

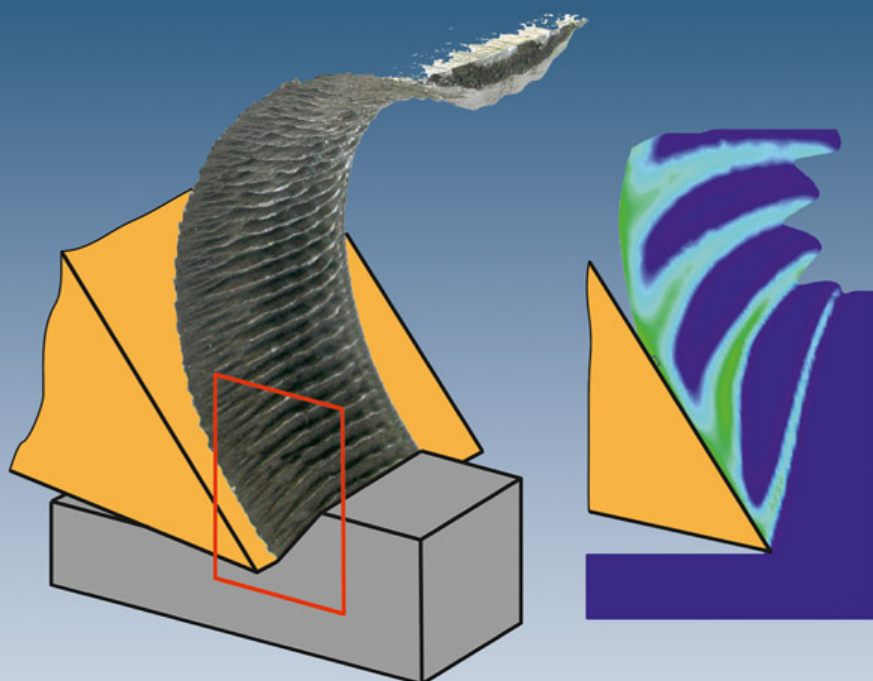
Καθηγητής Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Dr.h.c.

**Κων/νος - Διονύσιος Ε. Μπουζάκης**

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

# Μηχανική και Τεχνολογία Μηχανουργικών Μορφοποιήσεων με Αφαίρεση Υλικού





ISBN 978-960-456-451-4

© Copyright, 2010, 2015, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Κ.-Δ. Μπουζάκης  
2η Έκδοση επανξημένη, 2015

---

*Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.*

---

**Φωτοστοιχειοθεσία**

**Εκτύπωση**

**Βιβλιοδεσία**

**Π. ΖΗΤΗ & Σια ΟΕ**

18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας

Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19

Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



**www.ziti.gr**

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ - ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΘΕΣΗ:**

Αρμενοπούλου 27, 546 35 Θεσσαλονίκη

Τηλ.: 2310.203.720, Fax: 2310.211.305 • e-mail: sales@ziti.gr

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ - ΠΩΛΗΣΗ ΛΙΑΝΙΚΗ-ΧΟΝΔΡΙΚΗ:**

Χαριλάου Τρικούπη 22, 106 79 Αθήνα

Τηλ.-Fax: 210.3816.650 • e-mail: athina@ziti.gr

**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ:** [www.ziti.gr](http://www.ziti.gr)



Όλες οι μηχανολογικές κατασκευές, διατάξεις και εξαρτήματα υλοποιούνται μέσω μηχανουργικών μορφοποιήσεων, που αποτέλεσαν διαχρονικά, βασικό πυλώνα ανάπτυξης. Το παρόν σύγγραμμα, λαμβάνοντας υπόψη τη συστηματική ταξινόμηση των μεθόδων κατεργασιών, σύμφωνα με το Γερμανικό Ινστιτούτο Τυποποιήσεων DIN 8589, αναφέρεται στην μείζονα περιοχή των μορφοποιήσεων τεμαχίων με αφαίρεση υλικού. Συγκεκριμένα, το βιβλίο πραγματεύεται τις κατεργασίες κοπής με προκαθορισμένη γεωμετρία κόψης. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στην κατανόηση των μηχανικών, φυσικών και χημικών φαινομένων, που λαμβάνουν χώρα κατά τις μνημονευθείσες διεργασίες, ώστε να διευκολυνθεί η θεωρητική προσέγγισή τους, καθώς και η αποτελεσματική διεξαγωγή τους. Στη παρούσα έκδοση σε σχέση με την προηγούμενη, περιγράφεται εκτενέστερα ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των λεπτών προστατευτικών επικαλύψεων των κοπτικών εργαλείων, βάσει των οποίων επεξηγείται η συμπεριφορά της φθοράς τους, κατά τις κατεργασίες διαφόρων υλικών. Επίσης η παρούσα έκδοση έχει συμπληρωθεί με τις μορφοποιήσεις και τον ποιοτικό έλεγχο των οδοντωτών τροχών. Το βιβλίο απευθύνεται τόσο στον φοιτητή, μηχανολόγο μηχανικό, που εισάγεται για πρώτη φορά στην επιστημονική περιοχή της μηχανικής και της τεχνολογίας των μηχανουργικών μορφοποιήσεων, όσο και στον επαγγελματία μηχανικό, που εργάζεται σε σχετικά πεδία και προσπαθεί να δώσει λύσεις σε προβλήματα που αντιμετωπίζει.

Στο σύγγραμμα καθίσταται εμφανής η υπερτριακονταπενταετής επιστημονική συνεισφορά του Εργαστηρίου Εργαλειομηχανών και Διαμορφωτικής Μηχανολογίας (ΕΕΔΜ) του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΑΠΘ, σε διάφορες περιοχές των μηχανουργικών μορφοποιήσεων, όπως προκύπτει από την παρατιθέμενη διεθνή και εθνική βιβλιογραφία. Για το λόγο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους διατελέσαντες και τους νυν συνεργάτες του ΕΕΔΜ, για την συμπαράστασή τους στην εξέλιξη της επιστημονικής γνώσης της περιοχής αυτής. Ευχαριστίες απευθύνω ειδικά και στη συνεργάτιδά μου και μέλος του Ειδικού Εκπαιδευτικού Προσωπικού του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΑΠΘ, Διπλ. Μηχ. Μηχ. Μ. Γρηγοριάδου, για την επιμέλεια σχημάτων της προηγούμενης και της παρούσης έκδοσης του βιβλίου. Επίσης, ιδιαίτερα ευχαριστώ τον



επί μακρόν συνεργάτη μου Δρ. Μηχ. Μηχ. Ι. Μυρισίδη, επ. Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, για την άοκνη συνεισφορά του στην επιμέλεια της πρώτης και της δεύτερης έκδοσης του συγγράμματος, καθώς και τον Εκδοτικό Οίκο Ζήτη.

*Καθηγητής Κ.-Δ. Μπουζάκης*

*Διευθυντής του ΕΕΔΜ*

*Τακτικό Μέλος της Διεθνούς Ακαδημίας  
Τεχνικών Παραγωγής (CIRP)*

*Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2015*



## Κεφάλαιο 1

### Εισαγωγή

15

## Κεφάλαιο 2

### Δομή και κρυσταλλογραφικές μορφές υλικών τεμαχίων και εργαλείων

25

2.1	Δημιουργία στοιχειωδών κρυσταλλικών πλεγμάτων	27
2.1.1	Δόμηση κρυσταλλικού πλέγματος ατόμων, συγκρατουμένων μέσω μεταλλικού δεσμού	27
2.1.2	Δημιουργία κρυσταλλικού πλέγματος μέσω ετεροπολικών δεσμών	29
2.1.3	Κρυσταλλικά πλέγματα, δομημένα μέσω ομοιοπολικού δεσμού ατόμων	31
2.1.4	Σχηματισμός κρυσταλλοδομών μέσω μοριακού δεσμού (van der Waals)	33
2.2	Κρυσταλλικά πλέγματα στερεών διαλυμάτων	33
2.3	Παραμορφωσιμότητα των διαφόρων κρυσταλλοδομών	35
2.4	Δημιουργία κρυσταλλογραφικών μορφών, μέσω ανάπτυξης των κρυστάλλων	37
2.5	Αταξίες κρυσταλλικών πλεγμάτων και επίδρασή τους επί των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών	39
2.5.1	Γεωμετρίες αταξιών κρυσταλλικών πλεγμάτων	39
2.5.2	Δημιουργία αταξιών μέσω μηχανικών υπερκαταπονήσεων	40
2.5.3	Μετατοπίσεις αταξιών εντός κρυσταλλικών πλεγμάτων, μέσω εξάσκησης μηχανικών τάσεων	42
2.5.4	Επιδράσεις αταξιών και διαχύσεων επί των μηχανικών ιδιοτήτων, συναρτήσει του μεγέθους των κόκκων	44
2.5.5	Επίδραση αταξιών και διαχύσεων επί των μηχανικών ιδιοτήτων ιδιαίτερα λεπτοκόκκων υλικών, όπως των PVD επικαλύψεων, συναρτήσει της θερμοκρασίας	48
2.5.6	Επίδραση αταξιών και διαχύσεων επί των μηχανικών ιδιοτήτων κανονικής κοκκομετρίας υλικών, συναρτήσει της θερμοκρασίας και της ταχύτητας παραμόρφωσης	49



2.6	Επίδραση της παραμόρφωσης και της θερμοκρασίας επί του μηχανισμού ανακρυστάλλωσης .....	51
2.7	Επίδραση θερμοκρασιών, υψηλότερων από αυτές της ανακρυστάλλωσης, καθώς και της ταχύτητας παραμόρφωσης, επί των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών .....	53

## Κεφάλαιο 3

### Μηχανική της κοπής με εργαλεία προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης

3.1	Περιγραφή της κοπτικής γεωμετρίας του εργαλείου .....	57
3.2	Μηχανισμοί δημιουργίας του αποβλίττου κατά την κοπή .....	64
3.2.1	Παραμορφώσεις και κρυσταλλικοί μετασχηματισμοί του υλικού, στην περιοχή σχηματισμού του αποβλίττου .....	64
3.2.2	Καταпонήσεις του υλικού κατά το σχηματισμό του αποβλίττου .....	70
3.2.3	Μικροδομές αποβλίττων .....	71
3.3	Αναλυτικός προσδιορισμός της δημιουργίας του αποβλίττου με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) .....	74
3.3.1	FEM-λογισμικά για την προσομοίωση μηχανισμών κοπής .....	74
3.3.2	Μέθοδοι πειραματικού προσδιορισμού της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς υλικών σε υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης και θερμοκρασίες .....	77
3.3.3	Μαθηματική περιγραφή νόμων πλαστικής διαρροής υλικού κατά την FEM προσομοίωση του μηχανισμού της κοπής .....	79
3.4	Προσδιορισμός διαφόρων χαρακτηριστικών μεγεθών κατά την κοπή, με τη βοήθεια FEM υπολογισμών .....	84
3.4.1	FEM υπολογισμός πεδίων μηχανικών τάσεων, παραμορφώσεων και θερμοκρασιών στην περιοχή δημιουργίας του αποβλίττου .....	84
3.4.2	Υπολογισμός παραμενουσών τάσεων στις επιφάνειες των κατεργαζομένων τεμαχίων .....	87
3.4.3	Δαπανώμενα έργα και δημιουργούμενη θερμότητα κατά τον σχηματισμό του αποβλίττου .....	89
3.5	Επίδραση διαφόρων παραμέτρων επί της μικροδομής του αποβλίττου κατά την κοπή .....	93
3.5.1	Επίδραση της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής επί της μικροδομής του αποβλίττου .....	93
3.5.2	Επίδραση της γωνίας αποβλίττου επί της μικροδομής του αποβλίττου .....	97
3.5.3	Επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων του κατεργαζομένου υλικού επί της μικροδομής του αποβλίττου .....	100



3.6 Έλεγχος της μακρο-γεωμετρίας των αποβλίττων .....	104
3.7 Δημιουργούμενη τραχύτητα επί των επιφανειών των τεμαχίων κατά την κοπή .....	111
3.8 Δημιουργία ψευδοκόψεων κατά την κοπή .....	113
3.9 Δημιουργία απολήξεων κατά την κοπή .....	120

## Κεφάλαιο 4

125

### **Δυνάμεις και θερμοκρασίες κατά την κοπή με εργαλεία προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης**

4.1 Ανάλυση της δύναμης κοπής σε συνιστώσες, χαρακτηριστικά συστήματα αναφοράς .....	127
4.2 Επίδραση της μικροδομής του αποβλίττου επί της δύναμης κοπής ..	132
4.3 Μέτρηση των συνιστωσών της δύναμης κοπής .....	134
4.4 Επίδραση των συνθηκών κατεργασίας επί της δύναμης κοπής .....	138
4.4.1 Επίδραση της ταχύτητας κοπής .....	138
4.4.2 Επίδραση του βάθους και της πρόωσης κοπής επί των συνιστωσών της δύναμης κοπής .....	142
4.4.3 Επίδραση γωνιών της κοπτικής γεωμετρίας επί των συνιστωσών της δύναμης κοπής .....	144
4.4.4 Επίδραση της φθοράς του εργαλείου επί της δύναμης κοπής .....	145
4.4.5 Επίδραση του υλικού επί της δύναμης κοπής .....	147
4.5 Πειραματικός-αναλυτικός προσδιορισμός των συνιστωσών της δύναμης κοπής .....	150
4.5.1 Μαθηματική περιγραφή των πειραματικά προσδιορισμένων συνιστωσών της δύναμης κοπής .....	150
4.5.2 Πειραματική-αναλυτική μέθοδος για τον γρήγορο προσδιορισμό ειδικών δυνάμεων κοπής και σχετικών εκθετών .....	157
4.5.3 Πειραματικός-αναλυτικός προσδιορισμός συνιστωσών δυνάμεων κοπής σε κατεργασίες πολύπλοκης γεωμετρίας αποβλίττων .....	160
4.6 Μέτρηση και υπολογισμός θερμοκρασιακών πεδίων κατά την κοπή .....	165
4.6.1 Μεθοδολογίες μέτρησης θερμοκρασιών κατά την κοπή .....	165
4.6.2 FEM προσδιορισμός θερμοκρασιακών πεδίων κατά την κοπή .....	169



