Τα εργαλεία ελέγχθηκαν οπτικά με χρήση SEM προκειμένου να εξασφαλιστεί η απουσία κρίσιμων ατελειών που θα μπορούσαν να επηρεάσουν το επίπεδο της δύναμης κατά τη διάρκεια της κατερ-γασίας, όπως φθορές της επίστρωσης (σχήμα 5.13γ).



Σχήμα 5.13β



**Σχήμα 5.13γ** SEM image of a 200  $\mu$ m end mill showing coating damages at the cutting edges.

κράμα αλουμινίου Al 6082 T6 χάλυβας (maraging steel) 1.2709 και zirconia (pre-sintered).

Υλικά τεμαχίων

# Συνθήκες κατεργασίας

- Οι δυνάμεις κοπής υπολογίστηκαν για διαφορετικές συνθήκες εμπλοκής μεταβάλλοντας επιλεγμένες παραμέτρους.
- Η εμπλοκή του εργαλείου στο μικροφραιζάρισμα επίπεδης απόληξης ορίζεται γεωμετρικά από το συνδυασμό του αξονικού βάθους κοπής (ap), του ακτινικού βάθους κοπής (ae) και της πρόωσης ανά δόντι (fz).

- Προκειμένου να γίνει σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών μεγεθών της διαδικασίας που αντιστοιχούν στις διαφορετικές διαμέτρους των εργαλείων, οι παράμετροι εμπλοκής διατυπώθηκαν ως κλάσμα της διαμέτρου των εργαλείων (ap/D, ae/D, fz/D).
- Οι μεταβλητές παράμετροι είναι το ακτινικό βάθος κοπής, η πρόωση ανά δόντι, η διάμετρος του εργαλείου και το υλικό των τεμαχίων, ενώ η ταχύτητα περιστροφής και το αξονικό βάθος κοπής παραμένουν σταθερά. Οι τιμές των παραμέτρων δίνονται στον Πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14 Συνθήκες κατεργασίας μικροφραιζαρίσματος					
ae/D	0.1	0.3	0.5	0.7	1
fz/D	0.01	0.02			
ap/D	0.05				
n (rpm)	32000				
D (µm)	200				

Η κατεργασία αποτελείται από μια σειρά παράλληλων περασμάτων στη διεύθυνση του άξονα Χ της εργαλειομηχανής, με σταθερό αξονικό βάθος κοπής και διαφορετικά ακτινικά βάθη σύμφωνα με τις τιμές του πίνακα 5.14.

## Αποτελέσματα

Τα διαγράμματα των δυνάμεων που ενεργούν στο εργαλείο για fz/D= 0,01 και ae/D από 0,1 έως 1 (για σταθερή πρόωση ανά δόντι και διαφορετικές γωνίες εμπλοκής) παρουσιάζεται στο σχήμα 5.15.





**Σχήμα 5.15**. Δυνάμεις κοπής για ae/D: (α) 1, (β) 0.7, (γ) 0.5, (δ) 0.3 και (ε) 0.1.

#### Παρατηρήσεις

Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι ο χρόνος μεταξύ των ομόλογων σημείων μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα που περνά το δόντι και υπολογίζεται βάσει της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής.

Επιπλέον οι κορυφές έχουν ομοιόμορφη μορφή και ύψος. Αυτό δείχνει ότι το εργαλείο δεσμεύει το υλικό και αφαιρεί απόβλιττο σε κάθε περιστροφή, παρά το γεγονός ότι η πρόωση ανά δόντι είναι μόνο 2μm και επομένως της ίδιας τάξης μεγέθους με την ακτίνα της κόψης.

Κάποιοι ερευνητές παρατήρησαν ότι σε χαμηλές προώσεις, το εργαλείο ολισθαίνει πάνω στην επιφάνεια του τεμαχίου και μόνο ανά κάποιες περιστροφές δεσμεύει υλικό, αφαιρώντας απόβλιττο πολύ παχύτερο από το ονομαστικό. Όμως εάν αυτό είχε συμβεί, θα διακρίνονταν κάποιες υψηλότερες κορυφές.

Από το σχήμα 5.15 φαίνεται ότι οι μέγιστες δυνάμεις για όλες τις συνιστώσες και όλες τις συνθήκες εμπλοκής είναι πάντα χαμηλότερες από 0,25Ν. Η μέγιστη τιμή της συνιστώσας της δύναμης στον άξονα Υ μένει σχεδόν αμετάβλητη για ακτινικά βάθη από 1 έως 0,5. Αυτό συμβαίνει καθώς το μέγιστο άκοπο πάχος αποβλίττου είναι το ίδιο και στις τρεις περιπτώσεις, ενώ για μικρότερα ακτινικά βάθη το άκοπο πάχος αποβλίττου μειώνεται, με αποτέλεσμα τη μείωση των μεγίστων τιμών, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.15(δ) και (ε).

Το σχήματα 5.16(α) και (β) παρουσιάζουν τη μέση μέγιστη δύναμη συναρτήσει του ακτινικού βάθους για fz/D=0.01 και fz/D=0.02 αντίστοιχα. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, οι μέγιστες δυνάμεις χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάδοση. Αυτό είναι χαρακτηριστικό πρόβλημα κατά την εκτέλεση κοπής σε αυτήν την κλίμακα, όπου πιθανές διαταραχές στο σύστημα κατεργασίας μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



**Σχήμα 5.16** Μέση μέγιστη δύναμη για πρόωση fz/D (α) 0.01 και (β) 0.02 σε διαφορετικά ακτινικά βάθη κοπής.

#### Συμπεράσματα:

- Στο μικροφραιζάρισμα, το κοπτικό εργαλείο μπορεί να περιστρέφεται αρκετές φορές χωρίς να αφαιρεί υλικό, ειδικά όταν η πρόωση ανά δόντι είναι μικρότερη από το ελάχιστο πάχος αποβλίττου.
- Λόγω της επίδρασης του ελάχιστου πάχους αποβλίττου, οι δυνάμεις κοπής στο μικροφραιζάρισμα μπορούν να μεταβάλλονται περιοδικά με τον αριθμό των



περασμάτων του κοπτικού σε μια συγκεκριμένη γωνία θέσης.

- Η περιοδικότητα των δυνάμεων κοπής είναι μια συνάρτηση του ελάχιστου πάχους αποβλίττου, της πρόωσης ανά δόντι, και της γωνίας θέσης.
- Η δυναμική απόκριση του μικροεργαλείου επηρεάζει τη διαδικασία σχηματισμού αποβλίττου, δεν επιφέρει ωστόσο καμία μεταβολή στην περιοδικότητα όσον αφορά τη γωνία θέσης
- Υπάρχει ένα τοπικό μέγιστο της δύναμης ώθησης στο μικροφραιζάρισμα για τιμές πραγματικής εμπλοκής του εργαλείου κοντά στο ελάχιστο πάχος αποβλίττου.

5.6 Πειραματική μελέτη των δυνάμεων κοπής σε κατεργασίες μικροδιάτρησης

#### Πειραματική διάταξη



Σχήμα 5.17α Πειραματική διάταξη Η γεωμετρία του κοπτικού διαμέτρου d=100μm παρουσιάζεται στο σχήμα 5.17β.



**Σχήμα 5.17β** χάλυβας AISI 1045

Υλικό τεμαχίων

2 καταστάσεις θερμικής επεξεργασίας του υλικού:

(α) εξομάλυνση (μεγέθη κόκκων περίπου 20μm)

(β) πλήρης ανόπτηση για 10 ώρες στους 1000°C (μεγέθη κόκκων περίπου 120μm, σχήμα 5.17γ)



**Σχήμα 5.17γ** Καμπύλες ροής και μικροδομή των υλικών

### Συνθήκες κατεργασίας

Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής	160.000rpm
ατρακτου Εύρος ταχυτήτων κοπής	35 – 95 m/min
Πρόωση	0,012 d
Βάθος κοπής	2 d, όπου d η διάμετρος κοπτικού

### Αποτελέσματα

Το σχήμα 5.18 παρουσιάζει τη δύναμη πρόωσης συναρτήσει του άκοπου πάχους αποβλίττου για κοπτικό διαμέτρου 200μm, με σταθερή ταχύτητα κοπής v<sub>c</sub>=35 m/min. Οι μέσες τιμές της δύναμης πρόωσης είναι υψηλότερες για τη μικροδιάτρηση του χάλυβα που έχει υποστεί εξομάλυνση συγκριτικά με το τεμάχιο πλήρους ανόπτησης, λόγω της διαφοράς στην αντοχή όπως φαίνεται στο σχήμα 5.17γ.

Παρόμοια με τη συμβατική κατεργασία η δύναμη πρόωσης στη μικροδιάτρηση μειώνεται όταν μειωθεί το πάχος άκοπου αποβλίττου. Εντούτοις, όταν το πάχος άκοπου αποβλίττου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ακτίνα της κόψης του εργαλείου, η δύναμη που προκαλείται από τη βύθιση του κοπτικού χωρίς να αφαιρείται υλικό ελέγχει τη διαδικασία της κοπής. Αυτή η τάση μπορεί να φανεί για το χάλυβα AISI1045 στις δύο καταστάσεις θερμικής επεξεργασίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.18.



Σχήμα 5.18 Δύναμη πρόωσης συναρτήσει του πάχους άκοπου αποβλίττου

Το σχήμα 5.19 δείχνει την επίδραση της ταχύτητας κοπής στη δύναμη πρόωσης κατά τη διάρκεια κατεργασιών μικροδιάτρησης. Η αύξηση της ταχύτητας κοπής μειώνει τη δύναμη πρόωσης μέχρι μια ελάχιστη τιμή. Αυτό το φαινόμενο συσχετίζεται με τη θερμική χαλάρωση του υλικού η οποία προκαλείται από την αύξηση θερμοκρασίας λόγω της ταχύτητας κοπής. Σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής οι δυνάμεις πρόωσης παρουσιάζουν μια αύξηση. Το φαινόμενο αυτό είναι αποτέλεσμα του σχηματισμού ψευδοκοπής σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής κατεργασία, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.19β. Αυτή η τάση μπορεί επίσης να εξηγηθεί από το ρυθμό παραμόρφωσης του υλικού στην αρχική ζώνη διάτμησης.







Σχήμα 5.19 Επίδραση της ταχύτητας κοπής στη δύναμη πρόωσης σε κατεργασία μικροδιάτρησης χάλυβα AISI1045

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της μικροδιάτρησης με προηγούμενα αποτελέσματα μακροκατεργασιών (με κοπτικά διαμέτρου από 1 έως 10mm, ίδιας γεωμετρίας) στο χάλυβα AISI 1045 με εξομάλυνση, υπολογίστηκε η σχετική δύναμη πρόωσης στη διατομή του πάχους άκοπου αποβλίττου (d x f/2) συναρτήσει των διαμέτρων των τρυπανιών μεταξύ 50μm και 10mm (σχήμα 5.20).

Μελέτες έδειξαν ότι η δύναμη πρόωσης σε σχέση με τις διαμέτρους των κοπτικών σημειώνει μεγάλη αύξηση στη μικροκλίμακα. Αυτή η μη-γραμμική επίδραση της κλίμακας στη σχετική δύναμη πρόωσης μπορεί να αποδοθεί στην εξάρτηση του μήκους της εγκάρσιας κόψης από τη διάμετρο των τρυπανιών, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.20. Η κατάλληλη τεχνική αύξηση της εγκάρσιας κόψης του εργαλείου μικροδιάτρησης εξασφαλίζει την ακαμψία και τη σταθερότητα του κοπτικού, επηρεάζοντας τις αντιδράσεις της διαδικασίας της μικροδιάτρησης.



Σχήμα 5.20 Επίδραση της κλίμακας των κοπτικών μικροδιάτρησης

# Συμπεράσματα

- Όταν το πάχος άκοπου αποβλίττου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ακτίνα της κόψης ασκούνται δυνάμεις καθώς το εργαλείο βυθίζεται στο τεμάχιο χωρίς όμως να αφαιρεί υλικό.
- Σε αντίθεση με τη συμβατική κατεργασία διάτρησης, σε υψηλές ταχύτητες κοπής σχηματίζονται ψευδοκοπές οι οποίες αυξάνουν τις δυνάμεις πρόωσης.

- Η διάσταση του κοπτικού μπορεί να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τους κόκκους της μικροδομής του υλικού. Σε αυτήν την περίπτωση, το υλικό κατεργασίας δε μπορεί να θεωρηθεί ισοτροπικό και ομοιογενές.
- Μη-γραμμική επίδραση της κλίμακας από την κατάλληλη αύξηση της κόψης του εργαλείου μικροδιάτρησης παρατηρήθηκε για μείωση της διαμέτρου των κοπτικών από 10mm σε 50μm.

### 6. Μικροεργαλεία

Αν και πολλοί είναι οι ερευνητές που δραστηριοποιούνται στο συγκεκριμένο χώρο εντούτοις τα αποτελέσματα ως σήμερα δεν είναι τα καλύτερα δυνατά. Ο λόγος είναι ότι η ανάπτυξη των εργαλείων για μικροκατεργασίες ακολούθησε μια πιο παραδοσιακή πορεία που δεν συμβάδισε με την ανάπτυξη των υλικών και των διαδικασιών που κινήθηκαν έξω από τα καθιερωμένα πλαίσια. Όσο μειωνόταν η ποσότητα του αφαιρούμενου υλικού, θέματα που ως τότε είχαν μικρή σημασία όπως η γεωμετρία της κόψης του εργαλείου, το μέγεθος και ο προσανατολισμός των κόκκων της μικροδομής των υλικού κ.α., επηρέαζαν



πλέον άμεσα την επιθυμητή ακρίβεια, την ποιότητα της επιφάνειας του τεμαχίου και γενικότερα την αποτελεσματικότητα της κατεργασίας. Η ανακριβής γεωμετρία και οι ασυνέχειες αποτελούν σοβαρά μειονεκτήματα όσον αφορά την ακρίβεια στη διαδικασία ελέγχου, τον εξαιρετικά λεπτομερή συντονισμό των παραμέτρων της κατεργασίας και την κατάσταση της μηχανής.

#### 6.1 Κοπτικά μικροεργαλεία από διαμάντι

Η κοπή με διαμάντι χρησιμοποιείται ευρύτατα για την παραγωγή υψηλής ποιότητας επιφανειών με μεγάλη γεωμετρική ακρίβεια. Το διαμάντι, ως κοπτικό εργαλείο σε μικροκατεργασίες υπερέχει των υπολοίπων λόγω της υψηλής σκληρότητας, της ακαμψίας, και της χαμηλής του τριβής. Η σκληρότητά του το καθιστά ικανό να παραμορφώνει κάθε άλλο



**Σχήμα 6.2** Diamond Turning Tools

υλικό, όμως η ψαθυρότητα του περιορίζει το πεδίο εφαρμογής του. Έχει υψηλό μέτρο ελαστικότητας 1000 GPa (πενταπλάσιο από αυτό του χάλυβα), ενώ διατηρεί τις μηχανικές του ιδιότητες ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες.

Σημαντικό μειονέκτημα των κοπτικών από διαμάντι είναι ότι δεν μπορούν να κατεργαστούν τεμάχια που περιέχουν άνθρακα, όπως οι χάλυβες, εκτός αν υποστούν παράλληλη κρυογονική επεξεργασία. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να υιοθετηθούν ειδικές συνθήκες κοπής λόγω του ότι μεταβάλλονται τόσο οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών, όσο και οι διαστάσεις τους. Ως εκ τούτου οι δοκιμές μικροκοπής έχουν περιοριστεί σε μη-σιδηρούχα υλικά εκτός από τις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ενδεικτικά υλικά τεμαχίων τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε κατεργασίες με διαμάντι σε εμπορικές εφαρμογές είναι: Αλουμίνιο, Πυρίτιο, Άργυρος, Χρυσός, Χαλκός, Ψευδάργυρος, Μαγνήσιο, Μόλυβδος κ.α. Το διαμάντι χρησιμοποιείται σε κοπτικά εργαλεία σε τρείς διαφορετικές δομές: πολυκρυσταλλικό, συνθετικό διαμάντι και ως φυσικός μονοκρύσταλλος.

Το πολυκρυσταλλικό διαμάντι συναντάται συχνά σε εφαρμογές μικροκατεργασιών όπου δεν μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα η ποιότητα της επιφάνειας. Στα πλεονεκτήματά του περιλαμβάνεται η τιμή του η οποία είναι χαμηλότερη των υπολοίπων δομών. Κατασκευάζεται με συσσωμάτωση τεμαχιδίων από διαμάντι με χρήση συνδετικού μέσου και το εργαλείο που προκύπτει έχει κοπτικές ακμές με τυχαίο προσανατολισμό οι οποίες προκαλούν αύξηση της τραχύτητας. Ο φυσικός μονοκρύσταλλος χρησιμοποιείται σε κατεργασίες όπου απαιτείται καλή ποιότητα επιφάνειας και ακρίβεια. Στα μειονεκτήματά του περιλαμβάνονται οι πιθανές ακαθαρσίες στη σύστασή του καθώς και το κόστος του το οποίο εξαρτάται από την ακρίβεια της κοπτικής ακμής του. Τέλος το συνθετικό διαμάντι προσφέρει υψηλή αξιοπιστία και διάρκεια ζωής λόγω της δυνατότητας που υπάρχει για έλεγχο των ακαθαρσιών. Το βασικό του μειονέκτημα είναι το κόστος του το οποίο είναι το υψηλότερο από τα διαμάντια των υπολοίπων δομών.