## Κεφάλαιο 5

173

### Μηχανισμοί φθοράς ακαλύπτων κοπτικών εργαλείων προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης

5.1	Μηχανισμοί φθοράς υλικών συνεργαζομένων επιφανειών .....	177
5.1.1	Συναφειακές μικροσυγκολλήσεις .....	179
5.1.2	Αποξέσεις .....	180
5.1.3	Μικρορηγματώσεις λόγω κόπωσης .....	181
5.1.4	Τριβοχημικές αντιδράσεις .....	182
5.2	Φθορά ακαλύπτων εργαλείων κατά την κοπή .....	183
5.2.1	Συναφειακές μικροσυγκολλήσεις κατά την κοπή .....	184
5.2.2	Φθορά εργαλείων λόγω αποξέσεων .....	184
5.2.3	Θραύσεις των κοπτικών ακμών λόγω κόπωσης .....	187
5.2.3.1	Δημιουργία ρωγμών σε επίπεδα παράλληλα στην επιφάνεια του αποβλίττου .....	188
5.2.3.2	Δημιουργία ρωγμών σε επίπεδα κάθετα στην επιφάνεια του αποβλίττου και την κοπτική ακμή .....	190
5.2.4	Φθορά εργαλείων λόγω τριβοχημικών αντιδράσεων .....	192
5.2.4.1	Χημικές αντιδράσεις επί της επιφανείας του εργαλείου κατά την κοπή .....	192
5.2.4.2	Διαφοροποιήσεις της χημικής σύστασης υλικών εργαλείου και αποβλίττου λόγω διαχύσεων .....	196
5.3	Μεγέθη για την μαθηματική περιγραφή της φθοράς κοπτικών εργαλείων .....	199

## Κεφάλαιο 6

203

### Προσδιορισμός ιδιοτήτων επικαλύψεων και μηχανισμοί φθοράς των επικαλυμμένων κοπτικών εργαλείων προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης

6.1	Προσδιορισμός ιδιοτήτων υλικών επικαλύψεων .....	211
6.1.1	Προσδιορισμός καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης επικαλύψεων και άλλων υλικών μέσω νανοδιεισδύσεων .....	211
6.1.2	Πειραματικός και αναλυτικός προσδιορισμός σκληρότητας επικαλύψεων .....	219
6.1.3	Προσδιορισμός αντοχής σε κόπωση επικαλύψεων .....	224
6.1.4	Προσδιορισμός της επίδρασης της ταχύτητας παραμόρφωσης στην συμπεριφορά κόπωσης των επικαλύψεων .....	233
6.1.5	Έλεγχος της ευθραυστότητας επικαλύψεων .....	236



6.1.6	Προσδιορισμός πάχους επικαλύψεων και κατανομής του στην κοπτική ακμή .....	239
6.1.7	Έλεγχος και ποσοτικοποίηση της συνάφειας επικαλύψεων .....	242
6.1.7.1	Γενικές μέθοδοι ελέγχου συνάφειας επικαλύψεων .....	242
6.1.7.2	Μέθοδοι ελέγχου της επίδρασης της συνάφειας της επικάλυψης στις καταπονήσεις υπό φορτίο .....	245
6.1.7.3	Μέθοδοι ελέγχου της αντοχής της διεπιφάνειας επικαλύψεων σε υψηλές θερμοκρασίες και επαναλαμβανόμενες κρουστικές φορτίσεις .....	251
6.1.8	Έλεγχος επάρκειας αντοχής σε διάχυση και οξείδωση .....	254
6.2	Μηχανισμοί φθοράς επικαλυμμένων εργαλείων και πειραματική-αναλυτική προσέγγισή τους .....	257
6.2.1	Αστοχία της επικάλυψης λόγω μηχανικής υπερφόρτισης .....	259
6.2.2	Αστοχία της επικάλυψης λόγω κόπωσης του υλικού της .....	261
6.2.3	Επίδραση της ταχύτητας παραμόρφωσης επικάλυψης επί της αστοχίας της λόγω κόπωσης κατά το φραιζάρισμα .....	267
6.2.4	Επίδραση της ευθραυστότητας επικαλύψεων στη συμπεριφορά της φθοράς των επικαλυμμένων εργαλείων .....	272
6.2.5	Αστοχία της επικάλυψης λόγω διάχυσης και οξείδωσης .....	274
6.2.6	Αστοχία της επικάλυψης λόγω ανεπαρκούς συνάφειας .....	278
6.2.6.1	Βελτίωση της φθοράς επικαλυμμένων εργαλείων μέσω κατάλληλης προετοιμασίας της επιφάνειας υποστρώματος προς επίτευξη υψηλής συνάφειας (περίπτωση ενεργειακού επιπέδου πλάσματος μικρότερου από 20 eV) .....	278
6.2.6.2	Βελτίωση της φθοράς επικαλυμμένων εργαλείων μέσω κατάλληλης προετοιμασίας της επιφάνειας υποστρώματος προς επίτευξη υψηλής συνάφειας (περίπτωση ενεργειακού επιπέδου πλάσματος μεγαλύτερου από 20 eV (HPPMS)) .....	282
6.2.6.3	Βελτίωση της φθοράς εργαλείων με CVD αδαμαντοεπικαλύψεις μέσω κατάλληλης προετοιμασίας της επιφάνειας του υποστρώματος για την επίτευξη υψηλής συνάφειας .....	288
6.2.7	Φθορά επικαλύψεων λόγω συναφειακών μικροσυγκολλήσεων .....	291
6.3	Επίδραση διαφόρων παραμέτρων των κατεργασιών κοπής επί της φθοράς των επικαλύψεων .....	292
6.3.1	Επίδραση της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής επί της φθοράς επικαλυμμένων εργαλείων .....	292
6.3.2	Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας του εργαλείου και των κατεργασιών μορφοποίησης της στη φθορά των επικαλυμμένων εργαλείων .....	296
6.3.3	Επίδραση διαδικασιών επαναχρησιμοποίησης, επικαλυμμένων εργαλείων από σκληρομέταλλο, στη συμπεριφορά της φθοράς τους ...	300



## Κεφάλαιο 7

303

### Υλικά και επικαλύψεις κοπτικών εργαλείων προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης

7.1	Υλικά κοπτικών εργαλείων από χάλυβα .....	311
7.1.1	Ψυχροί εργαλειοχάλυβες .....	311
7.1.2	Ταχυχάλυβες .....	312
7.2	Σκληρομέταλλα .....	322
7.3	Σκληρομέταλλα τύπου Cermets .....	331
7.4	Κεραμικά υλικά .....	333
7.5	Κυβικά βοριονιτρίδια (CBN) .....	339
7.6	Διαμάντι ως υλικό κοπτικών εργαλείων .....	343
7.6.1	Μονοκρυσταλλικά διαμάντια (DM) .....	343
7.6.2	Πολυκρυσταλλικά διαμάντια (DP) .....	344
7.7	Επικαλύψεις κοπτικών εργαλείων .....	347
7.7.1	PVD-επικαλύψεις .....	349
7.7.1.1	Μέθοδοι παραγωγής .....	349
7.7.1.2	Τυπικές εγκαταστάσεις PVD επικαλύψεων με βομβαρδι- σμό στόχων .....	359
7.7.1.3	Επιδράσεις επί της φθοράς επικαλυμμένων εργαλείων με- ρικών μη σταθερών ιδιοτήτων των επικαλύψεων, λόγω ιδι- αιτεροτήτων της διαδικασίας εναπόθεσης .....	367
7.7.1.4	Βελτιώσεις ιδιοτήτων επικαλύψεων μέσω μικροκοκκοβο- λών .....	370
7.7.2	CVD-επικαλύψεις .....	375
7.7.3	CVD Αδαμαντοεπικαλύψεις .....	377

## Κεφάλαιο 8

383

### Κατεργαστικότητα υλικών κατά την κοπή με εργαλεία προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης. Συνεισφορά του ψυκτικού-λιπαντικού μέσου

8.1	Κατεργαστικότητα σιδηρούχων υλικών, χαλύβων και χυτοσιδήρων .....	387
8.1.1	Επίδραση της θερμικής κατεργασίας χαλύβων επί της κατεργασι- μότητας .....	392



8.1.1.1	Επίδραση επί της κατεργαστικότητας, της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης και της ταχύτητας συνεχούς απόψυξης, κατά ανοπτήσεις επηρεασμού μεγέθους των κόκκων .....	393
8.1.1.2	Επίδραση επί της κατεργαστικότητας, του χρόνου και της θερμοκρασίας επαναφοράς, μαρτενσιτικά βαμμένων χα- λύβων .....	399
8.1.1.3	Επίδραση επί της κατεργαστικότητας, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας απόψυξης, κατά ισοθερμοκρασιακή, ή συνεχή απόψυξη αντίστοιχα .....	402
8.1.1.4	Επίδραση του μεγέθους χυτευμένων τεμαχίων, και αυτών που υπέστησαν συνεχή απόψυξη, ή προκατεργασίες με παραμόρφωση υλικού, επί της κατεργαστικότητας .....	408
8.1.2	Κατεργαστικότητα σκληρυμένων χαλύβων .....	410
8.1.3	Αυτόματοι χάλυβες, αυξημένης κατεργαστικότητας, μέσω προσθή- κης μικροπροσμίξεων .....	414
8.1.4	Κατεργαστικότητα ανοξειδίων χαλύβων .....	416
8.1.5	Κατεργαστικότητα των χυτοσιδήρων .....	422
8.1.5.1	Λευκοί χυτοσίδηροι .....	423
8.1.5.2	Φαιοί χυτοσίδηροι .....	424
8.1.6	Επίδραση μικροπροσμίξεων, που χρησιμοποιούνται για την απο- ξείδωση τήγματος χάλυβα, επί της κατεργαστικότητάς του κατά την κοπή .....	426
8.1.7	Επίδραση των συνθηκών κατεργασίας επί της κατεργαστικότητας των χαλύβων .....	428
8.2	Κατεργαστικότητα κραμάτων αλουμινίου Al, μαγνησίου Mg και χαλκού Cu κατά την κοπή .....	431
8.2.1	Κράματα αλουμινίου .....	432
8.2.2	Κράματα μαγνησίου .....	440
8.2.3	Κράματα χαλκού .....	442
8.3	Κατεργαστικότητα κραμάτων τιτανίου και νικελίου .....	443
8.3.1	Κράματα τιτανίου .....	445
8.3.2	Κράματα νικελίου .....	457
8.4	Κατεργαστικότητα γραφίτη .....	465
8.5	Κατεργαστικότητα συνθέτων υλικών .....	465
8.6	Επίδραση ψυκτικού-λιπαντικού στην κατεργαστικότητα κατά την κοπή .....	467
8.6.1	Ψυκτικά-λιπαντικά υγρά .....	467
8.6.2	Επίδραση των ψυκτικών-λιπαντικών στην κατεργαστικότητα κα- τά την κοπή .....	470
8.6.3	Επίδραση της ποσότητας και του τρόπου προσαγωγής του ψυκτι- κού-λιπαντικού μέσου επί της κατεργαστικότητας .....	473



**Μαθηματική περιγραφή της διάρκειας χρησιμοποίησης κοπτικών εργαλείων προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης.  
Βελτιστοποίηση και επιτήρηση συνθηκών κατεργασίας**

9.1	Αναλυτική περιγραφή της διάρκειας χρησιμοποίησης κοπτικού εργαλείου και της χρονικής μεταβολής της φθοράς .....	483
9.1.1	Μαθηματική περιγραφή της διάρκειας χρησιμοποίησης του κοπτικού εργαλείου .....	484
9.1.2	Μαθηματική περιγραφή της χρονικής μεταβολής της φθοράς επιφανείας ελευθερίας .....	495
9.2	Αναλυτική περιγραφή του κόστους των κατεργασιών συναρτήσει του χρόνου παραγωγής ανά μονάδα παραγωγής και εργαλειομηχανή .....	499
9.2.1	Μαθηματική διατύπωση του χρόνου κατεργασίας .....	499
9.2.2	Μαθηματική διατύπωση του κόστους κατεργασίας .....	501
9.3	Βελτιστοποίηση των κυρίων συνθηκών κατεργασίας κοπής .....	504
9.3.1	Βελτιστοποίηση της ταχύτητας κοπής .....	504
9.3.1.1	Βελτιστοποίηση της ταχύτητας κοπής με κριτήριο το ελάχιστο κόστος κατεργασίας .....	504
9.3.1.2	Βελτιστοποίηση της ταχύτητας κοπής με κριτήριο τον ελάχιστο χρόνο κατεργασίας .....	507
9.3.2	Βελτιστοποίηση της πρόωσης .....	508
9.3.3	Βελτιστοποίηση του βάθους κοπής .....	510
9.3.4	Περιορισμοί των συνθηκών κατεργασίας κατά τη βελτιστοποίησή τους .....	511
9.3.5	Παραδείγματα βελτιστοποίησης συνθηκών κατεργασίας .....	514
9.4	Επιτήρηση συνθηκών κατεργασίας .....	516

**Χαρακτηριστικές γεωμετρίες εργαλείων  
προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης**

10.1	Συμπαγή εργαλεία .....	523
10.2	Εργαλεία με ένθετα πλακίδια .....	525
10.2.1	Εργαλεία με επικολλημένα ένθετα πλακίδια .....	525
10.2.2	Εργαλεία με πρόσδεση ενθέτων κοπτικών πλακιδίων .....	527
10.3	Τυποποιήσεις ενθέτων κοπτικών πλακιδίων .....	533