Η κοπή με διαμάντι θεωρείται κατεργασία αποπεράτωσης και δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται για εκχόνδριση υλικού για οικονομικούς κυρίως λόγους. Πρόκειται για κατεργασία υψηλών ταχυτήτων που κυμαίνονται σε εκατοντάδες m/s, ενώ το βάθος κοπής για εκχόνδριση κυμαίνεται από 12-40μm και 1-3μm για αποπεράτωση. Τυπικές τιμές πρόωσης για εκχόνδριση και αποπεράτωση είναι 10-40 μm/rev και 1-3 μm/rev αντίστοιχα. Στα εργαλεία από διαμάντι χρησιμοποιείται αρνητική γωνία αποβλίττου για την κοπή μετάλλων, ενώ η γωνία ελευθερίας κυμαίνεται από 5 έως 10 μοίρες.

Οι Sugano κ.α. μελέτησαν τη φθορά των κοπτικών από μονοκρυσταλλικό διαμάντι και τις επιδράσεις στη μικροτραχύτητα. Επίσης μελέτησαν τις τάσεις στην επιφάνεια του τεμαχίου κατεργασίας υπό διάφορες συνθήκες κατεργασίας. Διαπίστωσαν ότι η φθορά του κοπτικού έχει λιγότερη επίδραση στη μικροτραχύτητα. Τέλος ένα ακόμη σημαντικό θέμα για τη μικροκατεργασία με διαμάντι, αποτελεί ο χειρισμός των τεμαχίων, διότι η επιφάνεια που προκύπτει είναι εξαιρετικά ευαίσθητη και επιρρεπής σε χάραξη.

#### 6.2 Κοπτικά εργαλεία μικροφραιζαρίσματος

Η γεωμετρία των εργαλείων μικροφραιζαρίσματος έχει υιοθετηθεί από τα μακρο-εργαλεία, υποθέτοντας ότι ο σχηματισμός αποβλίττου και η κινηματική της διαδικασίας είναι αναλογικά και στους δύο τύπους εργαλείων. Πειράματα έχουν δείξει ότι τα μικροεργαλεία αποκρίνονται με έναν πολύ διαφορετικό τρόπο σε σύγκριση με τα μικροεργαλεία. Εναλλακτικές μέθοδοι για την κατασκευή δομικά βελτιστοποιημένων εργαλείων μικροφραιζαρίσματος είναι οι EDM (Electro Discharge Machining) και η FIB (Focused Ion Beam).

Στην περίπτωση της κατεργασίας EDM, το καλώδιο λειτουργεί ως ηλεκτρόδιο. Το κομμάτι προς κατεργασία κατευθύνεται κατά μήκος του καλωδίου, και η κίνηση της πρόωσης οδηγεί στην εκλέπτυνση του κομματιού. Το τεμάχιο μπορεί να αποκτήσει καθορισμένη δομή με τον προγραμματισμό των μετακινήσεων των αξόνων (σχήμα 6.3). Οι εικόνες στα σχήματα 6.4α και β παρουσιάζουν κοπτικά φραιζαρίσματος με διάμετρο των 100μm και των 50μm αντίστοιχα.



**Σχήμα 6.3** Σχηματική επεξήγηση της διαδικασίας EDM για την κατασκευή ενός μικροεργαλείου ημικυκλικής δομής.



(α) Κοπτικό ημικυκλικής διατομής



(β)Κοπτικό ελικοειδούς μορφής

Σχήμα 6.4 Κοπτικά μικροφραιζαρίσματος με διάμετρο των 100μm και των 50μm αντίστοιχα με χρήση της μεθόδου EDM

Η μέθοδος FIB χρησιμοποιείται στην κατασκευή μικροεργαλείων, επειδή αυτή η τεχνική:

- μπορεί να αφαιρεί υλικό σε ατομική κλίμακα,
- δίνει ακριβή έλεγχο του μεγέθους των χαρακτηριστικών του τεμαχίου,
- ποικιλία στη γεωμετρία των εργαλείων και των κόψεων,
- ακριβή προσδιορισμό της θέσης των ακτινών.

Η μέθοδος FIB έχει τη δυνατότητα να αφαιρεί υλικό σε ατομική κλίμακα με μεγάλη ακρίβεια, ανταποκρινόμενη έτσι σε αυτή την απαίτηση. Χρησιμοποιώντας αυτήν την μέθοδο οι Vasile κ.α. κατασκεύασαν κοπτικά για φραιζάρισμα από χάλυβα διαμέτρου 25μm και ο Adams κ.α. κατασκεύασαν κοπτικά εργαλεία μορφοποίησης και σπειροτόμους διαμέτρου 13μm από ταχυχάλυβες και καρβίδια του βολφραμίου (σχήμα 6.5). Ο Adams κ.α. επίσης κατασκεύασαν μικροκονδύλια αποπεράτωσης επιφάνειας με διάμετρο μικρότερη των 25μm με επιμετάλλωση των ίδιων υλικών. Χρησιμοποίησαν μια εστιασμένη ακτίνα ιόντων γαλλίου για να δημιουργήσουν έναν σύνολο από κοπτικά εργαλεία και κατάφεραν να πετύχουν τραχύτητα 250nm (Ra). Σε σύγκριση με τεχνικές όπως η μηχανική λείανση, ασκούνται μικρότερες δυνάμεις οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στο σπάσιμο του κοπτικού κατά τη διάρκεια μιας κατεργασίας.



Σχήμα 6.5 Κονδύλι επίπεδης απόληξης τεσσάρων πτερυγίων κατασκευασμένο με FIB

Στα σχήματα 6.6α,β φαίνεται η μεταβολή της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου σε σχέση με το μέγεθος του. Καθώς το μέγεθος του εργαλείου μειώνεται από τα 2mm στα 0,2mm η απόκλιση της γεωμετρίας αυξάνεται. Επιπλέον, η επίδραση της κλίμακας παίζει σημαντικό ρόλο στη φυσική της κατεργασίας και σχετίζεται στενά με το μηχανισμό κοπής ο οποίος μεταβάλλεται με την αλλαγή της γεωμετρίας του κοπτικού. Στο σχήμα 6.6γ,δ παρουσιάζεται η φθορά του εργαλείου κατά το μικροφραιζάρισμα σε ανοξείδωτο ατσάλι ως συνάρτηση της διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου και του μήκους της διαδρομής της κοπής.



Συνθήκες κοπής Ταχύτητα κοπής Πρόωση Βάθος/ πλάτος κοπής



$$\label{eq:vc} \begin{split} v_c &= 200 \text{m/min} \\ f_z &= 0.01 \text{xd} \\ a_p &= a_e = 0.04 \text{xd} \end{split}$$

Σχήμα 6.6 Επίδραση της κλίμακας στη γεωμετρία και τη φθορά του κοπτικού (review)

Ο Fang κ.α. μελέτησαν τις σχέσεις ανάμεσα στη γεωμετρία του κοπτικού και τη ζωή του εργαλείου (δίνοντας έμφαση στη θραύση του εργαλείου) στο μικροφραιζάρισμα χρησιμοποιώντας μέθοδο ανάλυσης FEM και κατέληξαν ότι το κωνικό σχήμα των εργαλείων βελτιστοποιεί τη διάρκεια ζωής τους και την απόδοσή τους όπως έγινε και στη μελέτη των Uhlmann και Schauer's. Οι Aoki και Takahashi ανέπτυξαν ένα πολύ λεπτό κοπτικό εργαλείο διαμέτρου 25μm από καρβίδιο βολφραμίου κόβοντας μια πλάγια επιφάνεια στον κύριο κορμό του εργαλείου. Οι Egashira και Mizutani κατασκεύασαν μικροκονδύλια αποπεράτωσης επιφάνειας με σφαιρική απόληξη και ακτίνα της τάξης μεγέθους των 10μm χρησιμοποιώντας την κατεργασία EDM. Οι Uhlmann και Schauer πρότειναν μια νέα παραμετρική ανάλυση για τη σχεδίαση κονδυλιών αποπεράτωσης επιφάνειας με ανάλυση των δυναμικών φορτίων και καταπονήσεων με χρήση FEM. Στη μικροκοπή τα εργαλεία καταπονούνται με διαφορετικά φορτία από αυτά που είναι γνωστά στις συμβατικές κατεργασίες. Το βελτιστοποιημένο εργαλείο που πρότειναν έχει κωνική μορφή με μικρή διάμετρο στη βάση του προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε επαφή με το τεμάχιο κατεργασίας κατά την κοπή.

Το μικροφραιζάρισμα είναι μια από τις τρεις πιο κοινές τεχνικές μικροκοπής των μικροκατεργασιών. Στο μικροφραιζάρισμα, η κόψη του εργαλείου έχει μικρή διάμετρο όσο 0.1mm, το κοπτικό συγκρατείται σε μια άτρακτο υψηλής ταχύτητας η οποία μπορεί να περιστρέφεται από 20.000 έως και 150.000 στροφές/λεπτό, και χρησιμοποιείται για κατεργασίες χάλυβα, ορείχαλκου και αργιλίου με βάθη κοπής περίπου 30μm και προώσεις από 120mm/min έως 240mm/min για να δώσουν υψηλή ποιότητα τελικής επιφάνειας (όπως 0,2 μm). Ενώ το μικροφραιζάρισμα εφαρμόζεται επιτυχώς στην κατασκευή βιοϊατρικών εξαρτημάτων, ανάγλυφων καλουπιών, και μικροκωδικοποιητών, η θραύση της κόψης των εργαλείων αποτελεί για πολλούς χρήστες πρόβλημα οδοντοφυΐας.

Υπάρχουν 3 κύριοι λόγοι για τους οποίους η κόψη των μικροεργαλείων σπάει τόσο εύκολα στο μικροφραιζάρισμα σε σύγκριση με τη συμβατική κατεργασία:

- Αρχικά, κατά την αφαίρεση μέταλλου σε μια κατεργασία, υπάρχει μια σημαντική αύξηση της απαιτούμενης ειδικής ενέργειας καθώς το πάχος του αποβλίττου μειώνεται. Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση των μικροκατεργασιών, καθώς το απόβλιττο λεπταίνει για μικρότερα βάθη κοπής, η κοπτική ακμή των μικροεργαλείων υπόκειται σε μεγαλύτερη αντίσταση συγκριτικά με τη συμβατική κατεργασία. Είναι σαν το υλικό των τεμαχίων να γίνεται σκληρότερο κατά τη διάρκεια της μικροκατεργασίας. Αυτή η δύναμη αντίστασης είναι αρκετά ισχυρή ώστε να υπερβεί το όριο αντοχής στην κάμψη της κόψης των εργαλείων ακόμη και πριν αυτά υποστούν οποιαδήποτε σημαντική φθορά, και οδηγεί στη θραύση του κοπτικού. Ένας τρόπος να αποτραπεί αυτό είναι το πάχος του αποβλίττου να είναι μικρότερο από την ακτίνα καμπυλότητας της κόψης του εργαλείου.
- Δεύτερον, όταν εμποδίζεται η ροή του αποβλίττου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας του φραιζαρίσματος παρατηρείται απότομη αύξηση των δυνάμεων κοπής και των τάσεων η οποία αναγκάζει την κόψη να σπάσει. Στις περισσότερες διαδικασίες μικροφραιζαρίσματος με μικροσκοπικά εργαλεία με δύο κοπτικές ακμές, κάθε ακμή αφαιρεί τα απόβλιττα από την περιοχή της κατεργασίας σε μισή μόνο περιστροφή. Εντούτοις, όταν εμποδίζεται η ροή του αποβλίττου, οι δυνάμεις κοπής και οι τάσεις θα αυξηθούν πάνω από το όριο αντοχής στην κάμψη του εργαλείου μέσα σε λίγες περιστροφές, και η κόψη του εργαλείου θα σπάσει. Μερικοί χρήστες προτιμούν κοπτικά χάλυβα υψηλών ταχυτήτων δεδομένου ότι είναι πολύ πιο εύκαμπτα και ανεκτικά στην συσσώρευση αποβλίττου από ότι τα κοπτικά καρβιδίου.
- Τρίτον, το εργαλείο μπορεί να χάσει την κόψη του λόγω της ψευδοκοπής και δε δύναται να εκτελέσει την κατεργασία. Καθώς το τεμάχιο αρχίζει να ωθεί την κόψη του εργαλείου, τότε αυτό εκτρέπεται ελαφρώς. Η αύξηση της εκτροπής του εργαλείου και η τάση που παράγεται από την κατεργασία σε κάθε περιστροφή θα προκαλέσουν τελικά τη θραύση του κοπτικού. Αυτή η διαδικασία καλείται επίσης θραύση λόγω εκτενούς τάσης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω φαινόμενα που εμφανίζονται στο μικροφραιζάρισμα, οι περισσότερες μηχανές μικροφραιζαρίσματος πωλούνται με αισθητήρες μέτρησης των δυνάμεων που ενεργούν στο κοπτικό, και με προηγμένο λογισμικό CAM για να προβλέπουν το φορτίο αποβλίττου καθ'όλη τη διαδικασία της κατεργασίας. Κατ' αυτό τον τρόπο, οι κατασκευαστές επιδιώκουν να βρουν τον τρόπο για το μικροφραιζάρισμα που θα επιτρέπει στις μηχανές τους να λειτουργούν ομαλά με τον ελάχιστο χρόνο διακοπής της λειτουργίας τους. Τα διαθέσιμα στο εμπόριο εργαλεία μικροδιάτρησης έχουν διάμετρο της τάξης μεγέθους των 50μm σε διάμετρο και ανάλογη γεωμετρία με αυτήν των συμβατικών τρυπανιών. Για διαμέτρους μικρότερες των 50μm συναντώνται πιο συχνά τα επίπεδα τρυπάνια με απλοποιημένες γεωμετρίες. Τα εργαλεία αυτά δεν έχουν ελικοειδές σχήμα όπως τα συμβατικά τρυπάνια, γεγονός που καθιστά την απομάκρυνση των αποβλίττων πιο δύσκολη, οδηγώντας σε περαιτέρω προβλήματα της κατεργασίας μικροδιάτρησης. Ο κύριος λόγος για αυτή την απλοποίηση είναι η αδυναμία κατασκευής μικροτρυπανιών με τόσο μικροσκοπικές διαστάσεις. Ιδιαίτερο ρόλο στην αντοχή του εργαλείου παίζει ο λόγος διαστάσεων μήκος/διάμετρος. Τα υλικά κατασκευής τους είναι παρόμοια με αυτά της συμβατικής κατεργασίας και αποτελούνται από εξαιρετικά λεπτόκοκκα καρβίδια του βολφραμίου και από χάλυβα με προσμίξεις κοβαλτίου.

Μια άλλη κατεργασία για κατασκευή μικροεργαλείων που χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές είναι η λείανση. Παρόλα αυτά η κατεργασία της λείανσης έχει έναν περιορισμό όσον αφορά τη γεωμετρία του εργαλείου και είναι χρήσιμη μόνο για διαμέτρους μέχρι 65 μm. Για να ξεπεραστεί ο παραπάνω περιορισμός οι Onikura κ.α. πρότειναν λείανση με υπερηχητική δόνηση για κατασκευή μικροεργαλείων κυλινδρικού σχήματος και επίπεδων μικροτρυπανιών από εξαιρετικά λεπτούς κόκκους καρβιδίων. Προσθέτοντας υπερηχητική δόνηση στην κατεργασία της λείανσης κατάφεραν να παράγουν εργαλεία με μεγάλες αναλογίες διαστάσεων όπως για παράδειγμα 11μm διάμετρο και μήκος 160μm. Οι Ohmori κ.α. δεν εστίασαν μόνο στην παραγωγή μικροεργαλείων αλλά διερεύνησαν επίσης και την ποιότητα της επιφάνειας. Η ποιότητα του τεμαχίου και τη φθορά του. Επίσης ανέπτυξαν μια εργαλειομηχανή για κατασκευή διάφορων διατομών κοπτικών εργαλείων με υψηλή ποιότητας επιφάνειας με βάση την τεχνική λείανσης ELID όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.7.



**Σχήμα 6.7** Εικόνες μικροεργαλείων διάτρησης υπό βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας: α) Εργαλείο εξαιρετικής ακρίβειας β) Εργαλείο εξαιρετικά μεγάλου λόγου διαστάσεων. (review)

Μια άλλη μέθοδος, στην κατασκευή μικροπίρων και μικροατράκτων είναι η κατεργασία WFDG (Wire Electrode Discharge Grinding (σχήμα 6.8)). Το ηλεκτρόδιο είναι ένα μεταλλικό καλώδιο που γλιστρά αργά, συνήθως με ταχύτητα 5 - 10 mm/min. Με έλεγχο του οδηγού του καλωδίων, διάφορες μορφές μπορούν να παραχθούν. Κάποια παραδείγματα παρουσιάζονται στο σχήμα 6.9. Με τη μέθοδο WEDG γίνεται εύκολη η κατεργασία όχι μόνο για μέταλλα αλλά και σκληρά υλικά όπως κράματα καρβιδίων και το διαμάντι. Για το λόγο αυτό η μέθοδος WEDG χρησιμοποιείται συχνά στην κατασκευή μικροεργαλείων κοπής.