**Μορφοποιήσεις οδοντώσεων:****Αρχική κατεργασία, αποπεράτωση και μετροτεχνικός έλεγχος**

11.1 Κατεργασίες με αφαίρεση υλικού για την αρχική μορφοποίηση κυλινδρικών οδοντώσεων εξελιγμένης .....	547
11.1.1 Φραιζάρισμα με κύλιση .....	549
11.1.1.1 Στερεά γεωμετρία εργαλείου, δομή εργαλειομηχανής .....	550
11.1.1.2 Κατασκευαστική και ενεργός κοπτική γεωμετρία των οδόντων του εργαλείου, τυπικές διαμορφώσεις και διαδικασίες επαναχρησιμοποίησής του .....	557
11.1.1.3 Στερεά γεωμετρία αποβλίττων και μαθηματική περιγραφή τους .....	565
11.1.1.4 Μηχανισμοί φθοράς επί ακαλύπτων και επικαλυμμένων εργαλείων κατά το φραιζάρισμα με κύλιση .....	578
11.1.1.5 Πειραματική-αναλυτική περιγραφή της εξέλιξης της φθοράς στους κοπτικούς οδόντες φραιζας με κύλιση .....	592
11.1.1.6 Μαθηματικός-πειραματικός προσδιορισμός των συνιστωσών της δύναμης κοπής και χαρακτηριστικά μεγέθη επηρεασμού τους .....	603
11.1.2 Πλάνιση με κύλιση, με οδοντωτό κοπτικό τροχό .....	617
11.1.2.1 Κινηματική της κοπής, γεωμετρία του εργαλείου, δομή εργαλειομηχανής και τυπικά παραδείγματα τεμαχίων .....	618
11.1.2.2 Αποφυγή σύγκρουσης του κατεργαζομένου τροχού με το εργαλείο κατά τη παλινδρόμηση του τελευταίου .....	625
11.1.2.3 Προσδιορισμός της απαραμόρφωτης γεωμετρίας αποβλίττων και επηρεασμός της μέσω των δεδομένων της οδόντωσης του εργαλείου και του τεμαχίου .....	633
11.1.2.4 Παρεμπόδιση της ροής των αποβλίττων με χαρακτηριστικές γεωμετρίες διατομών .....	638
11.1.2.5 Μηχανισμοί φθοράς συναρτήσει της γεωμετρίας των αποβλίττων και του εργαλείου .....	642
11.1.2.6 Συνιστώσες της δύναμης κοπής και χαρακτηριστικά μεγέθη επηρεασμού τους στη πλάνιση εξωτερικών και εσωτερικών οδοντώσεων .....	647
11.1.3 Άλλες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού για την αρχική μορφοποίηση οδοντωτών τροχών .....	650
11.2 Κατεργασίες με αφαίρεση υλικού για την αποπεράτωση κυλινδρικών οδοντώσεων εξελιγμένης .....	656
11.2.1 Κατεργασίες αποπεράτωσης πριν τη θερμική κατεργασία .....	659



11.2.1.1	Ισοπέδωση επιφανειακών τραχυτήτων παρειών οδοντώσεων	660
11.2.1.2	Απόξεση με κύλιση οδοντοπαρειών	662
11.2.2	Κατεργασίες αποπεράτωσης μετά τη θερμική κατεργασία	666
11.2.2.1	Αποφλοιωτικό φραιζάρισμα με κύλιση	666
11.2.2.2	Λείανση οδοντώσεων με δισκοειδείς τροχούς μορφής	669
11.2.2.3	Λείανση οδοντώσεων με κοχλιοειδή εργαλεία συνεχούς κύλισης	672
11.2.2.4	Λείανση οδοντώσεων με δισκοειδείς τροχούς κύλισης και διαίρεση	676
11.3	Μετροτεχνικός έλεγχος της γεωμετρίας οδοντώσεων	689
11.3.1	Σφάλματα παρειών οδόντων και έλεγχος της τοπομορφίας τους	691
11.3.2	Διακρίβωση σφαλμάτων αποστάσεων μεταξύ οδόντων	696
11.3.3	Σφάλματα απόστασης μεταξύ αξόνων συνεργαζομένων οδοντώσεων	698
11.3.4	Ταξινόμηση σφαλμάτων οδοντώσεων σε βαθμίδες ποιότητας σύμφωνα με διαφόρους διεθνείς κανονισμούς	699
<b>Βιβλιογραφία</b>		705
1.	Περιοδικά και Συνέδρια	705
2.	Βιβλία	721
3.	Διατριβές	724
4.	Κανονισμοί	729



# Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

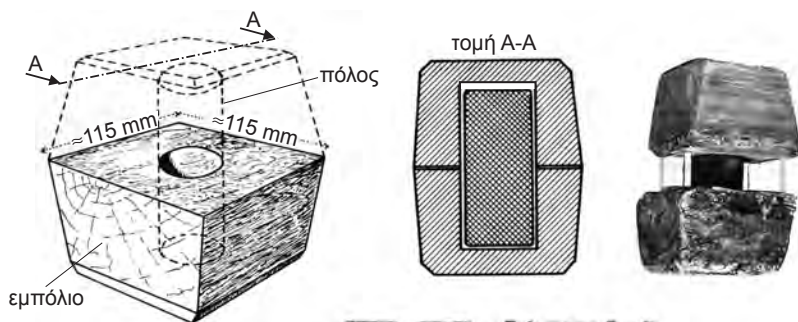


Οι δυνατότητες μορφοποίησης εργαλείων, όπλων, χρηστικών αντικειμένων κ.ά., συνέβαλαν αποφασιστικά στην επιβίωση και εξέλιξη του πρώιμου ανθρώπου. Τέτοιες δυνατότητες παρείχαν σπασμένες πέτρες, με κατάλληλο σχήμα, που τις χρησιμοποιούσαν οι πρωτόγονοι, προκειμένου να δώσουν σε ένα κομμάτι υλικού την επιθυμητή μορφή, μέσω τεμαχισμού, πριονίσματος, λιμαρίσματος κλπ. Κοινό χαρακτηριστικό όλων αυτών των διαδικασιών ήταν η αφαίρεση υλικού από ένα τεμάχιο, με τη βοήθεια μιας αιχμηρής κόψης. Από όταν ο άνθρωπος άρχισε να χρησιμοποιεί αντί λίθους, μέταλλα και συγκεκριμένα κράματα χαλκού και στη συνέχεια σιδήρου, η εξέλιξη των εργαλείων μορφοποίησης ήταν ραγδαία. Η χρησιμοποίηση των προηγούμενων υλικών χαρακτηρίζει και σχετικές ιστορικές περιόδους της ανθρωπότητας.

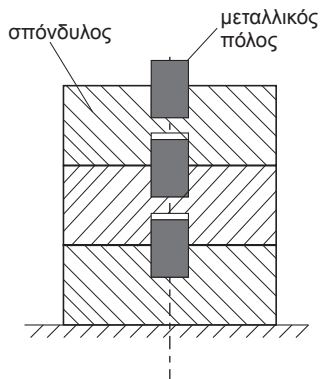
Η μετάβαση από τις χειρονακτικές μορφοποιήσεις, στις μηχανουργικές, αποτέλεσε ένα σημαντικό βήμα για την μείωση του χρόνου κατεργασίας και την βελτίωση της διαστατικής ακρίβειας. Η μορφοποίηση ξυλίνων αντικειμένων μέσω τορναρίσματος, ήταν γνωστή από την εποχή του Ομήρου. Στην Ιλιάδα αναφέρεται για αρμονικό σχήμα ανθρωπίνων ποδιών, ο χαρακτηρισμός “τορνευτά”. Μια τυπική εφαρμογή τορναρίσματος, ήταν και αυτή της μορφοποίησης ξυλίνων κυλινδρικών πόλων των εμπολίων σπονδύλων κίωνων. Όπως φαίνεται στο **σχήμα 1.1**, ο κυλινδρικός πόλος προσαρμοζόταν στην αντίστοιχη κυλινδρική οπή του επίσης ξυλίνου εμπολίου, το οποίο ετοποθετείτο σε σχετική διαμόρφωση στο κέντρο του μαρμαρίνου σπονδύλου. Ο πόλος χρησίμευε ως άξονας περιστροφής του εκάστοτε άνω σπονδύλου κατά τις διαδοχικές παλινδρομικές περιστροφές του επι του κάτω σπονδύλου. Έτσι, λειαινόνταν οι εξωτερικές δακτυλιοειδείς εφαπτόμενες επιφάνειες αμοτέρων των σπονδύλων, δημιουργώντας συναρμογής υψηλής ποιότητας μεταξύ των επιφανειών αυτών (βλέπε σχήμα). Η άριστη επαφή μεταξύ των δακτυλιοειδών επιφανειών των σπονδύλων, εμπόδιζε την εισχώρηση αέρα προς την κεντρική περιοχή του εμπολίου και έτσι και τη σήψη του. Πολλά ξύλινα εμπόλια με τους πόλους τους ανευρέθησαν άθικτα κατά την αποσυναρμολόγηση σπονδύλων, προκειμένου να διεξαχθούν εργασίες αναστήλωσης αρχαίων ναών, όπως του Παρθενώνα [ΟΡΑ 77].

Η χρησιμοποίηση τόνων για κατασκευές μεταλλικών αντικειμένων, όπως κυλινδρικών πόλων από μπρούντζο, τεκμηριώνεται μέσω της εικονιζομένης στο **σχήμα 1.2** επιγραφής του 4<sup>ου</sup> αιώνα π.Χ., που ανακαλύφθηκε κατά ανασκαφές στην Ελευσίνα [ΒΑΡ 96]. Στην επιγραφή, δίδονται οδηγίες για την κατασκευή των μεταλλικών κυλινδρικών πόλων με μορφοποίηση, όπως αυτή του τορναρίσματος αντικειμένων από ξύλο. Επειδή όμως το τορναρίσμα μεταλλικών αντικειμένων, προϋποθέτει την ύπαρξη σκληρών εργαλείων, δυναμένων να αντιστατήσουν τα δημιουργούμενα φορτία κατά την κοπή, καθώς και στιβαρές μη-





**Σχήμα 1.1:**  
Πόλος και  
εμπόλιο σπον-  
δύλων κίωνων.



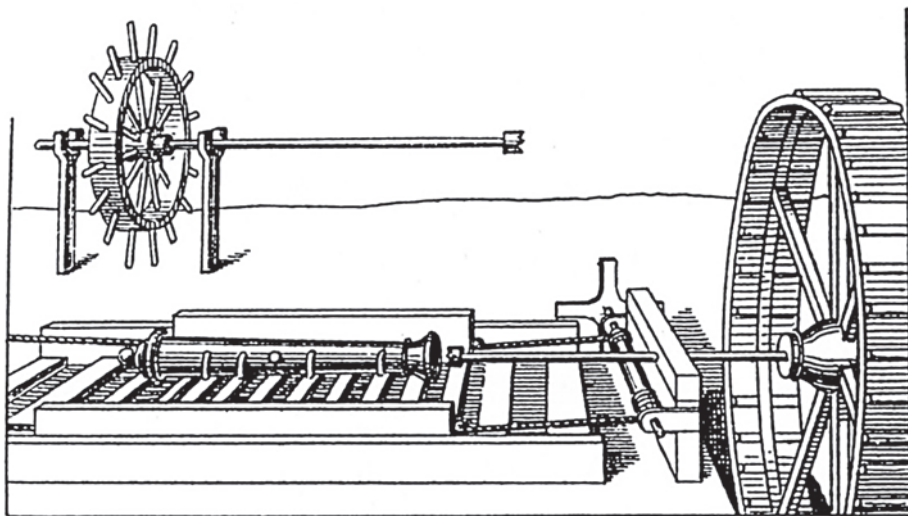
**Σχήμα 1.2:** Αρχαία επιγρα-  
φή από την Ελευσίνα (~ 4ος  
αιώνας π.Χ.), στην οποία γί-  
νεται διάκριση μεταξύ τερνα-  
ρίσματος μεταλλικών και ξύ-  
λινων πόλων.





χανικές διατάξεις, φαίνεται ότι οι σχετικές μηχανουργικές τεχνικές, ήταν γνωστές ήδη από την περίοδο αυτή.

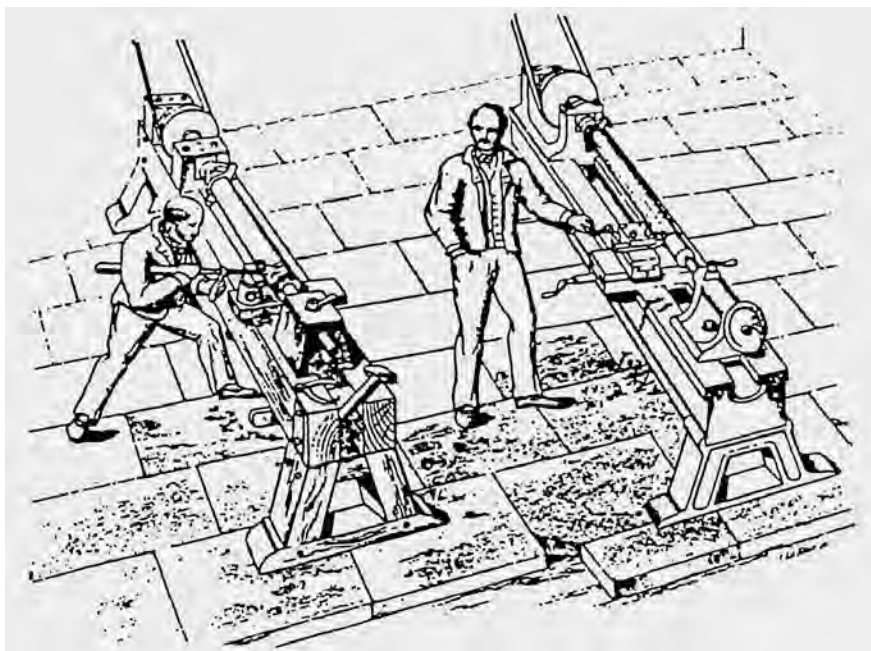
Η εφαρμογή και άλλων μηχανουργικών μορφοποιήσεων κατά την αρχαιότητα και μέχρι και τον 17<sup>ο</sup> αιώνα, όπως της διάτρησης, του πριονισμού κ.ά, περιγράφονται σε διάφορα κείμενα. Ενδεικτική είναι η αναπαράσταση διαδικασίας βαθείας διάτρησης πυροβλητικών σωλήνων κανονιών, προερχόμενη από το έτος 1540, που φαίνεται στο **σχήμα 1.3** [SPU 91]. Η διάτρηση αποσκοπούσε στην διεύρυνση της οπής του χυτευμένου σωλήνα, για την επίτευξη ανοχών διαμέτρου και κυλινδρικότητας, απαραίτητων για τη χρησιμοποίηση της ίδιας διαμέτρου σφαιρικής οβίδας, σε όλα τα κανόνια ενός στρατεύματος. Η περιστροφή του εργαλείου λάμβανε χώρα χειροκίνητα, μέσω του εικονιζόμενου μεγάλου τροχού, η δε πρόωση με έλξη του ολισθαίνοντος φορέιου του τεμαχίου, επί κατάλληλα διαμορφωμένου επιπέδου, μέσω σχοινιών, που τυλιγόντουσαν σε χειροκίνητα περιστρεφόμενο κύλινδρο.



**Σχήμα 1.3:** Μηχανική διάταξη εργαλειομηχανής βαθείας διάτρησης πυροβλητικών σωλήνων (Vannucio Biringuccio, 1540).

Η βιομηχανική επανάσταση του 18<sup>ου</sup> αιώνα και η χρησιμοποίηση των ατμομηχανών, για την κίνηση ατράκτων εργαλειομηχανών μέσω ιμάντων, αποτέλεσε σταθμό για την εξέλιξη των μηχανουργικών μορφοποιήσεων και των σχετικών μηχανών. Σύνθετοι μηχανισμοί για τη στήριξη και τη μηχανική καθοδήγηση των εργαλείων, άρχισαν να αναπτύσσονται ήδη από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα. Χαρακτηριστική είναι η απεικόνιση του έτους 1841, που παρουσιάζεται στο **σχήμα 1.4** και προβάλλει τα πλεονεκτήματα, που προκύπτουν για τον χειριστή τόνου



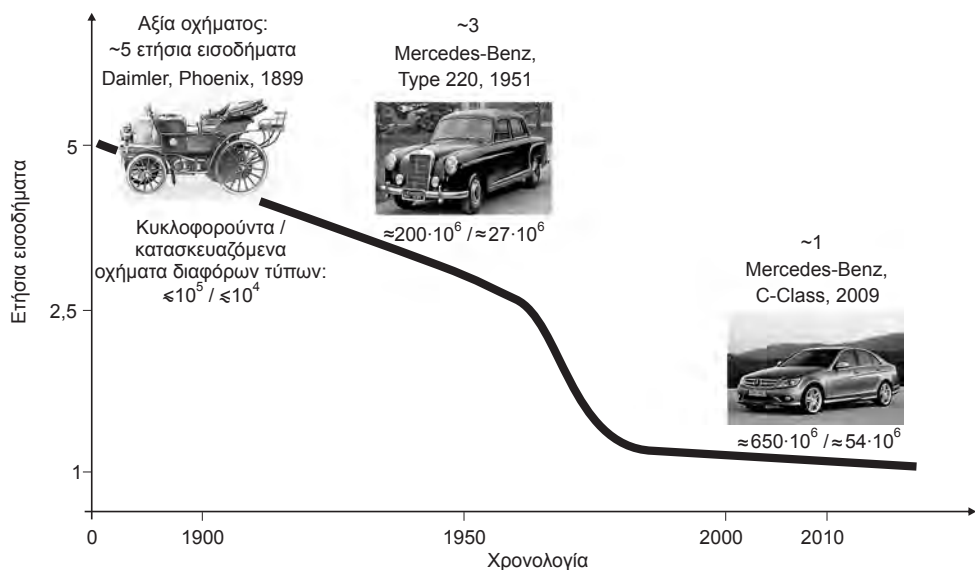


**Σχήμα 1.4:** Χειροκίνητη και μηχανική καθοδήγηση εργαλείου τόννου (Nasmyth, 1841).

με αυτοκινούμενο εργαλειοφορείο, μέσω μηχανισμού ατέρμονα κοχλία, σε σχέση με την χειρονακτική καθοδήγηση του εργαλείου [SPU 91]. Στο σχήμα είναι εμφανής η ιμαντοκίνηση της ατράκτου περιστροφής του τεμαχίου, με την οποία ήταν συμπλεγμένη και η περιστροφή του ατέρμονα κοχλία, για την πρόωση του εργαλειοφορείου. Η χρησιμοποίηση των ηλεκτρικών κινητήρων, η συνεχής εξέλιξη των εργαλείων και των μηχανών και πρόσφατα της ψηφιακής καθοδήγησης, κατέστησαν δυνατή την μορφοποίηση πολυπλόκου γεωμετρίας επιφανειών τεμαχίων, με ανοχές διαστάσεων μερικών nm.

Διαχρονικά, οι μηχανουργικές μορφοποιήσεις αποτέλεσαν τη βάση για την ανάπτυξη της οικονομίας. Αυτό γίνεται αντιληπτό, εάν ληφθεί υπόψη ο όγκος της παραγωγής χαρακτηριστικών βιομηχανικών κλάδων, όπως της αυτοκινητοβιομηχανίας, τυπικής δραστηριότητας μαζικής παραγωγής εξαρτημάτων μέσω μηχανουργικών μορφοποιήσεων, αντιπροσωπευτικά μεγέθη της οποίας παρατίθενται στο **σχήμα 1.5**. Το 1900 κυκλοφορούσαν παγκοσμίως, κατ' εκτίμηση, λιγότερα από εκατό χιλιάδες οχήματα, ενώ σήμερα, περισσότερα από 650 εκατομμύρια. Αντίστοιχα, ο αριθμός των κατασκευαζομένων αυτοκινήτων το 1900 ανερχόταν σε περίπου δέκα χιλιάδες ετησίως και σήμερα σε περισσότερα από 54 εκατομμύρια. Μέσω της συνεχούς εξέλιξης των τεχνικών των μορφοποιήσεων, κατέστη δυνατό, ένα αυτοκίνητο σήμερα (2015) να αξίζει ένα ετήσιο εισόδημα,



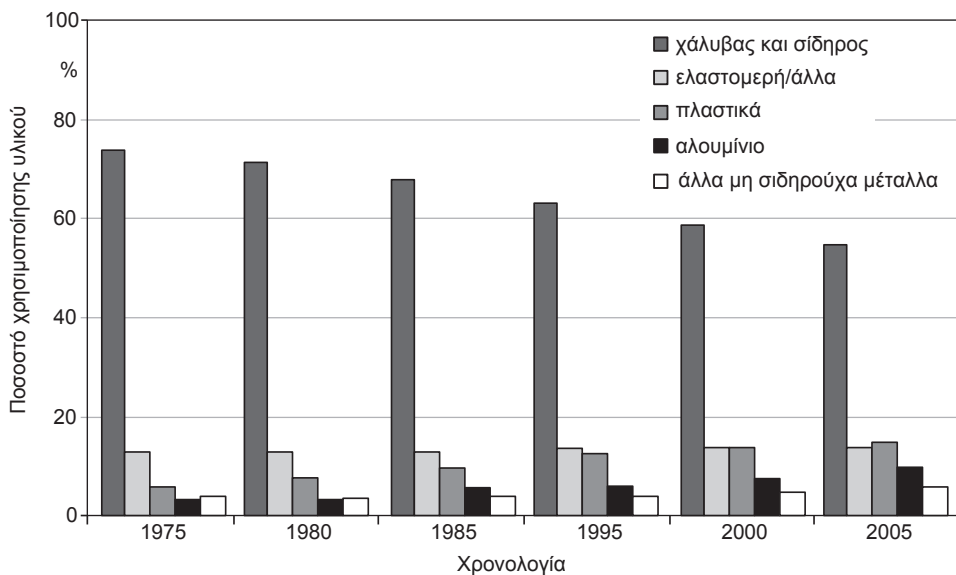


**Σχήμα 1.5:** Ενδεικτική αξία και πλήθος κυκλοφορούντων και κατασκευαζόμενων οχημάτων.

ενώ το αντίστοιχο αυτοκίνητο το 1900, κόστιζε περίπου πέντε. Στο αποτέλεσμα αυτό συνέβαλε και η υποστήριξη των παραγωγικών διαδικασιών με πλέον εξειδικευμένα εργαλεία, διάφορα μηχανήματα και μεταφορικές διατάξεις, υψηλού μεν κόστους, που οδηγούν όμως σε οικονομικότερο αποτέλεσμα ανά τεμάχιο, λόγω του μαζικού χαρακτήρα της παραγωγής και της οργάνωσής της σε γραμμές κατεργασιών. Ο αριθμός των αυτοκινήτων και οι εξοπλισμοί τους, παραγό-ντουσαν μέχρι την αρχή της δεκαετίας του 1970, βάσει ερευνών της αγοράς και όχι με βάση τις άμεσες επιθυμίες του πελάτη κατά την παραγγελία. Με την εισαγωγή της πληροφορικής, μεθόδων εφοδιαστικών αλυσίδων κτλ., η παραγω-γή έχει επιμεριστεί σε μικρότερες παρτίδες, το κόστος όμως παραγωγής ανά τε-μάχιο έχει περιορισθεί δραστικά. Αυτό κατορθώθηκε, λόγω της δυνατότητας μορφοποίησης τεμαχίων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, στην ίδια σειρά πα-ραγωγής, μέσω εφαρμογής συγχρόνων μεθόδων επιτήρησης και αυτόματης κα-θοδήγησης όλων των σχετικών διαδικασιών. Επίσης, στην επίτευξη του στόχου αυτού συνέβαλε και η κατασκευή συνθέτων εργαλείων και μηχανών, που επι-τρέπουν τη διεξαγωγή περισσότερων μορφοποιήσεων σε μια μόνο εργαλειομη-χανή, ενώ προηγουμένως ήταν απαραίτητες πολλές.

Σήμερα, το κυρίως χρησιμοποιούμενο υλικό στην αυτοκινητοβιομηχανία και γενικά στη βιομηχανία μέσων μεταφοράς, εξακολουθεί να είναι ο σίδηρος, ενώ στις αεροδιαστημικές κατασκευές είναι τα κράματα του τιτανίου, αλου-μινίου, νικελίου, καθώς και τα σύνθετα υλικά. Στο **σχήμα 1.6** φαίνονται τα κυρίως κατεργαζόμενα υλικά στην αυτοκινητοβιομηχανία. Το αλουμίνιο, τα





**Σχήμα 1.6:** Χρησιμοποιούμενα υλικά στην αυτοκινητοβιομηχανία (κατά Diamler AG).

πλαστικά και άλλα μη σιδηρούχα μέταλλα, εκτοπίζουν συνεχώς τα σιδηρούχα κράματα και δημιουργούν ανάγκες επιστημονικής έρευνας, αλλά και εξέλιξης νέων μεθόδων μορφοποίησης.

Μια συστηματική ταξινόμηση των τεχνικών των μορφοποιήσεων, σύμφωνα με το Γερμανικό κανονισμό DIN 8589, εκτίθεται στο **σχήμα 1.7**. Στο σχήμα επεξηγείται εκτενέστερα η περιοχή (3), των μηχανουργικών κατεργασιών με αφαίρεση υλικού από το εκάστοτε τεμάχιο, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή γεωμετρία του. Μεγάλη σπουδαιότητα έχουν οι υποπεριοχές (3.1) και (3.2), της κοπής με προκαθορισμένη, ή μη γεωμετρία κόψης αντίστοιχα. Κατά τις διαδικασίες αυτές, λαμβάνει χώρα λύση της συνέχειας της ύλης του μορφοποιούμενου αντικειμένου, μετά έντονη παραμόρφωσή της, στην περιοχή της επαφής του εργαλείου με το κομμάτι. Επίσης ιδιαίτερη πρακτική σημασία έχει και η υποπεριοχή (3.3) των μορφοποιήσεων με αποχωρισμό του υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, μέσω προσαγωγής θερμικής ενέργειας, ή χημικής, ή ηλεκτροχημικής διάβρωσης. Κατά την τοπική προσαγωγή θερμικής ενέργειας, μικρές ποσότητες ύλης αποχωρίζονται από το κατεργαζόμενο τεμάχιο μέσω υγροποίησης, ή εξαέρωσης του υλικού. Όλες αυτές οι μεθοδολογίες εξελίχθηκαν, για να είναι δυνατή με όσο το δυνατό μικρότερο κόστος κατεργασίας, η μορφοποίηση τεμαχίων απλής, ή πολυπλόκου γεωμετρίας με υψηλές προδιαγραφές διαστατικής ακρίβειας, καθώς και άλλες επιφανειακές ιδιότητες. Η ταξινόμηση των κατεργασιών διεξάγεται σε περισσότερα από τα τρία οριζόντια επίπεδα, που εμφανίζονται στο σχήμα, όπως διεξοδικά περιγράφεται στους αναγραφόμενους βιομηχανικούς κανονισμούς [BOU 12].



δα αυτά, διευκολύνει τις μετροτεχνικές διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου τους. Οι ενεργές τιμές των κοπτικών γωνιών, μπορούν να προσεγγισθούν γραφικά, με θεώρηση δύο γειτονικών θέσεων του εργαλείου, όπως διακρίνεται στο κάτω μέρος του σχήματος [DIN 6581]. Στο σχήμα αυτό, είναι καταχωρημένες οι προκύπτουσες ενεργές τιμές των κοπτικών γωνιών, μέσω της προηγούμενης αναφερθείσας θεώρησης, σύμφωνα με τον ίδιο κανονισμό DIN 6581. Σε κατεργασίες σύνθετης κινηματικής, ο προσδιορισμός των ενεργών γωνιών διεξάγεται μέσω αναλυτικών ή αριθμητικών υπολογισμών, η διεξαγωγή των οποίων είναι αναγκαία, για την διερεύνηση δυσεξηγήτων αστοχιών του εργαλείου, σχετιζόμενων με φθορές και θραύσεις των κοπτικών ακμών.