Οι Egashira και Mizutani χρησιμοποίησαν κατεργασία λείανσης με τη μέθοδο WEDG για την κατασκευή ενός μικροτρυπανιού με ακτίνα κόψης 0,5μm. Σκοπός ήταν η μελέτη της

διάτρησης σε μαλακά υλικά και η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου για οπές με λόγους διαστάσεων από 4 και άνω.



Σχήμα 6.9 Παραδείγματα κοπτικών κατασκευασμένα με τη μέθοδο

Σε γενικές γραμμές τα μικροεργαλεία χρησιμοποιούνται σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα ταλαντώσεων. Ο Huang ερεύνησε τα δυναμικά χαρακτηριστικά στη μικροδιάτρηση και βρήκε ότι η φυσική συχνότητα της μικροδιάτρησης μειώνεται καθώς αυξάνει η δύναμη διάτρησης. Η δυσκαμψία του μικροεργαλείου είναι σημαντική όταν γίνεται κατεργασία τεμαχίων υψηλής ακρίβειας. Ορισμένες μελέτες διεξήγαγαν ελέγχους της καμπτικής αντοχής των μικροτρυπανιών και πρότειναν ως λύση τα πολυβάθμια τρυπάνια.

- Τα μικροτρύπανα κατασκευάζονται συνήθως από κοβαλτιούχο χάλυβα ή μικρόκοκκο καρβίδιο του βολφραμίου (WC).
- Τα χαλύβδινα τρύπανα είναι πιο φθηνά και τροχίζονται εύκολα, αλλά δεν έχουν τη σκληρότητα και στιβαρότητα/ανθεκτικότητα των τρυπανιών από WC.
- Η γωνία κορυφής του τρυπανιού εξαρτάται από το κατεργαζόμενο υλικό. Για
σκληρά υλικά κυμαίνεται μεταξύ 118° – 135°.

 Μεγαλύτερη τιμές της γωνίας κορυφής εξασφαλίζουν μεγαλύτερη αντοχή στην κόψη κορυφής του τρυπανιού.

Εργαλεία μικροδιάτρησης με διάμετρο μεγαλύτερη από 50μm μπορεί να κατασκευαστούν ως ελικοειδή τρύπανα (twist drills), ενώ κοπτικά μικρότερης διαμέτρου είναι αποκλειστικά τύπου φτυαριού (spade type) λόγω των δυσκολιών κατασκευής ελικοειδούς μορφής σε αυτήν την τάξη μεγέθους (σχήμα 6.10α,β). Τα μικροτρυπάνια αυτά δεν έχουν ελικοειδή πτερύγια όπως τα συμβατικά τρύπανα, γεγονός που καθιστά την απομάκρυνση των αποβλίττων από την οπή πιο δύσκολη.

Χαρακτηριστικά των εργαλείων μικροδιάτρησης τύπου ''φτυάρι'' και του μηχανισμού διάτρησης που επιτυγχάνουν:

- Η κορυφή του μικροτρυπανιού, όπως και στην περίπτωση του ελικοειδούς τρυπανιού, δεν είναι σημείο, αλλά ολόκληρη κοπτική ακμή που καλείται εγκάρσια κόψη (chisel edge) και προκύπτει από την τομή δύο επιπέδων, τα οποία φέρουν επίσης και τις δύο κύριες κόψεις του τρυπανιού.
- Η κόψη κορυφής αφαιρεί υλικό κυρίως με εξώθηση του υλικού και κοπή σε πολύ μεγάλες αρνητικές γωνίες αποβλίττου.
- Η ειδική ενέργεια κοπής κατά μήκος της εγκάρσιας κόψης είναι σχετικά μεγάλη, συγκριτικά με αυτή στις κύριες κοπτικές ακμές του τρυπανιού.



Σχήμα 6.10 Παραδείγματα εργαλείων μικροδιάτρησης (α) ελικοειδές ,(β) τύπος "φτυάρι"

#### 6.4 Φθορά μικροεργαλείων

Η ζωή των κοπτικών εργαλείων στη μικροκοπή είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ειδικά όταν οι τιμές της πρόωσης ανά δόντι είναι μεγάλες. Οι Tansel, κ.α. προσπάθησαν να μελετήσουν τη σχέση ανάμεσα στη φθορά και την ασκούμενη πίεση στη βάση του εργαλείου. Έτσι υπέθεσαν ότι οι δυνάμεις κοπής στα κονδύλια είναι ανάλογες με αυτές στο συμβατικό φραιζάρισμα αλλά οι μηχανισμοί φθοράς είναι διαφορετικοί. Ο πρώτος μηχανισμός που μελετήθηκε ήταν η παρεμπόδιση του αποβλίττου. Κατά την παρεμπόδιση του αποβλίττου, οι δυνάμεις κοπής και οι πιέσεις αυξάνουν γρήγορα και μπορούν να προκαλέσουν θραύση του εργαλείου μετά από λίγες μόνο περιστροφές. Αυτός ο μηχανισμός είναι μηπροβλέψιμος και συμβαίνει εξαιρετικά γρήγορα. Αφού ξεκινήσει η φθορά του εργαλείου, η πιθανότητα θραύσης λόγω κόπωσης αυξάνεται, λόγω των αυξημένων δυνάμεων κοπής αλλά και των τάσεων στη βάση του εργαλείου. Σε αυτή την περίπτωση το εργαλείο αστοχεί λόγω υπερβολικών τάσεων. Η εξήγηση είναι ότι όταν η κοπτική ακμή χάσει την αιχμηρότητά της το εργαλείο δεν είναι πλέον ικανό να αφαιρεί αρκετό υλικό για τη δημιουργία επαρκούς χώρου ώστε να μπορεί να κινηθεί ελεύθερα οπότε ξεκινάει η κάμψη του εργαλείου. Η κάμψη αυτή σε συνδυασμό με τη σταθερή πρόωση προκαλεί υπερβολική αύξηση των τάσεων που οδηγεί σε αστοχία του κοπτικού. Οι μεταβολές των δυνάμεων κοπής αυξάνονται καθώς αυξάνει η φθορά του εργαλείου. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως δείκτης για τη μέτρηση της φθοράς.

Ο Godlinski κ.α. προσπάθησαν να ελαχιστοποιήσουν τη φθορά του εργαλείου βελτιστοποιώντας τα υλικά και της μικροδομής τους. Χρησιμοποίησαν μια κατεργασία συμπύκνωσης δύο σταδίων με πολύ λεπτή σκόνη αλουμίνιου προκειμένου να αποφευχθούν οι εσωτερικές ρωγμές. Το εργαλείο έδειξε ισχυρή αντίσταση στη φθορά. Ο Gaebler κ.α. για να βελτιώσουν την απόδοσή και τη φθορά εργαλείων μικροδιάτρησης και μικροκονδύλιων αποπεράτωσης επιφάνειας με δύο κοπτικές ακμές, τα ενίσχυσαν με επικάλυψη CVD.

Οι Chen και Ehmann υλοποίησαν μελέτες φθοράς σε μικροδιάτρηση χαλκο-εποξικών στρώσεων οι οποίες συναντώνται σε πλακέτες κυκλωμάτων. Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο για τον κύκλο ζωής ενός τρυπανιού με βάση ανεξάρτητες παραμέτρους όπως πρόωση, ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου, λόγος διαστάσεων και αναλογία χαλκού – εποξικού. Βρέθηκε ότι οι αυξήσεις σε οποιεσδήποτε από αυτές τις παραμέτρους προκαλούν μείωση στη ζωή του εργαλείου. Ο λιγότερο εξαρτημένος παράγοντας είναι η αναλογία χαλκού – εποξικού.



#### 6.4.1 Επίδραση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου στο μικροφραιζάρισμα

Κατά καιρούς έχουν προταθεί πολλά μοντέλα προσομοίωσης της κατεργασίας του φραιζαρίσματος τα οποία υπολογίζουν δυνάμεις, φθορά, τοπομορφία κλπ. Στην περίπτωση όμως του φραιζαρίσματος στη μικροδιάσταση τα μοντέλα αυτά δεν ισχύουν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για να ισχύσουν τα μοντέλα πρέπει να επικρατούν συνθήκες κοπής, πράγμα που δεν συμβαίνει πάντοτε στις μικροκατεργασίες. Λόγω της γρήγορης φθοράς των κοπτικών εργαλείων είναι σύνηθες φαινόμενο το πάχος του αποβλίττου να είναι μικρότερο από το ελάχιστο πάχος αποβλίττου που μπορεί να σχηματιστεί με αποτέλεσμα να επικρατεί μια κατάσταση όπου το κοπτικό περιστρέφεται χωρίς να αφαιρεί υλικό (ploughing condition). Ειδικότερα σε περιπτώσεις κατεργασίας σκληρών μετάλλων έχει παρα-

τηρηθεί πώς η ακτίνα της κόψης φθείρεται σχετικά γρήγορα από 1-2 μm σε 10-15 μm όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.11. Για τη μοντελοποίηση αυτού του φαινομένου έγινε η υπόθεση πως το ελάχιστο πάχος του αποβλίττου ισούται με έναν σταθερό ποσοστό 45% επί της ακτίνας καμπυλότητας της κοπτικής ακμής του εργαλείου. Κάτω από αυτό το πάχος οι ασκούμενες δυνάμεις δίνονται από διαφορετικούς τύπους.

Τα κοπτικά εργαλεία από διαμάντι είναι προτιμότερα στις κατεργασίες ακριβείας. Παρόλα αυτά η συγγένεια του διαμαντιού με τα σιδηρούχα μέταλλα προκαλεί σοβαρές φθορές στο κοπτικό. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα ο Kumabe ανέπτυξε μια μέθοδο μικροκοπής σιδηρούχων υλικών με υπερηχητική δόνηση. Τα αποτελέσματα της μεθόδου ήταν η μείωση της φθοράς του κοπτικού εις βάρος όμως της ποιότητας της επιφάνειας. Αργότερα οι Moriwaki και Shamoto ανέπτυξαν μια μέθοδο κοπής με ελλειπτική δόνηση εξαιρετικής ακρίβειας που έδωσε βελτιωμένα αποτελέσματα όσον αφορά την κοπή. Στο σχήμα 6.12 παρουσιάζεται η σχετική διαδικασία. Μια άλλη μεθοδολογία μείωσης της φθοράς των κοπτικών εργαλείων με διαμάντι σε σιδηρούχα υλικά είναι η κρυογονική κατεργασία. Ο Evans δημιούργησε ένα ειδικό μηχανισμό κατεργασίας με ροή υγρού αζώτου και πέτυχε να βελτιώσει την τραχύτητα της επιφάνειας κάτω από Ra < 25 nm σε ανοξείδωτο χάλυβα της σειράς 400.



Σχήμα 6.12 Αρχή της ελλειπτικά δονούμενης κοπής (review)

# 6.4.2 Πειραματική μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας των μικροεργαλείων στη φθορά

Πρόσφατες μελέτες πραγματοποιήθηκαν σε διάφορους γεωμετρικούς τύπους εργαλείων μικροφραιζαρίσματος, δηλαδή, κοπτικά μικροεργαλεία επίπεδης απόληξης (i) με δυο κόψεις (two-flute), (ii) τριγωνικής κόψης (Δ-type) και (iii) ημικυκλικής κόψης (D-type). Αν και η φθορά των εργαλείων είναι ένα πρόβλημα, δεν είναι τόσο σοβαρό όσο τη θραύση τους. Η προσομοίωση της θραύσης γίνεται με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Η ανάλυση FEM έδειξε ότι τα κοπτικά τύπου-Δ και D με ευθύ σώμα δεν είναι κατάλληλα για κατεργασίες. Στην πράξη, κοπτικά μικροφραιζαρίσματος επίπεδης απόληξης με κωνικό σώμα χρησιμοποιούνται συνήθως για τη διαμόρφωση τρισδιάστατων δομών.

Το σχήμα 6.13 παρουσιάζει διάφορους γεωμετρικούς τύπους εργαλείων.

- (α) εργαλείο επίπεδης απόληξης δύο-ακμών διαμέτρου 0,1mm
- (β) εργαλείο τύπου-Δ διαμέτρου 0,1mm με ευθύ σώμα,
- (γ) εργαλείο τύπου-D διαμέτρου 0,1mm με ευθύ σώμα,

#### (δ) εργαλείο τύπου-Δ διαμέτρου 0.1mm με κωνικό σώμα και (ε) εργαλείο τύπου-D διαμέτρου 0,1mm με λεπτό σώμα.





Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής της ατ- 42.000rpm ράκτου Τύποι κοπτικών δύο κόψεων

τύπου-Δ

τύπου-D •

Υλικό κοπτικών Υλικό τεμαχίων

Ρυθμός πρόωσης Βάθος κοπής

διαμέτρου 0,1mm και 0,2mm καρβίδιο βολφραμίου ορείχαλκος (Cu 65% και Zn 35%) με σκληρότητα Brinell 85 30 - 300mm/min 10 - 50µm

Σχήμα 6.14 Πειραματική διάταξη και συνθήκες κοπής.

#### Αποτελέσματα και συμπεράσματα

Εξαιτίας της αδυναμίας του σώματος των μικροεργαλείων και του μικροσκοπικού τμήματος της κόψης που συμμετέχει στην κοπή, οι αστοχίες των μικροεργαλείων είναι το κύριο πρόβλημα. Μεταξύ αυτών των αστοχιών, η θραύση της κόψης είναι η σημαντικότερη. Μπορεί να εμφανιστεί στην αρχή της κοπής με ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου στις 40.000rpm, ρυθμό πρόωσης 120mm/min και βάθος κοπής 0.05mm (σχήμα 6.15α), ή το εργαλείο θα μπορούσε να αντέξει για λίγο προτού εμφανιστεί η θραύση σε ταχύτητα 40.000rpm, ρυθμό πρόωσης 60mm/min, βάθος κοπής 0,05mm (σχήμα 6.15β). Εάν μειωθεί η ταχύτητα της ατράκτου στις 35.000rpm ή και λιγότερο, κοπτικό με διάμετρο 0,2mm μπορεί να κόψει για 60min (σχήμα 6.15γ).



Σχήμα 6.15 Αστοχίες μικροεργαλείων επίπεδης απόληξης με 2 κόψεις

Με αύξηση της φθοράς των εργαλείων, η δύναμη κοπής αυξάνει και τελικά το κοπτικό εργαλείο σπάει. Με χαμηλή ταχύτητα 20.000rpm και ρυθμό πρόωσης κάτω από 120mm/min, οι τρεις τύποι εργασιών κόβουν σωστά υπό τις πειραματικές συνθήκες. Με αύξηση της ταχύτητας περιστροφής ης ατράκτου, τα κοπτικά δύο-ακμών ήταν ανίκανα να κόψουν άλλο και τελικά έσπασαν. Από την άλλη, τα κοπτικά τύπου Δ και D δεν έσπασαν ποτέ. Οι κύριες αστοχίες που εμφάνισαν είναι ψευδοκοπή και φθορά της κόψης όπως φαίνεται στο σχήμα 6.16.



Σχήμα 6.16 Αστοχίες μικροεργαλείων με διαφορετικές γεωμετρίες

Η δύναμη κοπής που ενεργεί στο εργαλείο είναι σημαντικός παράγοντας της κατεργασίας. Είναι μια ένδειξη της φόρτισης των εργαλείων στην κοπή. Τα σχήματα 6.17α και β παρουσιάζουν τις μεταβολές των δυνάμεων κοπής για τους διάφορους τύπους γεωμετρίας των εργαλείων. Η ψευδοκοπή στα κοπτικά τύπου Δ και D μπορεί να προκαλέσει αύξηση της δύναμης κοπής (σχήματα 6.16ε και 6.17β). Μια λεπτομερής ανάλυση των αστοχιών των εργαλείων δίνεται παρακάτω.



Σχήμα 6.17 Δυνάμεις κοπής για διαφορετικές γεωμετρίες κοπτικών μικροεργαλείων

Τα συμβατικά εργαλεία μικροφραιζαρίσματος έχουν συνήθως δύο κοπτικές ακμές. Ωστόσο, για διάμετρο εργαλείων της τάξης 0,1mm, το στερεό μέρος του σώματος των εργαλείων είναι ακόμα λιγότερο. Σε μια μικροκατεργασία φραιζαρίσματος επίπεδης απόληξης, το ποσοστό της έκκεντρης περιστροφής του εργαλείου (tool run-out) προς τη διάμετρο του γίνεται πολύ μεγάλο συγκριτικά με τη συμβατική κατεργασία. Κατά συνέπεια, μόνο η μια κοπτική ακμή εκτελεί την κατεργασία, ενώ η άλλη δεν αγγίζει καθόλου το τεμάχιο. Όταν μια από τις κοπτικές ακμές εκτελεί όλη ή την περισσότερη διαδικασία κοπής, η μεταβολή της δύναμης αυξάνει σημαντικά. Με τόσο μικρή διάσταση των εργαλείων, ακόμα κι αν η δύναμη κοπής είναι τόσο μικρή όσο λίγες δεκάδες mN, η σμίλευση της άκρης του εργαλείου θα εμφανιζόταν. Με την περαιτέρω αύξηση στις δυνάμεις κοπής, τα κοπτικά τελικά σπάνε. Αυτό συμβαίνει γιατί τότε η κύρια τάση φθάνει στη μέγιστη τιμή της.Η δυσκαμψία των κοπτικών τύπου Δ είναι πολύ υψηλότερη. Δεν σπάνε υπό τις συνθήκες κοπής του πειράματος. Λόγω της μικρής τραχύτητας επιφάνειας της κόψης, επιλέγεται χαμηλός ρυθμός πρόωσης, ώστε η πρόωση ανά περιστροφή να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ακτίνα της κόψης.