## 3.2 Μηχανισμοί δημιουργίας του αποβλίττου κατά την κοπή

### 3.2.1 Παραμορφώσεις και κρυσταλλικοί μετασχηματισμοί του υλικού, στην περιοχή σχηματισμού του αποβλίττου

Κατά την κοπή, μέσω της διείσδυσης του εργαλείου στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, το υλικό του παραμορφώνεται έντονα και στην περιοχή της κορυφής της κόψης του εργαλείου αρχίζει να ρέει επί της επιφανείας του αποβλίττου. Οι μηχανισμοί αυτοί επεξηγούνται στο **σχήμα 3.8**. Στην φωτογραφία της κρυσταλλοδομής του υλικού πριν την παραμόρφωση του και τη δημιουργία του αποβλίττου, είναι εμφανής η γεωμετρία των κόκκων περλίτη και φερρίτη, στην προκείμενη περίπτωση κοπής χαλυβδίνου τεμαχίου, όπως επίσης και η παραμόρφωσή τους, λόγω πλαστικής διαρροής του υλικού. Η πλαστική διαρροή, λαμβάνει χώρα στην περιοχή, που χαρακτηρίζεται ως “επίπεδο διάτμησης”. Πρόκειται για περιοχή του υλικού, προσεγγιστικά περιγραφόμενη με ένα επίπεδο με γωνία κλίσης  $\Phi$  σε σχέση με την διεύθυνση της ταχύτητας  $v$ , όπου οι ισοδύναμες κατὰ von Mises τάσεις, ξεπερνούν την τιμή της τάσης, που αντιστοιχεί στην οριακή ελαστική παραμόρφωση του υλικού, με συνέπεια την έναρξη της πλαστικής διαρροής του. Η γεωμετρία της παραμόρφωσης του υλικού, γίνεται κατανοητή μέσω της διαφοροποίησης της γεωμετρίας ενός σχήματος αναφοράς, στην προκείμενη περίπτωση του τετραγώνου (1234), που μετά την διέλευσή του από το επίπεδο διάτμησης, λαμβάνει την μορφή του παραλληλόγραμμου (1'2'3'4'). Στο παράδειγμα αυτό, για λόγους ευκολότερης περιγραφής του μηχανισμού παραμόρφωσης του υλικού, οι πλευρές (12) και (34) έχουν επιλεγεί παράλληλες προς το επίπεδο διάτμησης. Οι κορυφές του τετραγώνου 3 και 4, “διέρχονται” πρώτες από το επίπεδο διάτμησης και κινούνται σε τροχιές, παράλληλες προς



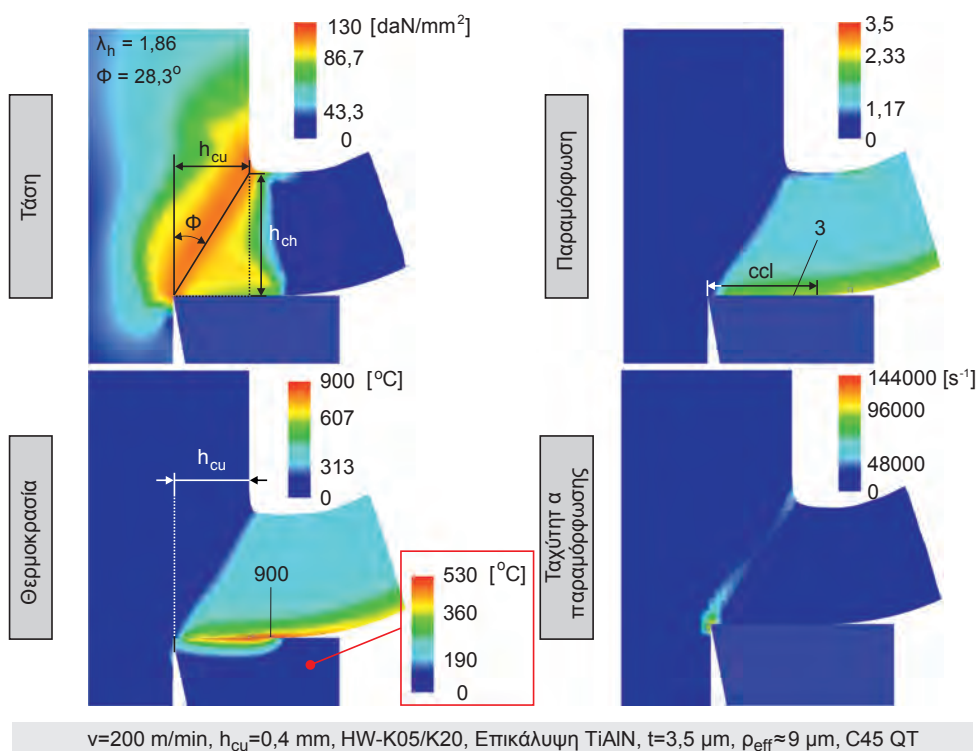




### 3.4 Προσδιορισμός διαφόρων χαρακτηριστικών μεγεθών κατά την κοπή, με τη βοήθεια FEM υπολογισμών

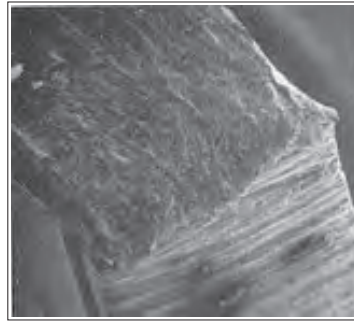
#### 3.4.1 FEM υπολογισμός πεδίων μηχανικών τάσεων, παραμορφώσεων και θερμοκρασιών στην περιοχή δημιουργίας του αποβλίττου

Ο σχηματισμός του “επιπέδου διάτμησης” εντός του πεδίου των δημιουργουμένων ισοδύναμων κατά von Mises τάσεων, κατά την κοπή ενός συγκεκριμένου υλικού κοπής, του χάλυβα C 45, είναι διακριτός στο άνω αριστερά γράφημα του **σχήματος 3.22**. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από τη γωνία κλίσης  $\Phi$  του “επιπέδου διάτμησης” και υπαγορεύει την τιμή του πάχους του αποβλίττου  $h_{ch}$ . Όσο μεγαλώνει η γωνία  $\Phi$ , με οριακή τιμή τις  $45^\circ$  μοίρες, το πάχος του παραμορφωμένου αποβλίττου  $h_{ch}$  προσεγγίζει την αντίστοιχη τιμή του απαραμορφώτου αποβλίττου  $h_{cu}$ , δηλ. περιορίζεται η παραμόρφωση του υλικού κατά τη διέλευσή του από το επίπεδο διάτμησης κατά την δημιουργία του αποβλίττου. Η γεωμετρία και οι θερμομονωτικές ιδιότητες του εργαλείου, οι συνθήκες κατεργασίας και οι μηχανικές

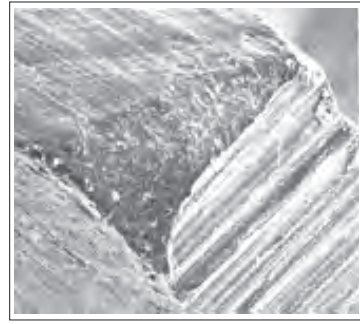


**Σχήμα 3.22:** Αναπτυσσόμενες τάσεις, παραμορφώσεις και θερμοκρασίες στην περιοχή της κοπτικής ακμής κατά το σχηματισμό συνεχούς αποβλίττου.





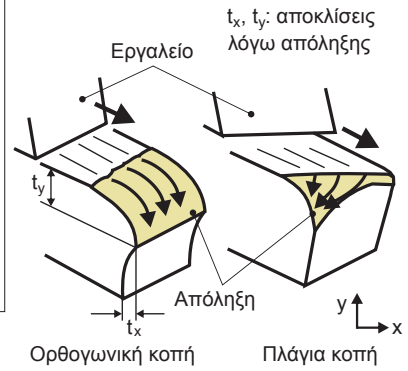
Ορθογωνική κοπή



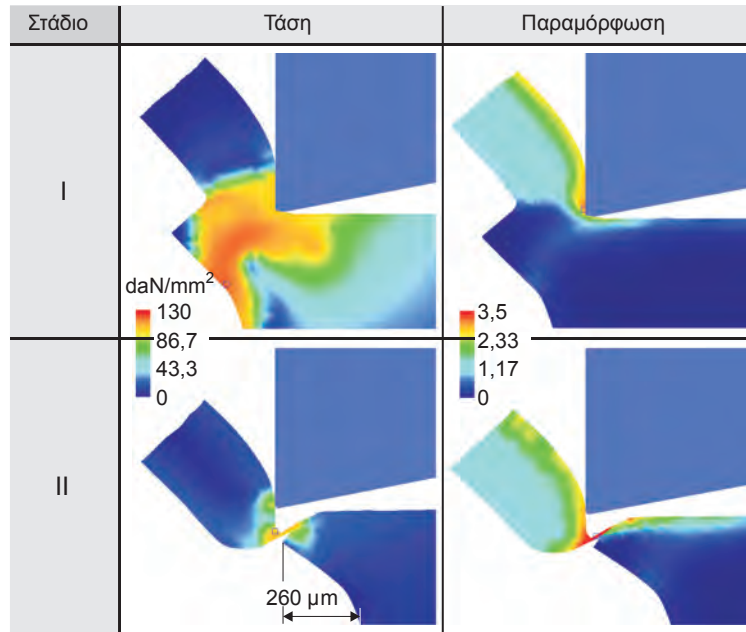
Πλάγια κοπή (βάθος κοπής 50  $\mu\text{m}$ )



Πλάγια κοπή (βάθος κοπής 20  $\mu\text{m}$ )



**Σχήμα 3.58:**  
Τυπικές μορφές απόληξης σε ορθογωνική και πλάγια κοπή.



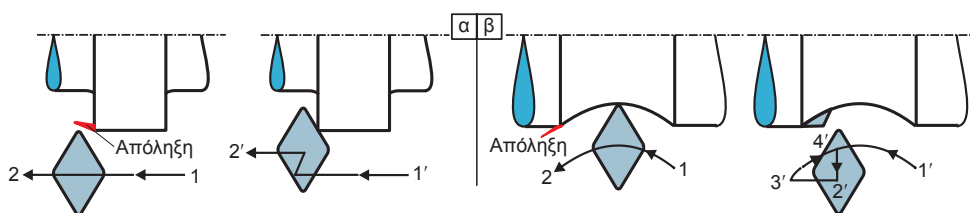
**Σχήμα 3.59:**  
Τάσεις και παραμορφώσεις σε δύο στάδια δημιουργίας της απόληξης.

$v=200 \text{ m/min}$ , HW-K05/K20, Επικάλυψη TiAlN,  $t=3,5 \mu\text{m}$ ,  $\rho_{\text{eff}} \approx 9 \mu\text{m}$ , C 45



επεξηγήθηκε, το υλικό τους είναι υψηλά παραμορφωμένο και άρα με μικρή πρόσθετη φόρτιση, είναι πιθανό να θραυσθεί ψαθυρά και να προκαλέσει σημαντικές βλάβες κατά την λειτουργία των μηχανημάτων, στα οποία τα τεμάχια έχουν ενσωματωθεί.

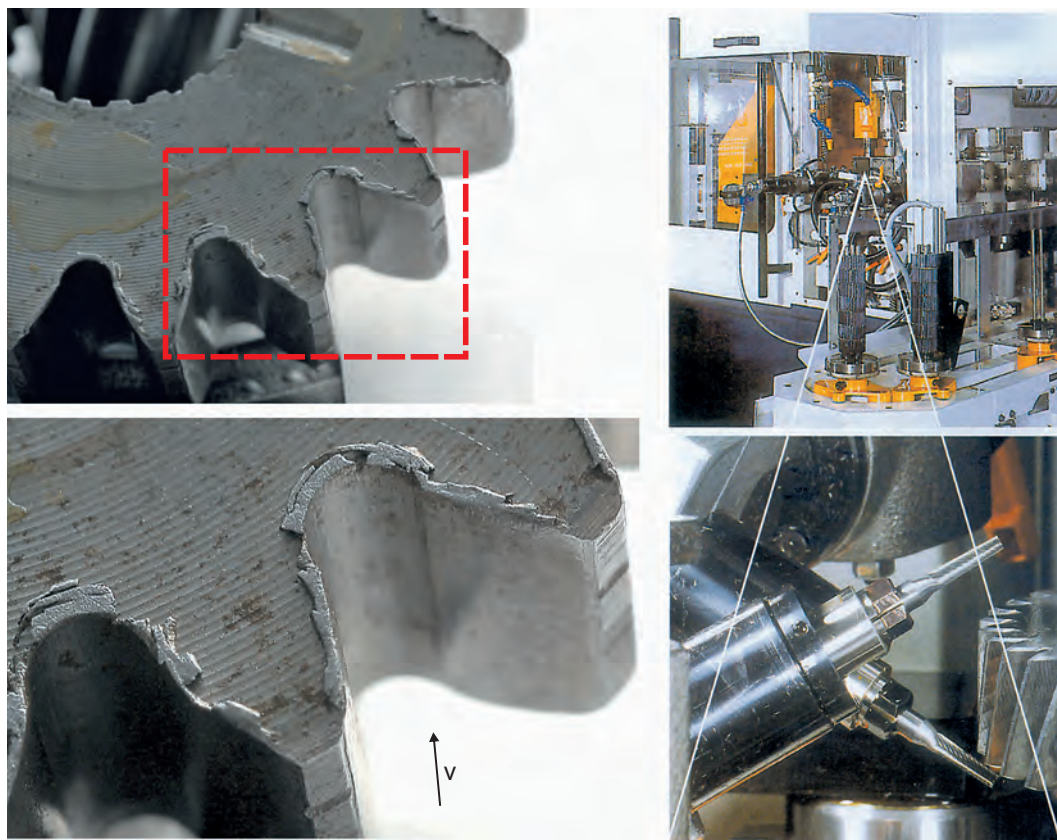
Εξειδικευμένα λογισμικά [DEF 08.1, 08.2, ADV 00] επιτρέπουν τον έλεγχο της πορείας των εργαλείων κατά την κοπή, έτσι ώστε να αποφεύγεται ή να περιορίζεται σημαντικά η δημιουργία των απολήψεων. Στο **σχήμα 3.60** παρουσιάζεται ένα σχετικό παράδειγμα, που αφορά στο ψηφιακά καθοδηγούμενο τρνάρισμα. Η εικονιζόμενη διαδρομή 1-2, στο τμήμα α, τροποποιείται κατάλληλα σαν 1'-2', για να απομακρυνθεί η εικονιζόμενη απόληξη. Επίσης η διαδρομή 1-2, που φαίνεται στο τμήμα β του σχήματος, αλλάζει, λαμβάνοντας τη μορφή 1'-2'-3'-4', έτσι ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία της απόληξης και να απομακρυνθεί το υπολειπόμενο υλικό επί της καμπύλης περιοχής του τεμαχίου, που δεν αφαιρέθηκε, λόγω της τροποποίησης της αρχικής διαδρομής 1-2 του εργαλείου. Οι απολήξεις απομακρύνονται μέσω κατεργασιών κοπής, με ειδικής γεωμετρίας εργαλεία, προσαρμοσμένης στις εκάστοτε μορφολογικές ιδιαιτερότητες των κατεργαζομένων τεμαχίων. Σε περιπτώσεις μαζικής παραγωγής και εάν η γεωμετρία των κομματιών το επιτρέπει, το λόγω της υψηλής παραμόρφωσής του ψαθυρό υλικό της απόληξης θραύεται, μέσω απότομης φόρτισής του εντός ειδικού θαλάμου, από τα αέρια ελεγχόμενης έκρηξης.



**Σχήμα 3.60** Αποφυγή δημιουργίας απόληξης με χρησιμοποίηση ψηφιακά καθοδηγούμενης κοπής.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα απολήξεων εικονίζεται στο **σχήμα 3.61**. Οι απολήξεις που δημιουργήθηκαν κατά το φραιζάρισμα με κύλιση στο πέρασ των παρειών της οδόντωσης, απομακρύνονται μέσω κοπής με τη βοήθεια των ειδικών εργαλείων (κονδυλοειδείς φραιζες), όπως φαίνεται στο δεξιό μέρος του σχήματος. Τα εργαλεία καθοδηγούνται κατάλληλα, έτσι ώστε να κινούνται παράλληλα προς τις ακμές των παρειών, που έχουν γεωμετρία εξελιγμένης.





**Σχήμα 3.61:** Απομάκρυνση απολήξεων από οδοντώσεις μέσω κοπής, με τη βοήθεια κονδυλοειδών φραιζών.

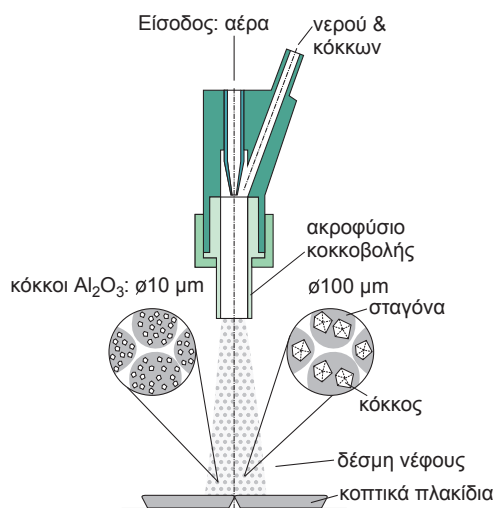


		ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ												Παρά- γραφος
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		XRD	TEM	NI	IT	BC	WLS	IIT	SRC	DiF	OX	TRM	...	
Υλικού	Δομή	✓	✓										✓	
	Εναπομένουσες τάσεις	✓											✓	
	Μηχανικές ιδιότητες			✓									✓	6.1.1
	Σκληρότητα			✓									✓	6.1.2
	Αντοχή κόπωσης				✓								✓	6.1.3
	Αντοχή κόπωσης σε υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης				✓								✓	6.1.4
	Ευθραυστότητα			✓	✓								✓	6.1.5
	...													
Διαστάσεων	Πάχος και κατανομή του					✓	✓							6.1.6
	...													
Λειτουργικές	Τριβή											✓		
	Συνάφεια							✓	✓	✓			✓	6.1.7
	Διάχυση									✓			✓	6.1.8
	Οξειδωση										✓		✓	6.1.8
	...													
XRD: Διάθλαση ακτίνων Χ		TEM: Μικροφωτογραφίες μέσω μεταφοράς ηλεκτρονίων												
NI: Νανοδιείσδυση		BC: Δοκιμασία κρατήρα												
WLS: 3D μετρήσεις μέσω σάρωσης δέσμης λευκού φωτός		IT: Επαναλαμβανόμενη κρούση												
IIT: Πλάγια εναλλαμβανόμενη κρούση		S: Δοκιμή χάραξης												
RC: Σκληρομέτρηση Rockwel C		DiF: Δοκιμή διάχυσης												
OX: Δοκιμή Οξειδωσης		TRM: Μέτρηση τριβής												

**Σχήμα 6.5:** Κύριες μεθοδολογίες ελέγχου ιδιοτήτων υλικού, διαστάσεων και λειτουργικών μεγεθών επικαλύψεων.

Αριστερά στο σχήμα, φαίνεται η παράγραφος στην οποία σχολιάζεται η εκάστοτε μεθοδολογία ελέγχου. Οι έλεγχοι αυτοί έχουν αναπτυχθεί ειδικά για επικαλύψεις. Έλεγχοι γενικής εφαρμογής στην επιστήμη των υλικών όπως XRD, TEM κ.ά. αναφέρονται εκτενώς στη σχετική βιβλιογραφία.





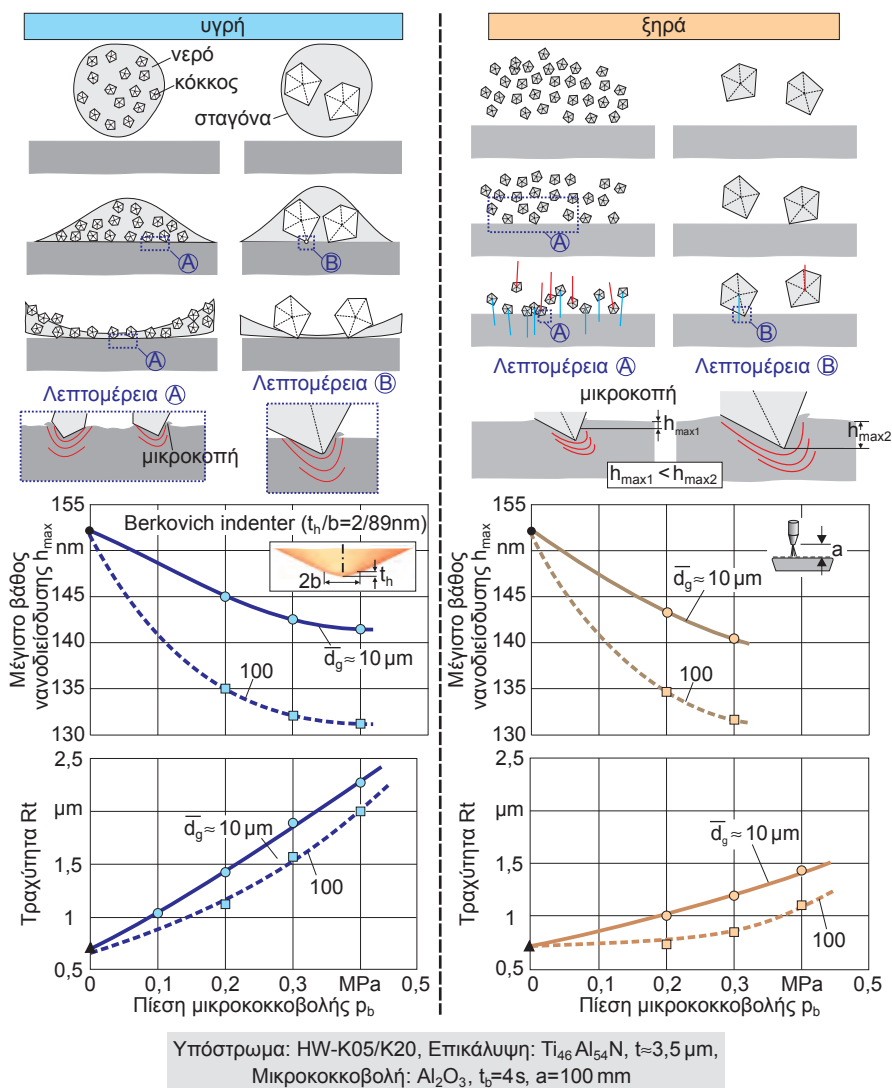
**Σχήμα 7.64:** Τυπική διάταξη ακροφυσίου υγρής μικροκοκκοβολής με μικρού ή μεγάλου μεγέθους κόκκων.

Για την αποφυγή χειροτέρευσης της συμπεριφοράς φθοράς επικαλυμμένων εργαλείων, κατά την εφαρμογή μικροκοκκοβολών σαν τελική κατεργασία επιβελτίωσης της αντοχής της κόψης τους, δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στη βέλτιστη επιλογή καταλλήλων συνθηκών, για την αποφυγή υψηλής ευθραυστότητας και αποκάλυψης του υποστρώματος. Το είδος και το μέγεθος των κόκκων, καθώς και ο τρόπος προσαγωγής τους επί της κοπτικής ακμής συγκαταλέγονται στις ιδιαιτέρως σημαντικές παραμέτρους για την επίτευξη μικρής τραχύτητας με μεγάλη επιφανειακή ενδοτράχυνση. Η ενδοτράχυνση στοχεύει στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων της επικάλυψης. Συγχρόνως όμως συνεκτιμάται και η αύξηση της ευθραυστότητας.

Μία τυπική διάταξη προσαγωγής κόκκων επί των κοπτικών ακμών πλακιδίων μέσω υγρού (νερό) και συγχρόνως συμπιεσμένου αέρα εικονίζεται στο **σχήμα 7.64**. Οι κόκκοι, λόγω εκνέφωσης του νερού μέσω της εκτόνωσης του συμπιεσμένου αέρα, παγιδεύονται εντός σταγόνων. Κάθε σταγόνα, ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων, περιέχει διαφορετικούς αριθμούς κόκκων.

Μετά την πρόσκρουση των σταγόνων επί του κοπτικού πλακιδίου, οι κόκκοι καθοδηγούνται λόγω της ροής του νερού, σχεδόν παράλληλα προς την επιφάνεια (βλέπε **σχήμα 7.65α**), την οποία παραμορφώνουν αλλά συγχρόνως αφαιρούν και υλικό από αυτή [BOU 11.1, 11.2, 11.3]. Στην περίπτωση των μεγάλων κόκκων, η προκαλούμενη παραμόρφωση της επιφάνειας, λόγω της μεγαλύτερης κινηματικής ενέργειας των κόκκων, είναι πιο έντονη ανά προσπίπτουσα σταγόνα και η αύξηση της τραχύτητας μικρότερη, λόγω του συγκριτι-



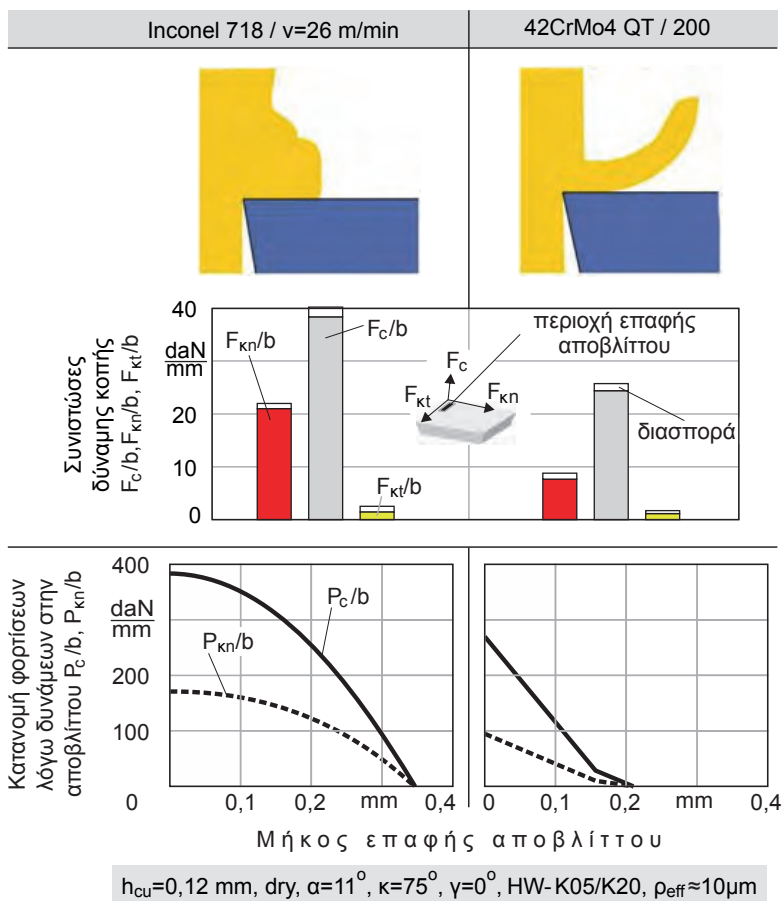


**Σχήμα 7.65:** Επιτυγχανόμενες επιφανειακές παραμορφώσεις και τραχύτητες κατά την α) υγρή και β) ξηρά κοκκοβολή με διαφορετικά μεγέθη κόκκων.