Δεδομένου ότι τα εργαλεία φραιζαρίσματος κόβουν με ονομαστική αρνητική γωνία αποβλίττου, η ενεργός γωνία αποβλίττου είναι επίσης μεγάλη. Αυτό επιδεινώνει την κοπή και αυξάνει τη θερμοκρασία, η οποία μπορεί να προκαλέσει σπάσιμο της κόψης όπως φαίνεται στο σχήμα 6.16. Δεδομένου ότι μόνο μια ακμή εκτελεί την κοπή, η φθορά εμφανίζεται σε μια κοπτική ακμή στις περισσότερες περιπτώσεις (σχήματα 6.16β, ε και η). Με αυτήν την αστοχία των μικροεργαλείων, οι δυνάμεις κοπής αυξάνονται όπως φαίνεται στο σχήμα 6.17β.

Ομοίως με τα κοπτικά τύπου Δ, τα κοπτικά τύπου D είναι εύκολο να κατασκευαστούν και έχουν υψηλότερη δυσκαμψία σε σύγκριση με τα εργαλεία δυο κόψεων με αποτέλεσμα να μην εμφανίσουν θραύση κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Δεδομένου ότι το πάχος μηπαραμορφωμένου αποβλίττου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ακτίνα της κόψης ή και μικρότερο (περίπου 3μm), η φθορά των εργαλείων εμφανιζόταν συνήθως κατά μήκος της κοπτικής ακμής όπως φαίνεται στα σχήματα 6.16γ, ζ και θ. Επίσης μελέτες έδειξαν ότι η τραχύτητα της τελικής επιφάνειας είναι ένας καλός δείκτης για την αξιολόγηση της ζωής των εργαλείων. Με ταχύτητα ατράκτου 40.000 rpm και βάθος κοπής 50μm, μόλις ο χρόνος κοπής υπερβεί τα 60min, η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνεται εντυπωσιακά (σχήμα 6.18). Σε αυτήν την περίπτωση, η φθορά της κόψης είναι περίπου 20μm.



Σχήμα 6.18 Τραχύτητα επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου κατεργασίας

## 6.4.3 Σχέση φθοράς των μικροεργαλείων με τις δυνάμεις κοπής

Η σχέση μεταξύ της φθοράς των εργαλείων και της αυξανόμενης δύναμης κοπής είναι χαρακτηριστική στις κατεργασίες. Σε αυτήν την μελέτη αυτή η σχέση ερευνήθηκε με τον έλεγχο της δύναμης κοπής των εργαλείων μικροφραιζαρίσματος επίπεδης απόληξης από καρβίδιο κατά την κοπή τεμαχίων (α) από ένα πολύ σκληρό μέταλλο όπως ο χάλυβας και (β) από ένα πολύ μαλακό αμέταλλο όπως ο γραφίτης.

Τα αποτελέσματα των δυνάμεων κοπής τεμαχίων χάλυβα NAK- 55, σε διαφορετικά στάδια της ζωής των εργαλείων παρουσιάζονται στα σχήματα 6.19α και β. Τα μικροεργαλεία

καρβιδίου που χρησιμοποιήθηκαν είχαν δύο κόψεις με διάμετρο 0.03μm. Στην πρώτη δοκιμή (test 1), οι συνθήκες κοπής ήταν οι ακόλουθες: ταχύτητα περιστροφής ατράκτου 30.000rpm, πρόωση 2,5μpm, πλάτος κοπής 0.015" και βάθος κοπής 0.015" και στη δεύτερη (test 2) οι συνθήκες κοπής ήταν: ταχύτητα ατράκτου 20.000rpm, πρόωση 1,25μpm, πλάτος 0.0225" και βάθος 0.0150".



Σχήμα 6.19 Δυνάμεις κοπής συναρτήσει της ζωής του εργαλείου σε κατεργασία χάλυβα

Οι κοπτικές ακμές φθείρουν πολύ αργά όταν κόβουν μαλακά υλικά. Τα αποτελέσματα της δύναμης κοπής συλλέχθηκαν περιοδικά κατά την κοπή μιας αυλάκωσης σε ένα τεμάχιο αργιλίου. Οι συνθήκες κατεργασίας ήταν: ταχύτητα 15.000rpm, πρόωση 5µpm, πλάτος 0.0150 και βάθος 1/320. Χρησιμοποιήθηκε μικροεργαλείο καρβιδίου δύο κόψεων με διάμετρο 1/160. Εννέα σύνολα δεδομένων της δύναμης κοπής συλλέχθηκαν σε διαφορετικά επίπεδα χρήσης του εργαλείων. Το εργαλείο είχε ζωή 13500' χωρίς να σπάσει. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 6.20α. Οι δυνάμεις κοπής μελετήθηκαν κατά τη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής του εργαλείου. Επίσης έγινε σύγκριση των δυνάμεων για νέα και φθαρμένα εργαλεία στις ίδιες συνθήκες κοπής (σχήμα 6.20β). Εντούτοις, το μέγεθος των δυνάμεων κοπής άλλαξε όταν προκαλείται φθορά στο εργαλείο. Οι εικόνες των κοπτικών ακμών ενός νέου και ενός φθαρμένου εργαλείου παρουσιάζονται στα σχήματα 6.21α και β.







Σχήμα 6.21 Εικόνες (α) ενός νέου και (β) ενός φθαρμένου μικροεργαλείου

Επιπλέον ο σχηματισμός ξεθυμάσματος είναι διαφορετικός όταν χρήσιμοποιείται ένα καινούργιο ή ένα ήδη φθαρμένο εργαλείο. Παρακάτω παρουσιάζεται ο σχηματισμός απολήξεων κατά την κοπή αυλακώσεων σε ένα τεμαχίο αργιλίου με κοπτικό καρβιδίου σε όλα τα στάδια φθοράς του κοπτικού (σχήμα 6.22).



**Σχήμα 6.21** Σχηματισμός απολήξεων στην κατεργασία μικροφραιζαρίσματος επίπεδης απόληξης αυλακώσεων σε τεμάχιο από αλουμίνιο σε διάφορα στάδια φθοράς του κοπτικού.

#### 7. Μοντελοποίηση

Η μοντελοποίηση της μικροκοπής αποτελεί ένα από τα δυσκολότερα κομμάτια του τομέα των μικροκατεργασιών, εξαιτίας της μικροσκοπικής κλίμακας στην οποία λαμβάνει χώρα. Ως εκ τούτου είναι πιο δύσκολη η υλοποίηση πειραμάτων και η καταγραφή παρατηρήσεων και αποτελεσμάτων. Επιπλέον, η διαδικασία κοπής γίνεται πιο δύσκολη, περιλαμβάνοντας φαινόμενα ελαστικής/ πλαστικής παραμόρφωσης και σπασίματα. Σε υψηλά ποσοστά πίεσης και θερμοκρασίας, οι ιδιότητες των υλικών μεταβάλλονται σημαντικά όσο εξελίσσεται η διαδικασία. Κατά συνέπεια η αναλυτική μοντελοποίηση είναι κάτι το εξαιρετικά δύσκολο όσον αφορά την κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών. Οι περισσότερες προσπάθειες αναλυτικής μοντελοποίησης βασίζονται στην εμπειρική παρατήρηση της κινηματικής σε συνδυασμό με τα κλασσικά μοντέλα κοπής στη μακροκλίμακα.

Η εφαρμογή των μεθόδων προσομοίωσης καλύπτει το εύρος των διαδικασιών κοπής και των χαρακτηριστικών τους όπως οι δυνάμεις κοπής (στατικές και δυναμικές), η ισχύς, η φθορά και η ζωή των εργαλείων, η γωνία/ελίκωση/μορφή του αποβλίττου, η ψευδοκοπή, οι θερμοκρασίες, η ακεραιότητα της επιφάνειας των τεμαχίων, η γεωμετρία των εργαλείων, η επίστρωση και ο σχεδιασμός, ο σχηματισμός ξεθυμασμάτων, η παραμόρφωση και η ακρίβεια των εξαρτημάτων, η εκτροπή των εργαλείων, των ορίων δυναμικής σταθερότητας και της θερμικής παραμόρφωσης.

Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να μοντελοποιήσουν την κατεργασία με τη μέσω αριθμητικών σχέσεων και προσομοιώσεις στον υπολογιστή. Αυτό αποτελεί μια καλή προσέγγιση των πειραματικών προσπαθειών που γίνονται, καθώς μπορεί να ξεπεράσει τις υπάρχουσες δυσκολίες. Η μέθοδος αυτή δεν αποτελεί την τέλεια λύση επειδή περιλαμβάνει πολλές ίδιες υποθέσεις με αυτές της αναλυτικής μοντελοποίησης. Παρόλα αυτά τα υπολογιστικά μοντέλα μπορούν αποδεδειγμένα να συμβάλλουν στην κατανόηση ορισμένων φαινομένων, ή να καθοδηγήσουν την εμπειρική έρευνα προκειμένου να ενισχυθεί η περαιτέρω κατανόηση μιας κατεργασίας.

Η μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (FEM) είναι μια διαδεδομένη τεχνική προσομοίωσης η οποία όμως έχει έναν κρίσιμο περιορισμό όσον αφορά στη μικρομηχανική. Βασίζεται στην αρχή της συνέχειας (continuum mechanics), όπου οι ιδιότητες των υλικών ορίζονται ως γενικές. Στην πραγματικότητα στην μικροκλίμακα το υλικό συμπεριφέρεται ως μη-συνεχές σε πολλές περιπτώσεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις της ισοτροπικής μικρομηχανικής η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να θεωρηθεί ως κατάλληλη από τη στιγμή που η υπό μελέτη κατεργασία μπορεί να μελετηθεί σε συνεχές διάστημα.

Πολλοί ερευνητές στράφηκαν στη μέθοδο της μοριακής δυναμικής (MD). Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια τεχνική προσομοίωσης η οποία είναι βασισμένη σε ενδοατομικούς υπολογισμούς δυνάμεων. Επίσης μπορούν να προσομοιωθούν τα χαρακτηριστικά της μικροδομής των υλικών όπως αστοχίες και ρωγμές, να προσδιορισθεί η ειδική ενέργεια κοπής, κ.α. Εντούτοις υπάρχουν τρία σημαντικά εμπόδια στη μοντελοποίηση MD. Πρώτον η μέθοδος απαιτεί πιστή αναπαράσταση των διατομικών δυνάμεων ανάμεσα σε διαφορετικούς συνδυασμούς ατόμων που εμπλέκονται στη διαδικασία της κοπής. Αυτή η αναπαράσταση ονομάζεται δυναμικό. Η διατύπωση ενός δυναμικού απαιτεί μελέτη ισοδύναμη με ένα διδακτορικό. Για το λόγο αυτό άλλωστε οι σχετικές μελέτες που έχουν γίνει είναι λιγοστές. Δεύτερον από τη στιγμή που η μέθοδος απαιτεί τον υπολογισμό όλων των διατομικών δυνάμεων σε ένα συγκεκριμένο όριο, η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται είναι πολύ μεγάλη. Έτσι πολλές μελέτες περιορίζονται σε ένα μικρό εμβαδό της τάξης του ενός νανομέτρου ή του ενός angstrom (10<sup>-7</sup>mm). Τέλος, η ανάλυση MD στερείται καλής απεικόνισης της συμπεριφοράς του υλικού.

Πρόσφατα για να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου και να επιτραπεί η καλύτερη παρατήρηση της συμπεριφοράς του υλικού προτάθηκαν οι πολυδιάστατες τεχνικές μοντελοποίησης. Οι τεχνικές αυτές συνδυάζουν τις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων με αυτές της μοριακής δυναμικής. Λεπτομέρειες για τις προσεγγίσεις αυτές δίνονται στη συνέχεια.

#### 7.1 Μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (FEM)

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) δεν χρησιμοποιήθηκε άμεσα για την ανάπτυξη μοντέλων μικροκοπής, παρόλο που οι υπολογιστές χρησιμοποιούνται αρκετά χρόνια τώρα για προσομοίωση στην κοπή μετάλλων. Πιο πολύ χρησιμοποιώθηκε για τα ενδιάμεσα στάδια προκειμένου να ληφθούν συγκεκριμένες τιμές χρησιμοποιώντας μηχανιστικά ή εμπειρικά μοντέλα. Οι Ueda κ.α. πρότειναν μια τέτοια προσέγγιση προκειμένου να αναλυθεί ο μηχανισμός απομάκρυνσης υλικού στη μικρομηχανική των κεραμικών. Σε αυτή τη μελέτη η μέθοδος FEM χρησιμοποιήθηκε μόνο για τον υπολογισμό του J-ολοκληρώματος γύρω από μια ρωγμή μπροστά από την κοπτική ακμή. Το ολοκλήρωμα J είναι ένας τρόπο υπολογισμού του ρυθμού απελευθέρωσης της ενέργειας παραμόρφωσης. Οι τιμές που ελήφθησαν χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια προκειμένου να προσδιοριστεί η πιθανότητα θραύσης. Με τη συγκεκριμένη προσέγγιση ήταν δυνατή η μοντελοποίηση μεθόδων κοπής σε όλκιμα και ψαθυρά υλικά.

Οι Ueda και Manabe μοντελοποίησαν το σχηματισμό του αποβλίττου στις μικροκατεργασίες άμορφων υλικών χρησιμοποιώντας άκαμπτα-πλαστικά FEM (RPFEM). Και εδώ η μέθοδος FEM χρησιμοποιήθηκε μόνο για την παραπέρα κατανόηση των τοπικών αδιαβατικών παραμορφώσεων. Το μοντέλο ήταν σε θέση να παράγει μια μεμβρανοειδή δομή της διαμόρφωσης του αποβλίττου η οποία παρατηρήθηκε και πειραματικά με τη χρήση ενός μικροσκοπίου SEM. Η συγκεκριμένη μεμβρανοειδής μορφοποίηση του αποβλίττου οφειλόταν στον συνδυασμό δύο παρατηρήσεων. Τόσο η συνεχής και ομαλή μορφοποίηση του αποβλίττου όσο και ο σχηματισμός μιας τοπικής ζώνης διάτμησης ήταν φαινόμενα περιοδικά, με συχνότητα ανάλογη του βάθους κοπής.

Οι Moriwaki κ.α. ανέπτυξαν ένα παρόμοιο μοντέλο χρησιμοποιώντας RPFEM για την ορθογωνική μικροκοπή του χαλκού, το οποίο περιλάμβανε δύο στάδια. Πρώτον το μοντέλο λαμβάνει την παραμορφωμένη κατάσταση του τεμαχίου κατά την κοπή και δεύτερον λαμβάνει συγκεκριμένες τιμές για τις τάσεις και τις καταπονήσεις οι οποίες με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στην θερμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης λαμβάνεται υπόψη η καμπυλότητα της κόψης του εργαλείου. Η ανάλυση έδειξε ότι ο λόγος κοπής μειώνεται αν αυξηθεί ο λόγος της ακτίνας της κοπτικής ακμής προς το βάθος κοπής. Επίσης βρέθηκε ότι η θερμοκρασία στο κατεργαζόμενο τεμάχιο αυξάνεται στο τμήμα μπροστά στην κόψη λόγω της ροής του υλικού. Παρομοίως, οι Fleischer κ.α. χρησιμοποίησαν πειραματικές τιμές για να βελτιώσουν ένα προϋπάρχων μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής.

Η προαναφερθείσες μοντελοποιήσεις πεπερασμένων στοιχείων αφορούν πρωτίστως μικροκατεργασίες ισότροπων υλικών, όπου δεν λαμβάνονται υπόψη οι κρυσταλλογραφικές επιδράσεις. Οι Chuzhoy κ.α. ανέπτυξαν ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για μικροκατεργασία ετερογενών υλικών όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.1. Το μοντέλο που ανέπτυξαν μπορούσε να περιγράψει τη μικροδομή των πολυφασικών υλικών. Έτσι κατόρθωσαν να κατανοήσουν το μηχανισμό μικροκοπής σε χυτοσίδηρο. Η μορφή αποβλίττου κατά την μικροκοπή πολυφασικών υλικών παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία. Παρόλα αυτά οι δυνάμεις κοπής που παρατηρούνται είναι παρόμοιες με αυτές στην κοπή μονοφασικού υλικού.