κά περιορισμένου αριθμού των κόκκων. Αυτό είναι εμφανές στα σχετικά διαγράμματα του σχήματος 7.65α. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στη ξηρή κοκκοβολή, λόγω της σχεδόν κάθετης απομάκρυνσης μετά την κρούση των κόκκων στην επιφάνεια των πλακιδίων, όπως παριστάνεται στο **σχήμα 7.65β**, οι δημιουργούμενες τραχύτητες είναι μικρότερες συγκριτικά με αυτές που προκαλούνται στην υγρή κοκκοβολή. Στην υγρή κοκκοβολή, οι κόκκοι κινούνται σχεδόν παράλληλα προς τις κατεργαζόμενες επιφάνειες, όπως προηγουμένως περιγρά-



Οι μηχανικές καταπονήσεις του κοπτικού σφήνα που προκαλούνται από τις συνιστώσες της δύναμης κοπής και τις κατανομές τους στην επιφάνεια αποβλίττου, κατά την κοπή του χαρακτηριστικού κράματος Inconel 718, της κύριας ομάδας IVb και κατηγορίας κατεργαστικότητας 3, σε σχέση με αυτές που υφίστανται κατά την κοπή ενός επιβελτιωμένου χάλυβα, εκτίθεται στο **σχήμα 8.58**. Η μεγάλη παραμόρφωση του αποβλίττου, λόγω ενδοτράχυνσης του υλικού, κατά την κοπή του Inconel 718, είναι εμφανής στο σχήμα. Συνεπεία αυτής της παραμόρφωσης, η ροή του αποβλίττου, σε σχέση με τον επιβελτιωμένο χάλυβα δυσχεραίνεται και τόσο οι συνιστώσες της δύναμης κοπής, όσο και οι φορτίσεις της επιφάνειας αποβλίττου, αυξάνονται δραστικά, περίπου διπλασιάζονται. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η πρόωση είναι ίδια κατά την κατεργασία και των δύο υλικών, η ταχύτητα κοπής όμως πολύ διαφορετική. Κατά την

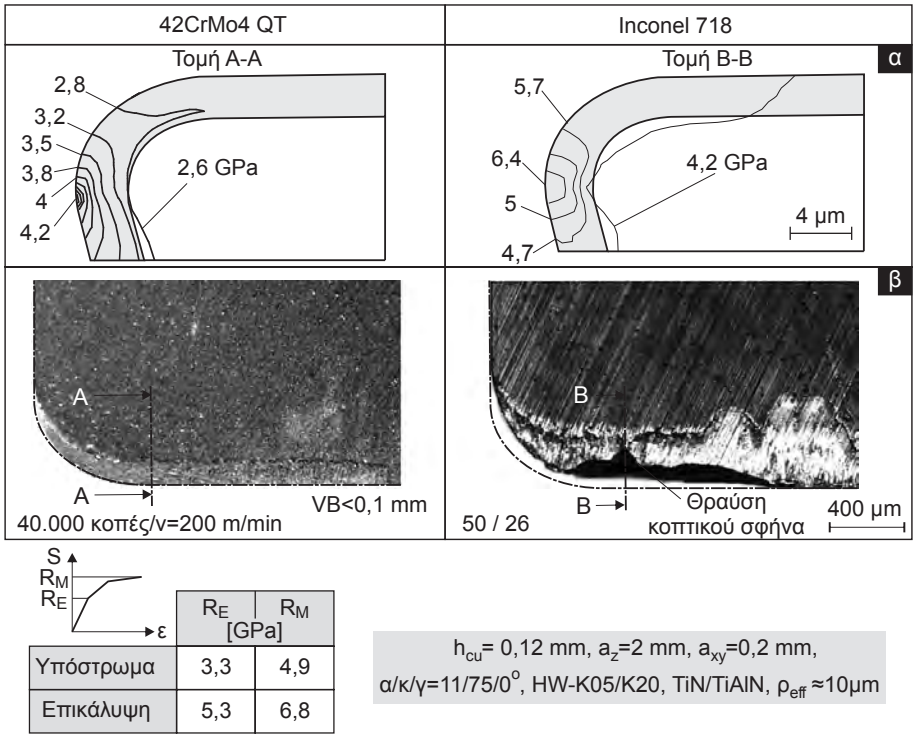


**Σχήμα 8.58:** Ανάπτυξη αποβλίττου, δυνάμεις κοπής και κατανομή φορτίσεων επί της επιφάνειας αποβλίττου κατά την κατεργασία Inconel 718 και 42CrMo4 QT.



κατεργασία του Inconel 718 η ταχύτητα ανέρχεται μόνο σε 26 m/min, ενώ κατά την κοπή του χάλυβα 42CrMo4 σε 200 m/min, για την επίτευξη αντιστοιχών τιμών θερμοκρασιακών κατανομών στην περιοχή της κόψης. Αν και στην περίπτωση κοπής του Inconel 718, το μήκος επαφής του αποβλίττου με την ομώνυμη επιφάνεια, αυξάνει συγκριτικά με αυτό, που δημιουργείται κατά την κατεργασία του χάλυβα 42CrMo4, όπως φαίνεται στο σχήμα, η μεγάλη άνοδος των συνιστωσών της δύναμης κοπής και των προκαλουμένων φορτίσεων του κοπτικού σφήνα, οδηγεί σε σημαντική άνοδο των τάσεων, στη μεταβατική περιοχή, από την επιφάνεια ελευθερίας προς αυτήν του αποβλίττου.

Αυτό γίνεται αντιληπτό στο **σχήμα 8.59**. Οι μέγιστες τάσεις κατά την κοπή του Inconel 718, είναι κατά περίπου 50% αυξημένες, τόσο στην επικάλυψη, όσο και στο υπόστρωμα του σκληρομετάλλου, συγκριτικά με αυτές κατά την κατεργασία του 42CrMo4. Κατά την κοπή του Inconel 718, οι τάσεις αυτές είναι μάλιστα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχές τους για οριακή ελαστική παραμόρφωση του υποστρώματος και της επικάλυψης, προσεγγίζουσες τις σχετικές τάσεις θραύσεις των υλικών αυτών (βλέπε πίνακα στο κάτω μέρος του σχή-



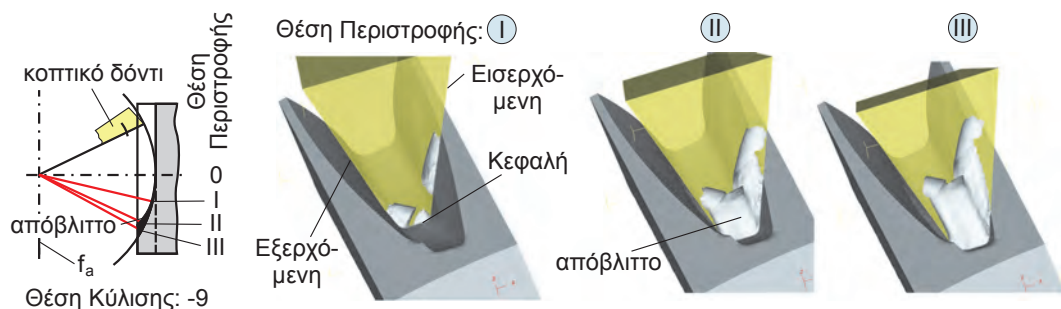
**Σχήμα 8.59:** Κατανομές τάσεων στις κοπτικές ακμές και σχετικές φωτογραφίες επιφανειών αποβλίττου κατά την κοπή επιβελτιωμένου χάλυβα και Inconel 718.



Ιδιαίτερα αποτελεσματικές δυνατότητες για τον περιορισμό των τάσεων στη θέση του κοπτικού σφήνα, είναι η αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας της κόψης καθώς και η διαπλάτυνση της επιφάνειας αποβλίττου (chamfer) για την επίτευξη τοπικής μείωσης της γωνίας αποβλίττου, όπως επεξηγείται στο **σχήμα 8.60** [BOU 14.2]. Παράπλευρα από τις εξετασθείσες τέσσερις περιπτώσεις 1–4 της

**Σχήμα 8.60:** Κατανομές τάσεων στην περιοχή του κοπτικού σφήνα κατά το φραιζάρισμα Inconel 718 με επικαλυμμένα εργαλεία διαφορετικής ακτίνας καμπυλότητας, καθώς και τοπικής μείωσης της γωνίας αποβλήτου.





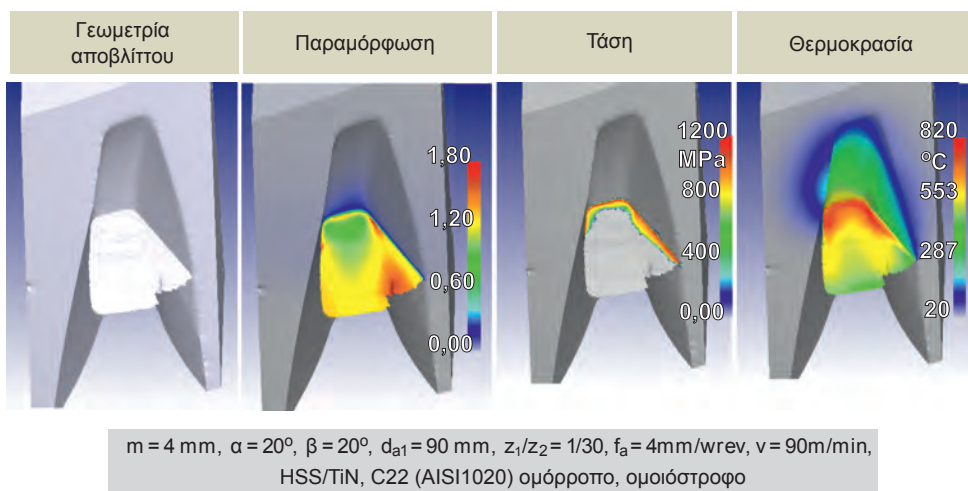
$m = 4 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ ,  $n_1 = 9$ ,  $d_{a1} = 90 \text{ mm}$ ,  $z_1/z_2 = 1/30$ ,  $f_a = 4 \text{ mm/wrev}$ ,  $v = 90 \text{ m/min}$ , C22, αντίρροπο, HSS/TiAlN

**Σχήμα 11.27:** Δημιουργία αποβλίττου σε διακεκριμένες θέσεις κύλισης κατά το φραιζάρισμα με κύλιση μέσω FEM διαδικασιών.

Ένα παράδειγμα υπολογισμού της δημιουργίας και της ροής του αποβλίττου, μέσω των προηγούμενων λογισμικών, σε μια θέση κύλισης κατά το αντίρροπο φραιζάρισμα οδόντωσης, εμφανίζεται στο **σχήμα 11.27**. Στην συγκεκριμένη θέση κύλισης, η εμπλοκή του εικονιζόμενου εργαλείου με το υλικό του τεμαχίου, έχει αρχίσει στη θέση περιστροφής I και τρία ξεχωριστά απόβλιττα αφαιρούνται από τις κόψεις της εισερχομένης και εξερχομένης παρειάς, καθώς και της κεφαλής του κοπτικού οδόντα. Στη θέση περιστροφής II, τα τρία ανεξάρτητα απόβλιττα έχουν ήδη ενοποιηθεί σε ένα, με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των μηχανισμών παρεμπόδισης της ροής του αποβλίττου, όπως περιγράφεται στην επομένη παράγραφο. Στη θέση περιστροφής III ολοκληρώνεται ο σχηματισμός του αποβλίττου, καθώς και της μορφοποίησης της στιγμιαίας γεωμετρίας του αυλακιού, επί της οποίας βασίζεται ο υπολογισμός της δημιουργίας του αποβλίττου στην επομένη θέση κύλισης.

Ένα περαιτέρω παράδειγμα υπολογισμού με τη βοήθεια των αναφερθέντων FEM μεθόδων υπολογισμού, των δημιουργούμενων πεδίων παραμορφώσεων, τάσεων και θερμοκρασιών, συγχρόνως με το σχηματισμό του αποβλίττου κατά το ομόρροπο φραιζάρισμα σε μια θέση κύλισης, παρατίθεται στο **σχήμα 11.28**. Το απόβλιττο ευρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο της δημιουργίας του και λόγω της ομορρόπου κινηματικής οι διατομές με τα μεγαλύτερα πάχη έχουν ήδη αφαιρεθεί. Αυτό υποδηλώνουν και οι χρωματικές κλίμακες, αφού τα μέγιστα τους πρόεκυψαν σε προηγούμενες θέσεις περιστροφής του εργαλείου από την εξεταζόμενη. Τα αποτελέσματα επιδεικνύουν τις υψηλές φορτίσεις του υλικού στις γωνίες του αποβλίττου αναφορικά με τις δημιουργούμενες παραμορφώσεις, τάσεις και θερμοκρασίες, λόγω της μνημονευθείσας παρεμπόδισης της ρο-





**Σχήμα 11.28:** FEM υπολογισμός της γεωμετρίας αποβλήτου και των πεδίων θερμοκρασίας, τάσεων και παραμορφώσεων σε μια θέση κύλισης κατά το φραιζάρισμα με κύλιση.

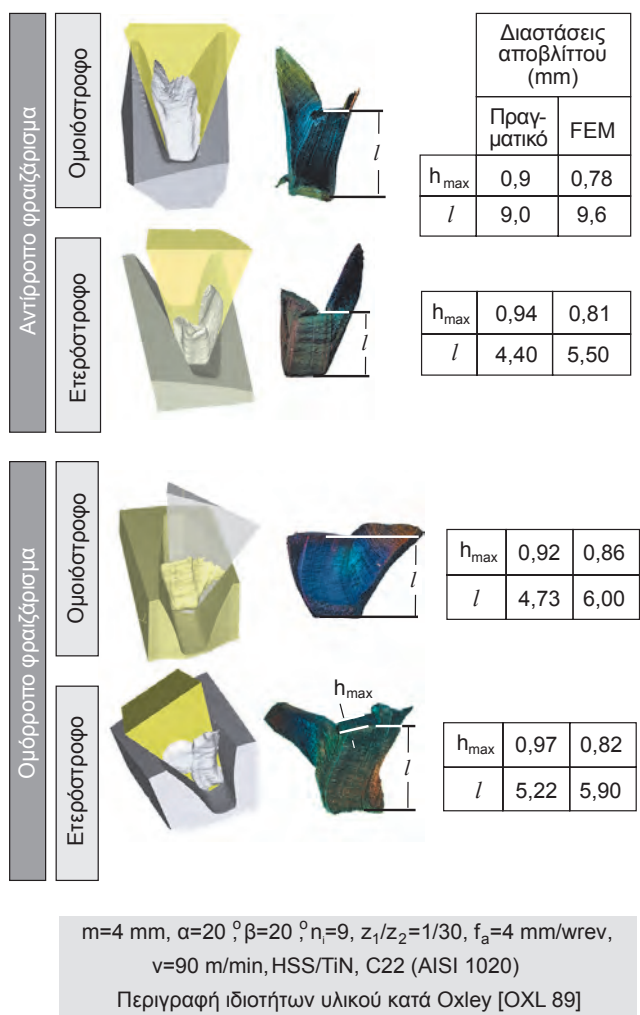
ής του. Οι φορτίσεις αυτές παραλαμβάνονται από τις σχετικές θέσεις των κοπτικών ακμών και της επιφάνειας του αποβλήτου, προκαλώντας εντόνους μηχανισμούς φθοράς στις περιοχές αυτές του κοπτικού οδόντα.

Η αξιοπιστία των υπολογισμών αυτών, για τον προσδιορισμό της πραγματικής γεωμετρίας των αποβλήτων, μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της σύγκρισης υπολογισμένων μορφών και κυρίων διαστάσεων τους με αυτές των αντιστοιχείων τους, που στη πραγματικότητα δημιουργούνται σε διάφορες θέσεις κύλισης (βλέπε **σχήμα 11.29**). Τόσο τα συγκρινόμενα πάχη, όσο και τα μήκη συγκλίνουν ικανοποιητικά. Στους διεξαχθέντες υπολογισμούς, σύμφωνα με την ανάλυση της παραγράφου 3.3.3, χρησιμοποιήθηκαν οι νόμοι περιγραφής του τάσης διαρροής του υλικού του κατεργαζομένου οδοντωτού τροχού κατά Oxley [OXL 89].