Σχήμα 7.1 Υπολογισμός ισοδύναμων τάσεων για βάθος κοπής 125μm, ακτίνα κόψης 25μm (t=0,00012 s) α) σιδηρούχο τεμάχιο, β) μαλακό σίδηρο

## Προσομοίωση του σχηματισμού ξεθυμάσματος με τη μέθοδο FEM

Η κατανόηση της μηχανικής του σχηματισμού ξεθυμάσματος έχει ενισχυθεί πολύ με τη μοντελοποίηση της διαδικασίας αναλυτικά, μηχανιστικά και με τις τεχνικές πεπερασμένων στοιχείων. Η εργασία των Ko και Dornfeld [ 133 ] καθιέρωσε ένα βασικό αναλυτικό μοντέλο του σχηματισμού ξεθυμάσματος στην έξοδο στην ορθογώνια κοπή. Αν και ωφέλιμα, τα αναλυτικά μοντέλα είναι περιορισμένα στις δυνατότητές τους να προσαρμόσουν τις σημαντικές μεταβλητές των διαδικασιών που συνδέονται με τη γεωμετρίας των εργαλείων και τις συνθήκες εξόδου οι οποίες είναι κρίσιμες στο σχηματισμό ξεθυμασμάτων.

Αυτό ισχύει ειδικά στην περίπτωση της διάτρησης όπου η επίδραση της γεωμετρίας των τρυπανιών μπορούν ουσιαστικά να ενθαρρύνουν ή να εμποδίσουν το σχηματισμό ξεθυμασμάτων. Στη μοντελοποίηση του σχηματισμού ξεθυμασμάτων στη διάτρηση υπάρχουν δύο βασικές επιρροές: η γεωμετρία των εργαλείων, και η πρόωση. Οι ρεαλιστικοί τύποι των εργαλείων πρέπει να συμπεριληφθούν στην ανάλυση το οποίο απαιτεί η γεωμετρία τους να μετατρέπεται μορφή πλέγματος(να μπορεί να γίνει διακριτοποίηση). Η επίδραση της πρόωσης στο σχηματισμό ξεθυμασμάτων στη διάτρηση θα καθορίσει εάν το ξεθύμασμα που διαμορφώνεται είναι ομοιόμορφο (με ή χωρίς "cap") ή μορφής κορώνας (γενικά ανεπιθύμητη λόγω του υπερβολικού μεγέθους και της τραχιάς μορφής). Το λογισμικό για την παραγωγή της διακριτοποίησης των τρυπανιών στην ανάλυση FEM έχει αναπτυχθεί [134] και επιτρέπει την μεταβολή κρίσιμων παραμέτρων της γεωμετρίας.

Αυτή η δυνατότητα, έχει επιτρέψει τη λογική μοντελοποίηση του σχηματισμού ξεθυμάσματος στην επιφάνεια εξόδου στη διάτρηση των όλκιμών υλικών όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας. Ο σχηματισμός ξεθυμασμάτων επηρεάζεται επίσης από τη γεωμετρία των εργαλείων και τις συνθήκες τριβής. Η επιρροή και η ακριβής μοντελοποίηση της τριβής στην κοπή γενικά είναι μια μεγάλη πρόκληση.

Πρόσφατη έρευνα στην ανάλυση FEM της επιρροής της επίστρωσης των εργαλείων στο σχηματισμό ξεθυμασμάτων έγινε από τον Leopold [ 135 ]. Οι διαφορές θερμοχωρητικότητας των διαφορών επιστρώσεων μαζί με τις διαφορές στο συντελεστή της τριβής φάνηκαν να επηρεάζουν το σχηματισμό αποβλίττου και τις δυνάμεις κοπής καθώς επίσης και το σχηματισμό ξεθυμασμάτων. Σε αυτή την αναφορά τα μεγέθη των στοιχείων είναι λιγότερο από 5 μm (σχήμα 7.2), ώστε να δώσουν την καλύτερη δυνατή ανάλυση.



High mesh density in the shear zone and in the new surface Σχήμα 7.2 Προσομοίωση FEM σχηματισμού ξεθυμάσματος σε ορθογώνια κοπή

Εκτός από την ακτίνα της κόψης, ο Dinesh κα. πρότειναν ότι οι τάσεις παραμόρφωσης θα μπορούσαν επίσης να είναι μια σημαντική αιτία της επίδρασης της κλίμακας καθώς είναι πολύ έντονες στις κατεργασίες. Οι Liu και Melkote [60] παρουσίασαν ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων βασισμένο στις τάσεις παραμόρφωσης για την ορθογώνια κοπή που προβλέπει την επίδραση της κλίμακας στη μικροκοπή. Η ενίσχυση των τάσεων οδηγεί σε μια υψηλότερη ενεργό τάση στις ζώνες παραμόρφωσης, η όποια, στη συνέχεια, οδηγεί σε υψηλότερη ειδική ενέργεια κοπής με μειωμένο πάχος αποβλίττου. Τα διαγράμματα των ενεργών πιέσεων, παρουσιάζονται στο σχήμα 7.3, δείχνουν ότι η μέγιστη ενεργός τάση είναι στις κλίσης της τάσης της τάσης παραμόρφωσης απ'ότι χωρίς.



Σχήμα 7.3 Επίδραση της κλίμακας στις ενεργές τάσεις

Ο Park κ.α. δοκίμασαν να ρυθμίσουν τη μηχανιστική δύναμη κοπής με τη χρήση προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων για σιδηρούχα υλικά όπως όλκιμοι σίδηροι και ανθρακούχοι χάλυβες. Το μοντέλο τους βασίστηκε στην ανάλυση της μικροδομής των κατεργαζόμενων υλικών στις διάφορες φάσεις τους. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.4 γραφίτης, σιδηρίτης και κόκκοι περλίτη συναντώνται στις μικροδομές των όλκιμων σιδήρων και των ανθρακούχων χαλύβων. Το παραπάνω μοντέλο χρησιμοποιήθηκε κυρίως για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής.





(b) gray iron





(y)AISI 1018 steel

Σχήμα 7.4 Πραγματικές και προσομοιωμένες μικροδομές σιδηρούχων υλικών (review)

## 7.2 Προσομοίωση μοριακής δυναμικής

Η έρευνα για την προσομοίωση της μοριακής δυναμικής της κοπής ξεκινάει τη δεκαετία του '90. Οι πρώτοι ερευνητές χρησιμοποίησαν το χαλκό ως υλικό κατεργασίας λόγω της αυστηρά καθορισμένης δομής του και των δυναμικών χαρακτηριστικών του. Ως εργαλείο κοπής χρησιμοποιήθηκε το διαμάντι λόγω της πολύ αιχμηρής κοπτικής του ακμής, η οποία είναι αναγκαία για την ανάλυση MD.

Η θεωρία της μοριακής δυναμικής είναι βασισμένη στη φυσική και περιγράφει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων και επιτρέπει έτσι την προσομοίωση σε ατομικό επίπεδο της συμπεριφοράς των υλικών [141]. Για να βελτιωθεί ο συσχετισμός των πειραματικών αποτελεσμάτων με τη θεωρητική πρόβλεψη, προστέθηκαν εμπειρικά στοιχεία από την επιστήμη των υλικών. Οι χρονικά εξαρτώμενες διαδικασίες όπως η παραγωγή της επιφάνειας και η ανάπτυξη της τραχύτητας στην κοπή μπορούν να μελετηθούν στο ατομικό επίπεδο.

Δεδομένου ότι η προσομοίωση αυτή προσφέρει τη μελέτη της περιοχής κάτω από την επιφάνεια κατεργασίας, φαινόμενα όπως μετατοπίσεις και η μείωση των τάσεων μπορούν να προσομοιωθούν και να παρατηρηθούν και στις τρεις διαστάσεις, σχήμα 7.5. Το σχήμα παρουσιάζει τη νανοκατεργασία του χαλκού με συγκεκριμένο κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό στις 3 διαστάσεις. Ο σχηματισμός ξεθυμάσματος στα όρια των κόκκων λόγω της κίνησης μετατόπισης και της πλαστικής παραμόρφωσης και η συσσώρευση τους στην επιφάνεια είναι εμφανή.



Σχήμα 7.5 Προσομοίωση MD του σχηματισμού απόληξης και αποβλίττου χαλκού

Η εργασία των Inamura κ.α. εστιάστηκε στην MD προσομοίωση της κοπής σε ατομικό επίπεδο με δυναμικά χαρακτηριστικά. Αυτή η υπολογιστική μελέτη ανέδειξε της μέθοδο MD ως ένα πιθανό εργαλείο μοντελοποίησης της μικροκοπής. Η προσομοίωση ήταν σε θέση να συσχετίσει τη διαλείπουσα πτώση της δυναμικής ενέργειας που αθροίζεται στο τεμάχιο κατά τη διάρκεια της κοπής με την παραγωγή θερμότητας που συνδεόταν με την πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου και της μεγάλης ανόδου της θερμοκρασίας στην επιφάνεια ροής αποβλίπτου του κοπτικού. Στην προσομοίωση της κοπής πολυκρυσταλλικού χαλκού η πλαστική παραμόρφωση ξεκινούσε πρώτα στα όρια των κόκκων και στη συνέχεια μεταδιδόταν σε γειτονικούς κόκκους στην κατεύθυνση όπου υπήρχαν ανομοιομορφίες στην κρυσταλλική δομή του υλικού. Επίσης παρατηρήθηκε ότι το ποσοστό της διάχυσης της ενέργειας κατά την πλαστική παραμόρφωση στη μικροκλίμακα είναι μεγαλύτερο από ότι στη συμβατική κοπή. Τέλος παρατηρήθηκε η μη εμφάνιση μιας συγκεντρωμένης ζώνης διάτμησης αντίθετα με τη συμβατική κοπή. Στο σχήμα 7.6 παρουσιάζεται μια προσομοίωση μοριακής δυναμικής όπου φαίνονται ξεκάθαρα οι κινήσεις των μορίων υπό την επίδραση των φορτίσεων του κοπτικού εργαλείου.



**Σχήμα 7.7** Προσομοίωση MD μικροκατεργανίας (ταχύτητα κοπής=20m/s, βάθος κοπής=1.4nm, ακτίνα κόψης=0,35nm) (Yi Quin)

Οι Shimada κ.α. ανέπτυξαν ένα μοντέλο MD για την κατανόηση του μηχανισμού αφαίρεσης αποβλίττου στη μικροκατεργασία του χαλκού με βάθος κοπής μικρότερο του 1 nm. Το μοντέλο μπορούσε να παράγει κρυσταλλογραφικά ελαττώματα και ανομοιομορφίες μπροστά από την κόψη εργαλείου ώστε να προσομοιώνει καλύτερα την πραγματικότητα. Η μορφολογία του αποβλίττου συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα. Σε μια ανάλογη εργασία ερευνήθηκαν οι επιδράσεις του κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού στην πλαστική παραμόρφωση σε μονοκρυσταλλικό χαλκό χρησιμοποιώντας προσομοίωση MD. Επιπλέον βρέθηκε ότι η καλύτερη δυνατή τραχύτητα επιφάνειας ήταν περίπου 1nm τόσο για μονοκρυσταλλικό όσο και για πολυκρυσταλλικό χαλκό, υποθέτοντας βέλτιστες συνθήκες κοπής όπως φαίνεται στο σχήμα 7.8.



(β) διεύθυνση κοπής <121> Σχήμα 7.8 Παραμόρφωση γύρω από την κόψη σε κατεργασία μονοκρυσταλλικού χαλκού

Γενικά η προσομοίωση MD απαιτεί μεγάλη υπολογιστική δύναμη προκειμένου να μοντελοποιηθεί μια κατεργασία κοπής. Ως εκ τούτου τα περισσότερα μοντέλα MD έχουν εφαρμοστεί σε δισδιάστατη ορθογώνια κοπή. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της υπολογιστικής ισχύος γίνεται είτε χρήση πολύ μικρών μοντέλων ή προσομοίωση με υπερβολικά υψηλές ταχύτητες κοπής. Οι Komanduri κ.α. πρότειναν μια νέα μέθοδο προσομοίωσης που ονομάζεται μοριακή δυναμική περιορισμένου μήκους LRMD (Length Restricted Molecular Dynamics). Στη μέθοδο αυτή περιοριζεται το μήκος του τεμαχίου και τα άτομα μετατοπίζονται κατά μήκος της κατεύθυνσης κοπής. Η κοπή που εφαρμόζεται είναι νανομετρική με ρεαλιστικές ταχύτητες. Μελέτησαν επίσης την επίδραση της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου χρησιμοποιώντας διαφορετικές αναλογίες ακτίνας κοπτικής ακμής προς βάθος κοπής με διάφορες παραμέτρους όπως δύναμη κοπής, ειδική ενέργεια (ενέργεια ανά μονάδα μάζας) και παραμόρφωση κάτω από την επιφάνεια κοπής. Επίσης μελετήθηκε η επίδραση του κρυσταλλικού προσανατολισμού και της κατεύθυνσης κοπής σε μονοκρυσταλλικό αλουμίνιο και πυρίτιο. Εφάρμοσαν επίσης τη μέθοδο MD για να προσομοιώσουν τις αστοχίες εξόδου και το σχηματισμό απολήξεων σε όλκιμα και ψαθυρά υλικά. Επίσης έγινε επιτυχής προσομοίωση του σχηματισμού απόληξης σε όλκιμο υλικό καθώς και της διάδοσης των ρωγμών σε ψαθυρό υλικό όπως φαίνεται στα σχήματα 7.9α και β.



(B) α) -15° β) 0 ° γ) 15 ° δ) 30 ° ε) 45 ° και στ) 60 °

Σχήμα 7.9 Αναπαράσταση προσομοίωσης MD νανομετρικής κατεργασίας κοπής σε ψαθυρό υλικό χωρίς ελαστικούς περιορισμούς κατά την έξοδο του από το τεμάχιο για διάφορες γωνίες αποβλίττου.

Μια άλλη τυπική υπόθεση που χρησιμοποιείται στις περισσότερες προσομοιώσεις MD σε νάνο ή μίκρο κλίμακα κοπής είναι ότι το κοπτικό εργαλείο είναι στιβαρό σώμα οπότε η δυναμική αλλαγή της γεωμετρίας του λόγω φθοράς κατά την κοπή δεν λαμβάνεται υπόψη. Οι Cheng κ.α. χρησιμοποίησαν προσομοίωση MD για τη μοντελοποίηση ενός κοπτικού από διαμάντι, ως παραμορφώσιμο σώμα. Το μοντέλο τους περιελάμβανε τη παραγωγή θερμότητας λόγω κοπής και ανέλυσε τη σχέση ανάμεσα στη θερμοκρασία και την ενέργεια εξάχνωσης των ατόμων του διαμαντιού και του πυριτίου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά με τη βοήθεια ενός μικροσκοπίου AFM. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ως κοπτικό η ακμή ενός διαμαντιού και ως τεμάχιο μια μονοκρυσταλλική πλάκα πυριτίου. Ως αποτέλεσμα το μοντέλο έδινε τη θερμο-χημική φθορά στην άκρη του διαμαντιού. Οι Rentsch, Inasaki και ο Fang κ.α. ερεύνησαν την ακεραιότητα της επιφάνειας στη νανοκατεργασία ψαθυρών υλικών χρησιμοποιώντας μια συμβατική MD τεχνική.

### 7.3 Πολυδιάστατη μοντελοποίηση (Multiscale modeling)

Ο Inamura κ.α. χρησιμοποίησαν τεχνικές πολυδιάστατης μοντελοποίησης προκειμένου να προσομοιώσουν την κοπή τόσο σε ατομικό όσο και σε συνεχές επίπεδο. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο MD υπολόγισαν τις μετατοπίσεις των ατόμων που αλληλεπιδρούν κατά την κοπή. Στη συνέχεια μετέφεραν τις τιμές αυτές σε ένα σημείο στο συνεχές μέσο προκειμένου να υπολογίσουν τις τάσεις και τις καταπονήσεις. Η μεταφορά αυτή έγινε παίρνοντας τις σταθμισμένες μέσες τιμές των μετατοπίσεων από τα γύρω άτομα. Το σχήμα 7.10 παρουσιάζει μια πολυδιάστατη μοντελοποίηση μικροκοπής, όπου μπορούν να διακριθούν ξεκάθαρα τα πεπερασμένα στοιχεία αλλά και τα μόρια στο σύστημα κοπτικό-εργαλείο.





Σχήμα 7.10 Πολυδιάστατη μοντελοποίηση μικροκοπής (Yi Quin)

Σε άλλη έρευνα βρέθηκε ότι στο υλικό του τεμαχίου επικρατεί μια πολύπλοκη κατάσταση πίεσης. Η κατάσταση αυτή περιελάμβανε συγκεντρωμένη συμπίεση και διατμητικές καταπονήσεις στη βασική ζώνη διάτμησης και εφελκυστικές καταπονήσεις κατά μήκος της επιφάνειας του αποβλίττου. Επίσης ιδιαίτερη σημασία έχει ότι δεν υπήρχαν παραμένουσες διατμητικές τάσεις στο τεμάχιο ως αποτέλεσμα των τάσεων της κύριας ζώνης διάτμησης. Αυτό εξηγήθηκε μερικώς από την καμπτική παραμόρφωση που λαμβάνει χώρα.

## 7.4 Μηχανιστική μοντελοποίηση (Mechanistic modeling)

Τα περισσότερα μηχανιστικά μοντέλα κοπής βασίζονται στην υπόθεση του Merchant ότι η κόψη του εργαλείου είναι αιχμηρή. Οι Kim κ.α πρότειναν ένα μοντέλο ορθογωνικής κοπής με εργαλείο στρογγυλεμένης ακμής προκειμένου να μελετηθεί η ολίσθηση κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας του εργαλείου. Η ολίσθηση αυτή λαμβάνει χώρα κυρίως λόγω της ελαστικής επαναφοράς και της συμπίεσης του υλικού τα οποία προκαλούνται λόγω της σχετικά μεγάλης ακτίνας της κόψης του εργαλείου. Στη συγκεκριμένη μελέτη βρέθηκε ότι η επίδραση της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου συνεισφέρει σημαντικά στη συνολική δύναμη κοπής όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.11.



**Σχήμα 7.11** Συνιστώσες της δύναμης κοπής ανά μονάδα πλάτους σε μοντέλο κοπής με σφαιρική απόληξη.(συντελεστής τριβής: 0,3, γωνία αποβλίττου= 0°, χαλκός (CDA110), ακτίνα κοπτικής ακμής= 0,01 μm)

Σε μια προσπάθεια να κατανοήσουν καλύτερα τις δυνάμεις κοπής στο μικροφραιζάρισμα οι Βαο και Tansel ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο πρόβλεψης. Το μοντέλο βασίζεται στο γεωμετρικό υπολογισμό του αποβλίττου που προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη την τροχιά της ακμής του μικρο-εργαλείου. Η δύναμη κοπής υπολογίστηκε από το μοντέλο των Tlusty και MacNeil's το οποίο λάμβανε τον προηγούμενο υπολογισμό του πάχους του αποβλίττου. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψην του πολλές παραμέτρους όπως τις συνθήκες κατεργασίας, τη γεωμετρία του εργαλείου και το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Το μοντέλο παρουσίαζε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα ενώ υπολόγιζε και τη φθορά και τη διάρκεια ζωής του εργαλείου.

Οι Vogler κ.α. ανέπτυξαν ένα μοντέλο μικροφραιζαρίσματος για διάφορες μικροδομές κατεργαζόμενων υλικών. Το μοντέλο χρησιμοποιούσε τόσο τους υπολογισμούς της επιφάνειας του εργαλείου και του προφίλ του όσο και προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία για τον καθορισμό του ελάχιστου πάχους αποβλίττου. Με αυτό το μοντέλο στάθηκε δυνατή η πρόβλεψη της ασυνέχειας σχηματισμού αποβλίττου που ήταν σύμφωνη με τα πειραματικά αποτελέσματα για όλκιμο σίδηρο. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε ένα μοντέλο κοπής γραμμών ολισθήσεως για βάθη κοπής μεγαλύτερα από το ελάχιστο πάχος αποβλίττου, καθώς και ένα μοντέλο δυνάμεων ελαστικής παραμόρφωσης για μικρότερα βάθη κοπής με ανάλυση FEM. Το μοντέλο αυτό προέβλεπε τη δύναμη κοπής για τις κύριες μεταλλουργικές φάσεις των πολυφασικών όλκιμων σιδηρούχων κατεργαζόμενων τεμαχίων και έδειξε καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Οι Kim κ.α. πρότειναν ένα μοντέλο για τη μορφοποίηση αποβλίττου και της δύναμης κοπής σε κατεργασία φραιζαρίσματος σε μικροκλίμακα, προκειμένου να υπολογίσουν το ελάχιστο πάχος αποβλίττου και την επίδραση της ακτίνας της ακμής του κοπτικού. Το μοντέλο που προέκυψε, προέβλεψε ότι το εργαλείο μικροφραιζαρίσματος μπορεί να περιστρέφεται χωρίς να κόβει υλικό. Το φαινόμενο αυτό συνέβαινε όταν η πρόωση ανά δόντι ήταν μικρότερη από το ελάχιστο πάχος κοπής. Επίσης προέβλεπε ότι η περιοδικότητα που παρατηρείται στις δυνάμεις κοπής είναι συνάρτηση του ελάχιστου πάχους αποβλίττου, της πρόωσης ανά δόντι και της γωνίας τοποθέτησης του κοπτικού. Το μοντέλο επίσης μπορούσε να δώσει ένα άνω όριο της πρόωσης ανά δόντι για δεδομένη διάμετρο κοπτικού, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την επιλογή των συνθηκών κατεργασίας.

Τέλος, οι Joshi και Melkote ανέπτυξαν ένα μοντέλο το οποίο επικεντρωνόταν στο μηχανισμό αφαίρεσης υλικού σε μικρο-επίπεδο. Το μοντέλο τους βασίστηκε στη βαθμωτή θεωρία καταπονήσεων, όπου η αντοχή του υλικού είναι συνάρτηση του βαθμού καταπόνησης. Μοντελοποιήθηκε επίσης η κύρια ζώνη παραμόρφωσης (PDZ), και εκτιμήθηκε η αντοχή του υλικού συναρτήσει του μήκους του, όπου και εξηγήθηκε η επίδραση του μεγέθους. Το μοντέλο μπόρεσε τέλος να προβλέψει ένα κατώτερο όριο για την ειδική ενέργεια διάτμησης.

#### 8. Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε προσπάθεια βιβλιογραφικής ανασκόπησης ενός πεδίου που βρίσκεται στο επίκεντρο της σημερινής έρευνας από μηχανικούς και κατασκευαστές εδώ και πολύ καιρό. Η υπάρχουσα βιβλιογραφία που συνδέεται με τη μοντελοποίηση και τη φυσική των διαδικασιών είναι εντυπωσιακή. Εύκολα κάποιος μπορεί να διαπιστώσει ότι τα αποτελέσματα της τρέχουσας έρευνας ανταποκρίνονται στη φυσική περιέργεια και τις ανάγκες της βιομηχανίας με τρόπους που σπάνια δοκίμασαν στο παρελθόν στο χώρο των κατασκευών. Παράλληλα και η ικανότητα της βιομηχανικής πρακτικής που προκύπτει από την εφαρμογή των συγκεκριμένων τεχνικών είναι ουσιαστική.

Αλλά οι «μεγάλες προκλήσεις» υπάρχουν ακόμα στη μικρομηχανική. Πρώτα από όλα είναι η ανταλλαγή ανάμεσα στις «μεγάλες» συμβατικές μηχανές που εκτελούν εργασίες μικρομηχανικής και στους «μικρούς» μικροκατασκευαστές. Και οι δύο τύποι έχουν τα πλεονεκτήματά τους. Μια κατασκευαστική μηχανή που μπορείς να κουβαλάς πάνω σου μπορεί να μην έχει την ικανότητα να δημιουργεί μικρο-χαρακτηριστικά σε συμβατικού μεγέθους τεμάχια για παράδειγμα. Διαφορετικά η ανάπτυξη των εργαλείων φαίνεται να είναι προοδευτικά καλή ξεκινώντας από τις συμβατικές μηχανές ή τα συμβατικά εξαρτήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις συγκεκριμένες κλίμακες. Οι άλλες προκλήσεις μας ωθούν στη συνέχιση της έρευνας και ανάπτυξης και περιλαμβάνουν τα εξής:

- σχέδιο και επεξεργασία των κοπτικών εργαλείων (που πάσχουν από τον ανεπαρκή γεωμετρικό έλεγχο και τον καθορισμό της ακμής, τη φτωχή ακαμψία και την υπερβολική φθορά του εργαλείου, ενώ και οι επικαλύψεις δεν έχουν σχεδόν καθόλου αξιολογηθεί)
- δύσκολη επεξεργασία στα υλικά μηχανών (οι χάλυβες άνθρακα είναι μια πρόκληση για εργαλεία με διαμάντι, τα ψαθυρά υλικά που ματαιώνουν τα υψηλά MRR με τη λογική ποιότητας επιφάνειας και πολύ όλκιμα υλικά όπως συχνά χρησιμοποιούνται σε ιατρικές συσκευές είναι δύσκολα στην επεξεργασία τους)
- περιορισμένη παραγωγικότητα (σοβαρές προκλήσεις παραμένουν όσον αφορά και το χειρισμό των μικρών τμημάτων, των αυξανόμενων ρυθμών αφαίρεσης υλικού και του αποδοτικού σχεδιασμού της πορείας του εργαλείου, αυτό είναι ιδιαίτερα αληθινό αφού η μικρομηχανική σχετίζεται με άλλες μικροκατεργασίες όπως πχ. οι MEMS
- ξηρών έναντι υγρών κοπών (ποιος ο ρόλος, η σύνθεση, ποια λιπαντικά θα χρησιμοποιούνται;)
- κατανόηση και διαμόρφωση των μηχανισμών των διαδικασιών (αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό λόγω της «μη-συνεχούς» φύσης των υλικών σε αυτήν την κλίματα και της δυσκολίας στην επιβεβαίωση των προβλέψεων του μοντέλου)
- η μετρολογία (αν και οι προσεγγίσεις υπάρχουν, η παραγωγική εφαρμογή των μεθόδων είναι περιορισμένη)

Αυτές δεν είναι αξεπέραστες προκλήσεις και προβλέπεται να οδηγήσουν στη συνεχή ανάπτυξη της μικρομηχανικής στο άμεσο μέλλον. 9. Βιβλιογραφία

[1] Taniguchi, N., 1983, Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing, CIRP Annals, 32/2:573-582.

[2] Byrne, G., Dornfeld, D., Denkena, B., 2003, Advancing Cutting Technology, CIRP Annals, 52/2:483-507.

[3] Masuzawa, T., Toenshoff, H.K., 1997, Three- Dimensional Micromachining by Machine Tools, CIRP Annals, 46/2:621-628.

[4] Masuzawa, T., 2000, State of the Art of Micromachining, CIRP Annals, 49/2:473-488.

[5] Alting, L., Kimura, F., Hansen, H.N., Bissacco, G., 2003, Micro Engineering, CIRP Annals, 52/2:635-657.

[6] Liu, X., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., Ehmann, K.F., 2004, The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 126/4:666-678.

[7] Ehmann, K.F., Bourell, D., Culpepper, M.L., Hodgson, T.J., Kurfess, T.R., Madou, M., Rajurkar, K., DeVor, R.E., 2005, International Assessment of Research and Development in Micromanufacturing, WTEC Panel Report, World Technology Evaluation Center, Inc., Baltimore, MA.

[8] Backer, W.R., Marshall, E.R., Shaw, M.C., 1952, Size Effect in Metal Cutting, Transactions of the ASME, 74/1:61-71.

[9] Boothroyd, G., Knight, W.A., 1989, Fundamentals of Machining and Machine Tools, 2nd ed., Marcel Dekker, New York.

[10] Larson-Basse, J., Oxley, P.L.B., 1973, Effect of Strain Rate Sensitivity on Scale Phenomenon in Chip Formation, Proceedings of the 13th International Machine Tool Design and Research Conference, 209-216.

[11] Nakayama, K., Tamura, K., 1968, Size Effect in Metal- Cutting Force, Journal of Engineering for Industry- Transactions of the ASME, 90/1:119-126.

[12] Von Turkovich, B.F., Black, J.T., 1970, Micro- Machining of Copper and Aluminum Crystals, Transactions of the ASME, 92 Ser B/1:130-134.

[13] Moriwaki, T., Okuda, K., 1989, Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting, CIRP Annals, 38/1:115-118.

[14] Iwata, K., Moriwaki, T., Okuda, K., 1984, Ultra-High Precision Diamond Cutting of Copper, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kobe University, 31:93-102.

[15] Iwata, K., Moriwaki, T., Okuda, K., 1987, Precision Machining of Stainless Steel with CBN Tool, Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, 21/2:134-135.

[16] Weule, H., Huntrup, V., Tritschler, H., 2001, Micro- Cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization, CIRP Annals, 50/1:61-64.

[17] Sumomogi, T., Nakamura, M., Endo, T., Goto, T., Kaji, S., 2002, Evaluation of Surface and Subsurface Cracks in Nanoscale-Machined Single-Crystal Silicon by Scanning Force Microscope and Scanning Laser Microscope, Materials Characterization, 48/2-3:141-145.

[18] Vogler, M.P., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., 2004, On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-Endmilling, Part I: Surface Generation, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 126/4:685-694.

[19] Vogler, M.P., Kapoor, S.G., DeVor, R.E., 2004, On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-Endmilling, Part II: Cutting Force Prediction, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 126/4:695-705.

[20] Schmidt, J., Tritschler, H., Spath, D., Elsner, J., Huntrup, V., 2002, Requirements of an Industrially Applicable Microcutting Process for Steel Micro- Structures, Microsystem Technologies, 8/6:402-408.

[21] Furukawa, Y., Moronuki, N., 1988, Effect of Material Properties on Ultra Precise Cutting Processes, CIRP Annals, 37/1:113-116.

[22] Sato, M., Kato, Y., Tsutiya, K., 1979, Effects of Crystal Orientation on the Flow Mechanism in Cutting Aluminum Single Crystal, Transactions of the Japan Institute of Metals, 20/8:414-422.

[23] Yuan, Z.J., Lee, W.B., Yao, Y.X., Zhou, M., 1994, Effect of Crystallographic Orientation on Cutting Forces and Surface Quality in Diamond Cutting of Single Crystal, CIRP Annals, 43/1:39-42.

[24] Lee, W.B., Zhou, M., 1993, A Theoretical Analysis of the Effect of Crystallographic Orientation on Chip Formation in Micromachining, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 33/3:439-447.

[25] Zhou, M., Ngoi, K.A., Yeo, S.H., 1999, Effect of Workpiece Material Properties on Microcutting Processes, Proceedings of the EUSPEN, Bremen, Germany, 404-407.

[26] Ikawa, N., Shimada, S., Tanaka, H., 1992, Minimum Thickness of Cut in Micromachining, Nanotechnology, 3/1:6-9.

[27] Stowers, I.F., Belak, J.F., Lucca, D.A., Komanduri, R., Moriwaki, T., Okuda, K., Ikawa, N., Shimada, S., Tanaka, H., Dow, T.A., Drescher, J.D., 1991, Molecular- Dynamics Simulation of the Chip Forming Process in Single Crystal Copper and Comparison

with Experimental Data, Proceedings of the ASPE Annual Meeting, 100-104.

[28] Kim, C.-J., Bono, M., Ni, J., 2002, Experimental Analysis of Chip Formation in Micro-Milling, Proceedings of the NAMRI/SME, West Lafayette, ID, USA, 1-8.

[29] Shimada, S., Ikawa, N., Tanaka, H., Ohmori, G., Uchikoshi, J., Yoshinaga, H., 1993, Feasibility Study on Ultimate Accuracy in Microcutting Using Molecular Dynamics Simulation, CIRP Annals, 42/1:91-94.

[30] Yuan, Z.J., Zhou, M., Dong, S., 1996, Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultraprecision Machining, Journal of Materials Processing Technology, 62/4:327-330.

[31] Lucca, D.A., Seo, Y.W., 1993, Effect of Tool Edge Geometry on Energy Dissipation in Ultraprecision Machining, CIRP Annals, 42/1:83-88.

[32] Lucca, D.A., Rhorer, R.L., Komanduri, R., 1991, Energy Dissipation in the Ultraprecision Machining of Copper, CIRP Annals, 40/1:69-72.

[33] Bifano, T.G., Dow, T.A., Scattergood, R.O., 1991, Ductile-Regime Grinding. A New Technology for Machining Brittle Materials, Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, 113/2:184-189.

[34] Ueda, K., Sugita, T., Hiraga, H., 1991, J-Integral Approach to Material Removal Mechanisms in Microcutting of Ceramics, CIRP Annals, 40/1:61-64.

[35] Blake, P.N., Scattergood, R.O., 1990, Ductile-Regime Machining of Germanium and Silicon, Journal of the American Ceramic Society, 73/4:949-957.

[36] Nakasuji, T., Kodera, S., Hara, S., Matsunaga, H., Ikawa, N., Shimada, S., 1990, Diamond Turning of Brittle Materials for Optical Components, CIRP Annals, 39/1:89-92.

[37] Egashira, K., Mizutani, K., 2002, Micro-Drilling of Monocrystalline Silicon Using a Cutting Tool, Precision Engineering, 26/3:263-268.

[38] Fang, F.Z., Chen, L.J., 2000, Ultra-Precision Cutting for ZKN7 Glass, CIRP Annals, 49/1:17-20.

[39] Shimada, S., Ikawa, N., Inamura, T., Takezawa, N., Ohmori, H., Sata, T., 1995, Brittle-Ductile Transition Phenomena in Microindentation and Micromachining, CIRP Annals, 44/1:523-526.

[40] Takeuchi, Y., Sawada, K., Sata, T., 1996, Ultraprecision 3D Micromachining of Glass, CIRP Annals, 45/1:401-404.

[41] Donaldson, R.R., Syn, C.K., Taylor, J.S., 1987, Minimum Thickness of Cut in Diamond Turning of Electroplated Copper, Presented at the 2nd Annual ASPE Conference, Columbus, OH, USA.

[42] Donaldson, R.R., Syn, C.K., Taylor, J.S., Riddle, R.A., 1985, Chip Science: Basic Study of the Single-Point Cutting Process, Engineering Research Annual Report FY85, LLNL, UCID-19323085-2, 69-85.

[43] Nishiguchi, T., Maeda, Y., Masuda, M., Sawa, M., Ito, R., 1988, Mechanism of Micro Chip Formation in Diamond Turning of Al-Mg Alloy, CIRP Annals, 37/1:117-120.

[44] Jackson, M.J., 2005, Primary Chip Formation During the Micromachining of Engineering Materials, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B:Journal of Engineering Manufacture, 219/3:245-254.

[45] Waldorf, D.J., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., 1999, An Evaluation of Ploughing Models for Orthogonal Machining, Journal of Manufacturing Science and Engineering - Transactions of the ASME, 121/4:550-558.

[46] Kountanya, R.K., Endres, W.J., 2001, A High- Magnification Experimental Study of Orthogonal Cutting with Edge-Honed Tools, Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, MED, New York, United States, 12:157-164.

[47] Weinert, K., Kahnis, P., Petzoldt, V., Peters, C., 2005, Micro-Milling of Steel and Niti SMA, 55th CIRP General Assembly, STC-C section meeting presentation file, Antalya, Turkey.

[48] Kobayashi, A., Hoshina, N., Tsukada, T., Ueda, K., 1978, High Precision Cutting with a New Ultra Precision Spindle, CIRP Annals, 27/1:283-287.

[49] Takasu, S., Masuda, M., Nishiguchi, T., 1985, Influence of Study Vibration with Small Amplitude Upon Surface Roughness in Diamond Machining, CIRP Annals, 34/1:463-467.

[50] Zhang, G.M., Kapoor, S.G., 1991, Dynamic Generation of Machined Surfaces, Part 2. Construction of Surface Topography, Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, 113/2:145-153.

[51] Zhang, G.M., Kapoor, S.G., 1991, Dynamic Generation of Machined Surfaces, Part 1. Description of a Random Excitation System, Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, 113/2:137-144.

[52] 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.

[53] 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.

[54] Lee, D., Deichmuller, M., Min, S., Dornfeld, D.A., 2005, Variation in Machinability of Single Crystal Material in Micromechanical Machining, Proceedings of the Nanoengineering Symposium 2005, Daejeon, Korea.

[55] 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.

[56] Ahn, J., Lim, H., 1997, Side Burr Generation Model in Micro-Grooving, Proceedings of ASPE, 16:215-219.

[57] Ahn, J., Lim, H., Son, S., 2000, Burr and Shape Distortion in Micro-Grooving of Non-Ferrous Metals Using a Diamond Tool, KSME International Journal, 14/11:1244-1249.

[58] Schaller, T., Bohn, L., Mayer, J., Schubert, K., 1999, Microstructure Grooves with a Width of Less Than 50 Micro Cut with Ground Hard Metal Micro End Mills, Precision Engineering, 23/4:229-235.

[59] Sugawara, A., Inagaki, K., 1982, Effect of Workpiece Structure on Burr Formation in Micro-Drilling, Precision Engineering, 4/1:9-14.

[60] Ueda, K., Manabe, K., 1992, Chip Formation Mechanism in Microcutting of an Amorphous Metal, CIRP Annals, 41/1:129-132.

[61] Moriwaki, T., Sugimura, N., Luan, S., 1993, Combined Stress, Material Flow and Heat Analysis of Orthogonal Micromachining of Copper, CIRP Annals, 42/1:75-78.

[62] Fleischer, J., Kotschenreuther, J., Loehe, D., Gumbsch, P., Schulze, V., Delonnoy, L., Hochrainer, T., 2005, An Integrated Approach to the Modeling of Size-Effects in Machining with Geometrically Defined Cutting Edges, Proceedings of the CIRP Modeling Workshop, Chemnitz, Germany, 123-129.

[63] Chuzhoy, L., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., 2003, Machining Simulation of Ductile Iron and Its Constituents, Part 2: Numerical Simulation and Experimental Validation of Machining, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 125/2:192-201.

[64] Chuzhoy, L., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., Beaudoin, A.J., Bammann, D.J., 2003, achining Simulation of Ductile Iron and Its Constituents, Part 1: Estimation of Material Model Parameters and Their Validation, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 125/2:181-191.

[65] Park, S., Kapoor, S.G., DeVor, R.E., 2004, Mechanistic Cutting Process Calibration Via Microstructure-Level Finite Element Simulation Model, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 126/4:706-709.

[66] Ikawa, N., Shimada, S., Tanaka, H., Ohmori, G., 1991, Atomistic Analysis of Nanometric Chip Removal as Affected by Tool-Work Interaction in Diamond Turning, CIRP Annals, 40/1:551-554.

[67] Inamura, T., Suzuki, H., Takazawa, N., 1990, Cutting Experiments in a Computer Using Atomic Model of a Copper Crystal and a Diamond Tool, Journal of the JSPE, 56:1480-1486.

[68] Shimada, S., Ikawa, N., Ohmori, G., Tanaka, H., Uchikoshi, U., 1992, Molecular Dynamics Analysis as Compared with Experimental Results of Micromachining, CIRP Annals, 41/1:117-120.

[69] Stowers, I.F., 1990, Molecular Dynamics Modeling Applied to Indentation and Metal Cutting, Informal Video Presentation at CIRP Meeting, Berlin, Germany.

[70] Inamura, T., Takezawa, N., Kumaki, Y., 1993, Mechanics and Energy Dissipation in Nanoscale Cutting, CIRP Annals, 42/1:79-82.

[71] Inamura, T., Takezawa, N., Taniguchi, N., 1992, Atomic-Scale Cutting in a Computer Using Crystal Models of Copper and Diamond, CIRP Annals, 41/1:121-124.

[72] Shimada, S., Ikawa, N., Tanaka, H., Ohmori, G., Uchikoshi, J., 1993, Molecular Dynamics Analysis of Cutting Force and Chip Formation Process in Microcutting, Seimitsu Kogaku Kaishi/Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 59/12:2015-2021.

[73] Shimada, S., Ikawa, N., Tanaka, H., Uchikoshi, J., 1994, Structure of Micromachined Surface Simulated by Molecular Dynamics Analysis, CIRP Annals, 43/1:51-54.

[74] Chandrasekaran, N., Khajavi, A.N., Raff, L.M., Komanduri, R., 1998, New Method for Molecular Dynamics Simulation of Nanometric Cutting, Philosophical Magazine B: Physics of Condensed Matter; Statistical Mechanics, Electronic, Optical and Magnetic Properties, 77/1:7-26.

[75] Komanduri, R., Chandrasekaran, N., Raff, L.M., 1998, Effect of Tool Geometry in Nanometric Cutting: A Molecular Dynamics Simulation Approach, Wear, 219/1:84-97.

[76] Komanduri, R., Chandrasekaran, N., Raff, L.M., 1999, Orientation Effects in Nanometric Cutting of Single Crystal Materials: An MD Simulation Approach, CIRP Annals, 48/1:67-72.

[77] Komanduri, R., Chandrasekaran, N., Raff, L.M., 2000, M.D. Simulation of Nanometric Cutting of Single Crystal Aluminum-Effect of Crystal Orientation and Direction of Cutting, Wear, 242/1:60-88.

[78] Komanduri, R., Chandrasekaran, N., Raff, L.M., 2001, Molecular Dynamics Simulation of the Nanometric Cutting of Silicon, Philosophical Magazine B: Physics of Condensed Matter; Statistical Mechanics, Electronic, Optical and Magnetic Properties, 81/12:1989-2019.

[79] Komanduri, R., Chandrasekaran, N., Raff, L.M., 2001, MD Simulation of Exit Failure in Nanometric Cutting, Materials Science and Engineering A, 311/1-2:1-12.

[80] Komanduri, R., Narulkar, R., Raff, L.M., 2004, Monte Carlo Simulation of Nanometric Cutting, Philosophical Magazine, 84/11:1155-1183.

[81] Cheng, K., Luo, X., Ward, R., Holt, R., 2003, Modeling and Simulation of the Tool Wear in Nanometric Cutting, Wear, 255/7-12:1427-1432.

[82] Luo, X., Cheng, K., Guo, X., Holt, R., 2003, An Investigation on the Mechanics of Nanometric Cutting and the Development of Its Test-Bed, International Journal of Production Research, 41/7:1449-1465.

[83] Rentsch, R., Inasaki, I., 1995, Investigation of Surface Integrity by Molecular Dynamics Simulation, CIRP Annals, 44/1:295-298.

[84] Fang, F.Z., Wu, H., Liu, Y.C., 2005, Modelling and Experimental Investigation on Nanometric Cutting of Monocrystalline Silicon, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45/15:1681-1686.

[85] Inamura, T., Takezawa, N., Kumaki, Y., Sata, T., 1994, On a Possible Mechanism of Shear Deformation in Nanoscale Cutting, CIRP Annals, 43/1:47-50.

[86] Dautzenberg, J.H., Kals, J.A.G., Van der Wolf, A.C.H., 1983, Forces and Plastic Work in Cutting, CIRP Annals, 32/1:223-227.

[87] Dautzenberg, J.H., Veenstra, P.C., van der Wolf, A.C.H., 1981, Minimum Energy Principle for the Cutting Process in Theory and Experiment, CIRP Annals, 30/1:1-4.

[88] Merchant, M.E., 1945, Mechanics of Metal Cutting Process, and Type 2 Chip, Journal of Applied Physics, 16/5:267-275.

[89] Merchant, M.E., 1945, Mechanics of Metal Cutting Process, and Type 2 Chip, Journal of Applied Physics, 16/6:318-324.

[90] Kim, J.D., Kim, D.S., 1996, On the Size Effect of Micro-Cutting Force in Ultraprecision Machining, JSME International Journal, Series C, 39/1:164-169.

[91] Bao, W.Y., Tansel, I.N., 2000, Modeling Micro-End- Milling Operations. Part II: Tool Run-Out, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40/15:2175-2192.

[92] Bao, W.Y., Tansel, I.N., 2000, Modeling Micro-End- Milling Operations. Part III: Influence of Tool Wear, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40/15:2193-2211.

[93] Bao, W.Y., Tansel, I.N., 2000, Modeling Micro-End-Milling Operations. Part I: Analytical Cutting Force Model, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40/15:2155-2173.

[94] Tlusty, J., MacNeil, P., 1975, Dynamics of Cutting Forces in End Milling, CIRP Annals, 24/1:21-25.

[95] Vogler, M.P., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., 2003, Microstructure-Level Force Prediction Model for Micro- Milling of Multi-Phase Materials, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 125/2:202-209.

[96] Kim, C.-J., Mayor, J.R., Ni, J., 2004, A Static Model of Chip Formation in Microscale Milling, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 126/4:710-718.

[97] Joshi, S.S., Melkote, S.N., 2004, An Explanation for the Size-Effect in Machining Using Strain Gradient Plasticity, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 126/4:679- 684.

[98] Klocke, F., Weck, M., Fischer, S., Özmeral, H., Schroeter, R.B., Zamel, S., 1996,

Ultrapräzisionsbearbeitung Und Fertigung Von Mikrokomponenten, Verfahren, IDR3:172-177.

[99] Casstevens, J.M., 1983, Diamond Turning of Steel in Carbon-Saturated Atmospheres, Precision Engineering, 5/1:9-15.

[100] Evans, C., 1991, Cryogenic Diamond Turning of Stainless Steel, CIRP Annals, 40/1:571-575.

[101] Brinksmeier, E., Glaebe, R., Osmer, J., 2006, Ultra- Precision Diamond Cutting of Steel Molds, CIRP Annals, 55/1:to appear.

[102] Moriwaki, T., Shamoto, E., 1991, Ultraprecision Diamond Turning of Stainless Steel by Applying Ultrasonic Vibration, CIRP Annals, 40/1:559-562.

[103] Moriwaki, T., Shamoto, E., 1995, Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting, CIRP Annals, 44/1:31-34.

[104] Schaller, T., Heckele, M., Ruprecht, R., Schubert, K., 1999, Microfabrication of a Mold Insert Made of Hardened Steel and First Molding Results, Proceedings of the ASPE, 20:224-227.

[105] Schaller, T., Mayer, J., Schubert, K., 1999, Approach to a Microstructured Mold Made of Steel, Proceedings of the EUSPEN, Bremen, Germany, 1:238-241.

[106] Friedrich, C.R., Vasile, M.J., 1996, Development of the Micromilling Process for High-Aspect-Ratio Microstructures, Journal of Microelectromechanical Systems, 5/1:33-38.

[107] Fahrenberg, J., Schaller, T., Bacher, W., El-Kholi, A., Schomburg, W.K., 1996, High Aspect Ratio Multi- Level Mold Inserts Fabricated by Mechanical Micro Machining and Deep Etch X-Ray Lithography, Microsystem Technologies 2/4:174-177.

[108] Fleischer, J., Haupt, S., 2005, Microstructuring of Hardened Steels by Combining Laser Ablation and EDM - a Comparison with Micromilling, 55th CIRP General Assembly, STC-C section meeting presentation file, Antalya, Turkey.

[109] Fleischer, J., Kotschenreuther, J., 2005, Manufacturing of Micro Molds by Conventional and Energy Assisted Processes, Proceedings of the 4M Conference, Research Center Karlsruhe, Karlsruhe.

[110] Bissacco, G., Hansen, H.N., Tang, P.T., Fugl, J., 2005, Precision Manufacturing Methods of Inserts for Injection Modling of Microfluidic Systems, Proceedings of the ASPE Spring Topical Meeting, Columbus, Ohio, USA, 57-63.

[111] Sawada, K., Kawai, T., Takeuchi, Y., Sata, T., 2000, Development of Ultraprecision Micro Grooving (Manufacture of V-Shaped Groove), JSME International Journal. Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 43/1:170-176.

[112] Kawai, T., Sawada, K., Takeuchi, Y., 2001, Ultra- Precision Micro Structuring by Means of Mechanical Machining, Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Interlaken, Switzerland, 22-25.

[113] Takeuchi, Y., Maeda, S., Kawai, T., Sawada, K., 2002, Manufacture of Multiple-Focus Micro Fresnel Lenses by Means of Nonrotational Diamond Grooving, CIRP Annals, 51/1:343-346.

[114] Maeda, S., Takeuchi, Y., Sawada, K., Kawai, T., Sata, T., 2000, Creation of Ultraprecision Microgrooves Using Non-Rotational Cutting Tools, Journal of the JSPE, 66/9:1456-1460.

[115] Takeuchi, Y., Murota, M., Kawai, T., Sawada, K., 2003, Creation of Flat-End V-Shaped Microgrooves by Non-Rotational Cutting Tools, CIRP Annals, 52/1:41-44.

[116] Takeuchi, Y., Sawada, K., Kawai, T., 1997, Three- Dimensional Micromachining by Means of Ultraprecision Milling, Proceedings of the 9th Int. Prec. Eng. Seminar and 4th Int. Conf. on Ultraprecision in Manuf. Eng., Braunschweig, 596-599.

[117] Sasaki, T., Takeuchi, Y., Kawai, T., Sakaida, Y., 2004, 5-Axis Control Ultraprecision Micromachining of Micro 3-D Body, Proceedings of the Spring Annual Meeting of JSPE, 075-1076.

[118] Yu, Z.Y., Rajurkar, K.P., Tandon, A., 2004, Study of 3D Micro-Ultrasonic Machining, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 126/4:727-32.

[119] Kumabe, J., 1979, Vibration Cutting, Jikkyou Publishing Co., Tokyo, Japan.

[120] Ohnishi, O., Onikura, H., 2003, Effects of Ultrasonic Vibration on Microdrilling into Inclined Surface, Journal of the JSPE, 69/9:1337-1341.

[121] Ohnishi, O., Onikura, H., Feng, J., Kanda, T., Morita, T., 1996, Effects of Ultrasonic Vibration on Machining Accuracy in Microdrilling, Journal of the JSPE, 62/5:676-680.

[122] Egashira, K., Mizutani, K., Nagao, T., 2002, Ultrasonic Vibration Drilling of Microholes in Glass, CIRP Annals, 51/1:339-342.

[123] Egashira, K., Masuzawa, T., 1999, Microultrasonic Machining by the Application of Workpiece Vibration, CIRP Annals, 48/1:131-134.

[124] Fujino, M., Okamoto, N., Masuzawa, T., 1995, Development of Multi-Purpose Microprocessing Machine, Proceedings of the ISEM XI, Lausanne, Switzerland, 613-620.

[125] Langen, H.H., Masuzawa, T., Fujino, M., 1995, Modular Method for Microparts Machining and Assembly with Self-Alignment, CIRP Annals, 44/1:173-176.

[126] Donaldson, R.R., Patterson, S.R., 1983, Design and Construction of a Large, Vertical Axis Diamond Turning Machine, Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 433:62-67.

[127] McKeown, P.A., Wills-Moren, W.J., Read, R.F.J., Modjarrad, H., 1986, Design and Development of a Large Ultra-Precision CNC Diamond Turning Machine, Advanced Manufacturing Processes, 1/1:133-157.

[128] Toenshoff, H.K., Hesse, D., Mommsen, J., 1993, Micromachining Using Excimer Lasers, CIRP Annals, 42/1:247-251.

[129] Weck, M., Hartel, R., Modemann, K., 1988, Performance Assessment in Ultraprecision Micromachining, CIRP Annals, 37/1:499-502.

[130] Furukawa, Y., Moronuki, N., Kitagawa, K., 1986, Development of Ultra Precision Machine Tool Made of Ceramics, CIRP Annals, 35/1:279-282.

[131] Takeuchi, Y., Sakaida, Y., Sawada, K., Sata, T., 2000, Development of a 5-Axis Control Ultraprecision Milling Machine for Micromachining Based on Non-Friction Servomechanisms, CIRP Annals, 49/1:295-298.

[132] Sriyotha, P., Nakamoto, K., Sugai, M., Yamazaki, K., 2006, A Design Study on, and the Development of, a 5-Axis Linear Motor Driven Super-Precision Machine, CIRP Annals, 55/1:to appear.

[133] Moriwaki, T., Shamoto, E., Song, Y., Kohda, S., 2004, Development of a Elliptical Vibration Milling Machine, CIRP Annals, 53/1:341-344.

[134] Shamoto, E., Moriwaki, T., 1994, Study on Elliptical Vibration Cutting, CIRP Annals, 43/1:35-38.

[135] Shamoto, E., Moriwaki, T., 1999, Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting, CIRP Annals, 48/1:441- 444.

[136] Shamoto, E., Song, Y., Yoshida, H., Suzuki, N., Moriwaki, T., Kohda, S., Yamanishi, T., 2003, Development of Elliptical Vibration Cutting Machine by Utilizing Mechanical Vibrator, Journal of the JSPE, 69/4:542-543.

[137] Shamoto, E., Suzuki, N., Moriwaki, T., Naoi, Y., 2002, Development of Ultrasonic Elliptical Vibration Controller for Elliptical Vibration Cutting, CIRP Annals, 51/1:327-330.

[138] Hara, Y., Motonishi, S., Yoshida, K., 1990, A New Micro-Cutting Device with High Stiffness and Resolution, CIRP Annals, 39/1:375-378.

[139] Subrahmanian, R., Ehmann, K.F., 2002, Development of a Meso-Scale Machine Tool (mMT) for Micro- Machining, Proceedings of the 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Hiroshima, Japan.

[140] Werkmeister, J., Slocum, A., 2003, Design and Fabrication of the Mesomill: A Five-Axis Milling Machine for Meso-Scaled Parts, Proceedings of the ASPE, 28:79-82.

[141] Brinksmeier, E., Malz, R., Riemer, O., 1996, Mikrozerspanung Duktiler Und Sproeder Werkstoffe in Optischer Qualitaet, VDI Berichte, /1276:229.

[142] Weck, M., Fischer, S., Vos, M., 1997, Fabrication of Microcomponents Using Ultraprecision Machine Tools, Nanotechnology, 8/3:145-148.

[143] Schulze, V., Löhe, D., Wick, A., 1999, Influence of Heat Treatment State on Material Changes Close to Surface of Micromachined Steel SAE 1045, Proceedings of the EUSPEN, Bremen, Germany.

[144] Spath, D., Hüntrup, V., 1999, Micro-Milling of Steel for Mold Manufacturing – Influences of Material, Tools and Process Parameters, Proceedings of the EUSPEN, Bremen, Germany.

[145] Weinert, K., Guntermann, G., Schwietering, C., 1998, Mirofräsbearbeitung Schwerzerspanbarer Werkstoffe, Werkstattstechnik 88, Heft 11/12:503-506.

[146] Weule, H., Schmidt, J., Huntrup, V., Tritschler, H., 1999, Micromilling of Ferrous Materials, Production Engineering, 6/2:17-20.

[147] Vasile, M.J., Friedrich, C.R., Kikkeri, B., McElhannon, R., 1996, Micrometer-Scale Machining: Tool Fabrication and Initial Results, Precision Engineering, 19/2-3:180-186.

[148] Adams, D.P., Vasile, M.J., Krishnan, A.S.M., 2000, Microgrooving and Microthreading Tools for Fabricating Curvilinear Features, Precision Engineering, 24/4:347-356.

[149] Adams, D.P., Vasile, M.J., Benavides, G., Campbell, A.N., 2001, Micromilling of Metal Alloys with Focused Ion Beam-Fabricated Tools, Precision Engineering, 25/2:107-113.

[150] Aoki, I., Takahashi, T., 1999, Micropattern Fabrication by Specially Designed Micro Tool, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 3874:365-372.

[151] Egashira, K., Mizutani, K., 2003, Milling Using Ultra- Small Diameter Ball End Mills Fabricated by Electrical Discharge Machining, Journal of the JSPE, 69/1:1449- 1453.

[152] Friedrich, C., Coane, P., Goettert, J., Gopinathin, N., 1998, Direct Fabrication of Deep X-Ray Lithography Masks by Micromechanical Milling, Precision Engineering, 22/3:164-173.

[153] Masuzawa, T., Fujino, M., 1990, Process for Manufacturing Very Fine Pin Tools, SME Technical Papers, MS90-307.

[154] Onikura, H., Ohnishi, O., Take, Y., 2000, Fabrication of Micro Carbide Tools by Ultrasonic Vibration Grinding, CIRP Annals, 49/1:257-260.

[155] Ohmori, H., Katahira, K., Uehara, Y., Watanabe, Y., Lin, W., 2003, Improvement of Mechanical Strength of Micro Tools by Controlling Surface Characteristics, CIRP Annals, 2/1:467-470.

[156] Uhlmann, E., Schauer, K., 2005, Dynamic Load and Strain Analysis for the Optimization of Micro End Mills, CIRP Annals, 54/1:75-78. [157] 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.

[158] 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, 40/4:599-08.

[159] 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.

[160] 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.

[162] Godlinski, D., Grathwohl, G., Kuntz, M., 1999, Development of Ceramic Micro-Tools for Precision Machining, Proceedings of the EUSPEN, Bremen, Germany, 298-301.

[163] Gaebler, J., Schaefer, L., Westermann, H., 2000, Chemical Vapour Deposition Diamond Coated Microtools for Grinding, Milling and Drilling, Diamond and Related Materials, 9/3:921-924.

[164] 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.

[165] Chyan, H.C., Ehmann, K.F., 1998, Development of Curved Helical Micro-Drill Point Technology for Micro- Hole Drilling, Mechatronics, 8/4:337-358.

[166] Chyan, H.C., Ehmann, K.F., 2002, Curved Helical Drill Points for Microhole Drilling, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 216/1:61-75.

[167] Hinds, B.K., Treanor, G.M., 2000, Analysis of Stresses in Micro-Drills Using the Finite Element Method, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40/10:1443-1456. [168] Yang, Z., Li, W., Chen, Y., Wang, L., 1998, Study for

Increasing Micro-Drill Reliability by Vibrating Drilling, Reliability Engineering & System Safety, 61/3:229-233.

[169] Yang, Z., Tan, Q., Wang, L., 2002, Principle of Precision Micro-Drilling with Axial Vibration of Low Frequency, International Journal of Production Research, 40/6:1421-1427.

[170] Friedrich, C., Coane, P., Goettert, J., Gopinathin, N., 1997, Precision of Micromilled X-Ray Masks and Exposures, Microsystem Technologies, 4/1:21-24.

[171] Kussul, E., Baidyk, T., Ruiz-Huerta, L., Caballero- Ruiz, A., Velasco, G., Kasatkina, L., 2002, Development of Micromachine Tool Prototypes for Microfactories, Journal of Micromechanics and Microengineering, 12/6:795-812.

[172] Liang, S.Y., 2005, Performance Evaluation of a Micro- Scale Vertical Milling Machine for Precision Manufacturing, 55th CIRP General Assembly, STC-C section meeting presentation file, Antalya, Turkey.

[173] Kitahara, T., Ashida, K., Tanaka, M., Ishikawa, Y., Oyama, N., Nakazawa, Y., 1998, Microfactory and Microlathe, Proceedings of the International Workshop on Microfactories, 1-8.

[174] Ashida, K., Mishima, N., Maekawa, H., Tanikawa, T., Kaneko, K., Tanaka, M., 2000, Development of Desktop Machining Microfactory, Proceedings of the Japan-USA Symposium on Flexible Automation, 175- 178. [175] Maekawa, H., Komoriya, K., 2001, Development of a Micro Transfer Arm for a Micro Factory, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, 1444-1451.

[176] Okazaki, Y., Kitahara, T., 2000, Micro-Lathe Equipped with Closed-Loop Numerical Control, Proceedings of the 2nd International Workshop on Microfactories, Switzerland, 87-90.

[177] Tanaka, M., 2001, Development of Desktop Machining Microfactory, RIKEN Review, 34:46-49.

[178] Gaugel, T., Dobler, H., 2001, Advanced Modular Micro-Production System (AMMS), Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 4568:278-285.

[179] Gaugel, T., Dobler, H., Bengel, M., Weis , C., Schlieber, J., 2002, Building a Mini-Factory from a Technology Construction Kit, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on Microfactories, 5-8.

[180] Verettas, I., Clavel, R., Codourey, A., 2003, Microfactory : Desktop Cleanrooms for the Production of Microsystems, Proceedings of the IEEE, 18-23.

[181] Codourey, A., Honnegger, M., 2002, A Centralized Control System for Microfactories, 3rd International Workshop on Microfactories, 9-12.

[182] Breguet, J.-M., Schmitt, C., Clavel, R., 2000, Micro/Nanofactory: Concept and State of the Art, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 4194:1-12.

[183] Mishima, N., 2003, Design of a Miniature Manufacturing System for Micro-Fabrication, Proceedings of the 10th ISPE International Conference on Concurrent Engineering, Madeira, Portugal, 1129-1135.

[184] Okazaki, Y., Mishima, N., Ashida, K., 2004, Microfactory - Concept, History, and Developments, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 126/4:837-844.

[185] Otsuka, J., Hata, S., Shimokohbe, A., Koshimizu, S., 1998, Development of Ultraprecision Table for Ductile Mode Cutting, Seimitsu Kogaku Kaishi/Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 64/4:546-551.

[186] Otsuka, J., Ichikawa, S., Masuda, T., Suzuki, K., 2005, Development of a Small Ultraprecision Positioning Device with 5 nm Resolution, Measurement Science and Technology, 16/11:2186-2192.

[187] Holmes, M., Trumpet, D., Hocken, R., 1995, Atomic- Scale Precision Motion Control Stage (the Angstrom Stage), CIRP Annals, 44/1:455-460.

[188] Kempf, C.J., Kobayashi, S., 1999, Disturbance Observer and Feedforward Design for a High-Speed Direct-Drive Positioning Table, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 7/5:513-526.

[189] Mizumoto, H., Yabuta, Y., Arii, S., Tazoe, Y., Kami, Y., 2005, A Picometer Positioning System Using Active Aerostatic Guideway, Proceedings of the International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21<sup>st</sup> Century, Nagoya, Japan, 1009-1014.

[190] Yagyu, T., Tanase, H., Moriyama, T., Matsui, T., 1995, Adaptive Control System for Multiple Micro-Machines, Proceedings of the Int. Joint Conf. of the Fourth IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems and the Second Int.

Fuzzy Engineering Symposium, Yokohama, Japan, 2:863-868.

[191] Noguchi, S., Tsukada, T., Sakamoto, A., 1995, Evaluation Method to Determine radial Accuracy of High-Precision Rotating Spindle Units, Precision Engineering, 17/4:266-273.

[192] Ohishi, S., Matsuzaki, Y., 2002, Experimental Investigation of Air Spindle Unit Thermal Characteristics, Precision Engineering, 26/1:49-57. [193] Yokoyama, K., 1998, Analysis of Deformation of Air- Spindle Due to Centrifugal Force, Seimitsu Kogaku Kaishi/Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 64/1:137-141.

[194] Hargrove, S.K., Kusiak, A., 1994, Computer-Aided Fixture Design: A Review, International Journal of Production Research, 32/4:733-753.

[195] Qiao, Y., Bu, H., 2000, Investigation on Suction Force of Vacuum Pumps for Micro-Components, Vacuum, 56/2:123-128.

[196] Zesch, W., Brunner, M., Weber, A., 1997, Vacuum Tool for Handling Microobjects with a Nanorobot, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, NM, USA, 2:1761-1766.

[197] Codourey, A., Zesch, W., Buchi, R., Siegwart, R., 1994, High Precision Robots for Automated Handling of Micro Objects, Seminar on Handling and Assembly of Microparts, Vienna, Austria.

[198] Bellouard, Y., Clavel, R., Gotthardt, R., Bidaux, J.-E., Sidler, T.A., 1998, New Concept of Monolithic Shape Memory Alloy Micro-Devices Used in Micro-Robotics, Proceedings of the Actuator 98, 6th International Conference on New Actuators, 499-502.

[199] Sato, T., Koyano, K., Nakao, M., Hatamura, Y., 1993, Novel Manipulator for Microobject Handling as Interface between Micro and Human Worlds, Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1674-1681.

[200] Koyano, K., Sato, T., 1996, Micro Object Handling System with Concentrated Visual Fields and New Handling Skills, Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3:2541-2548.

[201] Lee, Y., 2000, Monitoring and Planning for Open Architecture Manufacturing of Precision Machining Using Acoustic Emission, Ph.D. Dissertation, Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, CA.

[202] Moriwaki, T., 1995, Experimental Analysis of Ultra- Precision Machining, International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 29/4:287-290.

[203] Lee, D.E., Hwang, I., Valente, C.M.O., Oliveira, J.F.G., Dornfeld, D.A., 2006, Precision Manufacturing Process Monitoring with Acoustic Emission, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46/2:176-188.

[204] Dornfield, D.A., Lee, Y., Chang, A., 2003, Monitoring of Ultraprecision Machining Processes, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 21/8:571-578.

[205] Umeda, A., 1996, Review on the Importance of Measurement Technique in Micromachine Technology, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2880:26-38.

[206] McGeough, J.A., 2002, Micromachining of Engineering Materials, Marcel Dekker, New York.

[207] Howard, L.P., Smith, S.T., 1994, Metrological Constant Force Stylus Profiler, Review of Scientific Instruments, 65/4 pt 1:892-901.

[208] Masuzawa, T., Hamasaki, Y., Fujino, M., 1993, Vibroscanning Method for Nondestructive Measurement of Small Holes, CIRP Annals, 42/1:589-592.

[209] Kim, B., Masuzawa, T., Bourouina, T., 1999, Vibroscanning Method for the Measurement of Micro-

Hole Profiles, Measurement Science and Technology, 10/8:697-705.

[210] Miyoshi, T., Takaya, Y., Saito, K., 1996, Micromachined Profile Measurement by Means of Optical Inverse Scattering Phase Method, CIRP Annals, 45/1:497-500.

[211] Kim, S.-W., Rhee, H.-G., Chu, J.-Y., 2003, Volumetric Phase-Measuring Interferometer for Three- Dimensional Coordinate Metrology, Precision Engineering, 27/2:205-215.

[212] Pril, W.O., Struik, K.G., Schellekens, P.H.J., 1997, Development of a 2D Probing System with nanometer Resolution, Proceedings of ASPE, 16:438-442.

[213] Vermeulen, M.M.P.A., Rosielle, P.C.J.N., Schellekens, P.H.J., 1998, Design of a High-Precision DCoordinate Measuring Machine, CIRP Annals, 47/1:447-450.

[214] Kramar, J.A., Jun, J.S., Penzes, W.B., Scire, F.E., Teague, E.C., Villarrubia, J.S., 1999, Grating Pitch Measurements with the Molecular Measuring Machine, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 3806:46-53.

[215] Peggs, G.N., Lewis, A.J., Oldfield, S., 1999, Designfor a Compact High-Accuracy CMM, CIRP Annals, 48/1:417-420.

[216] Shiozawa, H., Fukutomi, Y., Ushioda, T., Yoshimura, S., 1998, Development of Ultra-Precision 3DCMMBased on 3-D Metrology Frame, Proceedings of ASPE, 18:15-18.

[217] Jäger, G., Manske, E., Hausotte, T., Büchner, H.-J.,2000, Laserinterferometrische Nanomessmaschinen, VDI Berichte, 1530 (Sensoren und Messsysteme2000), VDI Verlag GmbH, Düsseldorf:271-278.

[218] Brand, U., Cao, S., Kleine-Besten, T., Hoffmann, W., Schwenke, H., Butefisch, S., Buttgenbach, S., 2002, Recent Developments in Dimensional Metrology for Microsystem Components, Microsystem Technologies, 8/1:3-6.

[219] Cao, S., Hassler-Grohne, W., Brand, U., Gao, S., Wilke, R., Buttgenbach, S., 2002, A Three Dimensional Measurement System with Micro Tactile Sensor, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 4902:52-59.

[220] Grigg, D., Felkel, E., Roth, J., De Lega, X.C., Deck, L., De Groot, P., 2004, Static and Dynamic Characterization of MEMS and MOEMS Devices Using Optical Interference Microscopy, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 5455:429-435.

[221] Otsuka, J., Ichikawa, S., Yamaguchi, Y., 2003, Development of Small Ultraprecision Displacement Sensor and Small Ultraprecision Positioning Device with 1 nm Resolution, Journal of the JSPE, 69/10:1428-1433.