#### Γ. Γεωμετρία αποβλήτων στις μεταβατικές περιοχές εισόδου και εξόδου κατά μήκος του πλάτους του μορφοποιούμενου τροχού

Οι γεωμετρίες των αποβλήτων που επιδείχθηκαν προηγουμένως στη παρούσα παράγραφο, σχηματίζονται κατά τη πλήρη εμπλοκή του εργαλείου με το τεμάχιο, όταν δηλαδή οι διαστάσεις πάχους και μήκους των δημιουργούμενων αποβλήτων είναι οι μέγιστα δυνατές. Σχετικά με τις διαστάσεις των σχηματιζομένων αποβλήτων, με συνεκτίμηση του πλάτους του κατεργαζομένου τροχού και της διαμέτρου του εργαλείου, μπορούν να διακριθούν οι τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις κατά το φραιζάρισμα με κύλιση, που εμφανίζονται στο

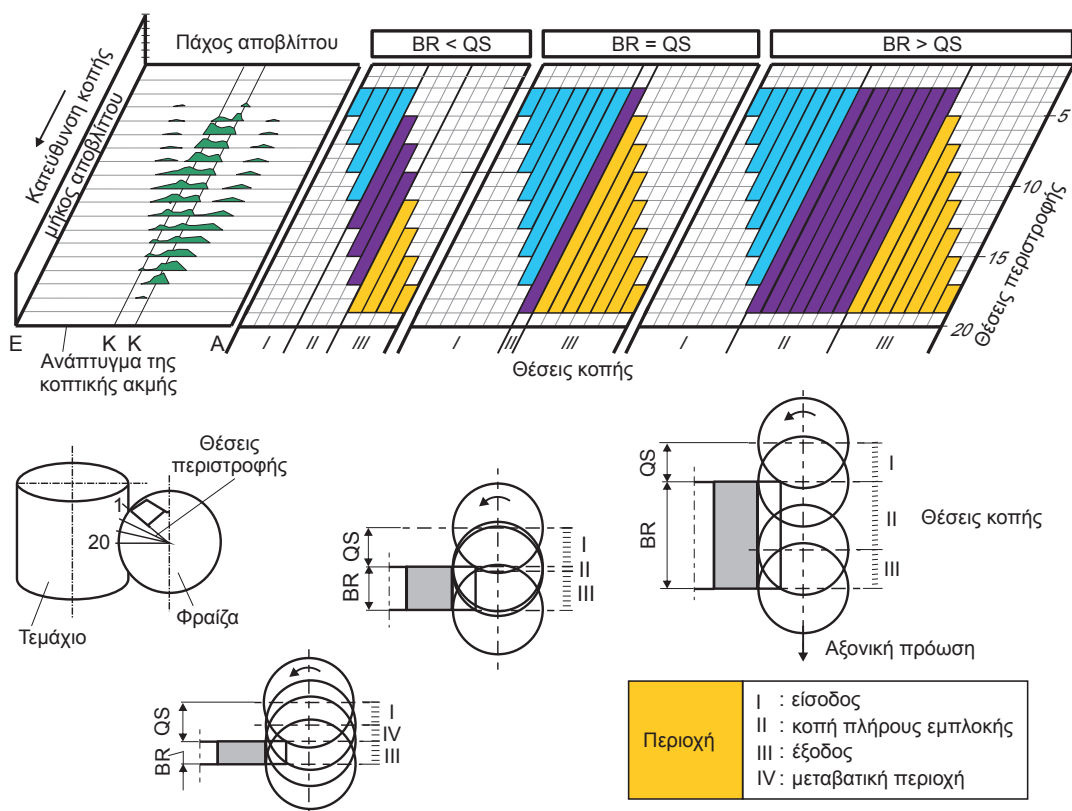




**Σχήμα 11.29:** Σύγκριση μεταξύ πραγματικής και FEM υπολογισμένης μέσω πεπερασμένων στοιχείων γεωμετρίας αποβλήτου.

**σχήμα 11.30.** Ειδοποιός διαφορά στις περιπτώσεις αυτές, είναι η σχέση μεταξύ του πλάτους του κατεργαζομένου οδοντωτού τροχού BR και της απόστασης QS του άξονα της φραιζας από την άνω μετωπική επιφάνεια του τροχού κατά το αντίρροπο φραιζάρισμα, ή από την κάτω κατά το ομόρροπο. Στη περίπτωση που το πλάτος BR είναι μεγαλύτερο από την απόσταση QS, στις θέσεις κοπής της περιοχής I, κατά την είσοδο ενός οδόντα του εργαλείου στο κατεργαζόμενο αυλάκι, σε μια θέση κύλισης αφαιρείται το ενδεικτικά εικονιζόμενο απόβλιττο στο άνω αριστερά μέρος του σχήματος. Το μήκος και το πλά-

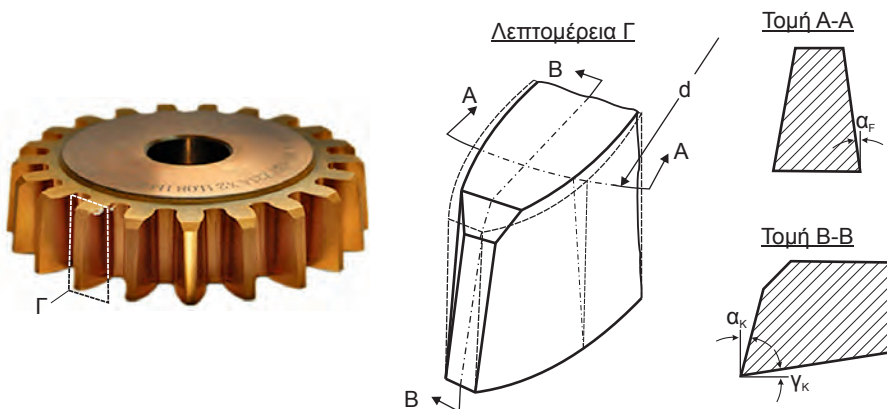




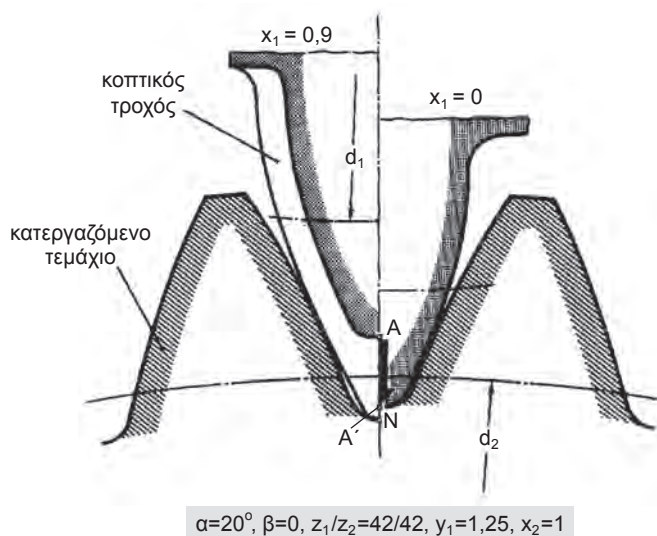
**Σχήμα 11.30:** Γεωμετρίες αποβλίπτων σε διάφορες περιοχές οδοντώσεων καθ' όλο το πλάτος της οδόντωσης, σε μία θέση κύλισης κατά το φραιζάρισμα.

τος του αποβλίπτου αυτού αυξάνεται κατά τις διαδοχικές αξονικές μετατοπίσεις της φραιζας κατά μήκος του αυλακιού, μέσω της πρόωσης ανά περιστροφή του τροχού, που μετατοπίζει το εργαλείο πιο εσωτερικά στο αυλάκι. Στη περιοχή II, των θέσεων κοπής της πλήρους εμπλοκής του εργαλείου, τα απόβλιττα έχουν σταθερή μορφή, με μέγιστες διαστάσεις (απόβλιττο πλήρους εμπλοκής). Τέλος, στην περιοχή III, της εξόδου του εργαλείου από το αυλάκι, οι διαστάσεις των αποβλίπτων μειώνονται βηματικά, μέχρι την πλήρη απεμπλοκή του κοπτικού οδόντα από το υλικό του κατεργαζομένου τροχού. Στην άλλη ακραία περίπτωση, που το πλάτος του τροχού είναι μικρότερο της απόστασης  $QS$ , δεν παρεμβάλλεται πλέον μεταξύ των περιοχών I και III η περιοχή II της πλήρους εμπλοκής, αλλά η μεταβατική περιοχή IV. Στη περιοχή αυτή, τα απόβλιττα έχουν μικρότερα μήκη και πλάτη στην αρχή και στο τέλος της κοπής, στις περιοχές I και III αντίστοιχα, σε σύγκριση με τα απόβλιττα στις περιοχές αυτές, όταν το πλάτος  $BR$  είναι μεγαλύτερο, ή ίσο από την απόσταση  $QS$ .





Σχήμα 11.68: Κοπτικές γωνίες επί των παρειών εργαλείου πλάνισης με οδοντωτό τροχό.



Σχήμα 11.69: Επίδραση της μετατόπισης της κατατομής του κοπτικού τροχού επί της προκύπτουσας διαμέτρου ποδός στο κατεργαζόμενο τεμάχιο κατά τη πλάνιση με κύλιση.

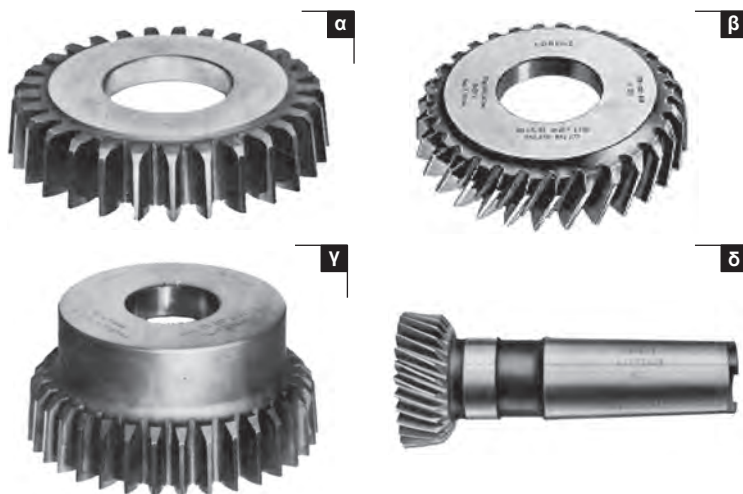
$$\alpha=20^\circ, \beta=0, z_1/z_2=42/42, y_1=1,25, x_2=1$$

Μετά τη λείανση, μειώνεται η εξωτερική διάμετρος του τροχού, όπως και της φραιζας. Στη περίπτωση όμως της πλάνισης με κύλιση, η μικρότερη διάμετρος του εργαλείου οδηγεί στο πρόβλημα που επεξηγείται στο **σχήμα 11.69** [BOU 76, 78.3]. Έστω ότι οι εικονιζόμενες παρειές οδόντος αριστερά στο σχήμα, μορφοποιούνται με κοπτικό τροχό, που έχει μετατόπιση κατατομής  $x_1$  ίση με 0,9. Από την άλλη πλευρά, οι παρειές του οδόντος που εμφανίζεται στο δεξιό μέρος του σχήματος, με τα ίδια δεδομένα του προηγούμενως αναφερθέντος, κατεργάζονται με το ίδιο εργαλείο, που έχει όμως επαναλειανθεί αρκετές φορές και έτσι η μετατόπιση κατατομής του  $x_1$ , λόγω της μείωσης της εξωτερικής διαμέτρου, έχει περιορισθεί σε 0. Για την διατήρηση της μετατόπισης κατατομής  $x_2$  του κατερ-



γαζομένου τροχού, δηλαδή για την επίτευξη του ίδιου πάχους οδόντος επί του κύκλου διαίρεσης  $d_2$ , η αξονική απόσταση μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου πρέπει να μειωθεί κατά το διάστημα  $AA'$  και όχι κατά το  $AN$ . Το διάστημα  $AN$  αντιστοιχεί στη μείωση της ακτίνας του κύκλου κεφαλής του κοπτικού τροχού, ενώ η απόσταση  $AA'$  υπολογίζεται με βάση τα δεδομένα των οδοντώσεων του εργαλείου και του τεμαχίου, λαμβάνοντας υπόψη τη μετατόπιση της κατατομής  $x_1$  του κοπτικού τροχού, στο παρόν παράδειγμα ίσης με 0, που προκύπτει μετά τις διαδοχικές λειάνσεις του. Για το λόγο αυτό, όπως φαίνεται στο σχήμα, δημιουργούνται διαφορετικές διάμετροι ποδός στον κατεργαζόμενο τροχό συναρτήσει της μετατόπισης κατατομής  $x_1$  του εργαλείου, δηλαδή συναρτήσει της εξωτερικής διαμέτρου του μετά από κάθε επαναλείανση του. Στη περίπτωση που η διάμετρος του ποδός της κατεργαζομένης οδόντωσης έχει προδιαγραφμένες ανοχές, τότε προφανώς και η μετατόπιση της κατατομής  $x_1$  του εργαλείου υπόκειται σε περιορισμούς, που εύκολα υπολογίζονται. Κατά το φραιζάρισμα με κύλιση, δεν δημιουργείται το πρόβλημα αυτό, καθόσον οι οδοντοστήλες έχουν τη γεωμετρία οδοντωτού κανόνα, δηλαδή τροχού με άπειρη διάμετρο, που και μετά την επαναλείανση τους συνεχίζουν να έχουν διάμετρο με άπειρη τιμή. Συνέπεια του περιγραφέντος προβλήματος είναι, ότι κατά την αλλαγή του εργαλείου στη πλάνιση με κύλιση, η ρύθμιση της αξονικής απόστασης μεταξύ κατεργαζομένου και κοπτικού τροχού διεξάγεται με βάση το προκύπτον εύρος  $W_n$  μεταξύ  $n$  οδόντων και όχι βάσει της δημιουργουμένης διαμέτρου του κύκλου ποδός.

Στο **σχήμα 11.70** επιδεικνύονται βασικές παραλλαγές κατασκευαστικών διαμορφώσεων κοπτικών τροχών πλάνισης με κύλιση [LOR 77]. Η δυσκοι-  
δής διαμόρφωση, για ευθείες ( $\alpha$ ) και πλάγιες ( $\beta$ ) οδοντώσεις, είναι οι πιο συ-



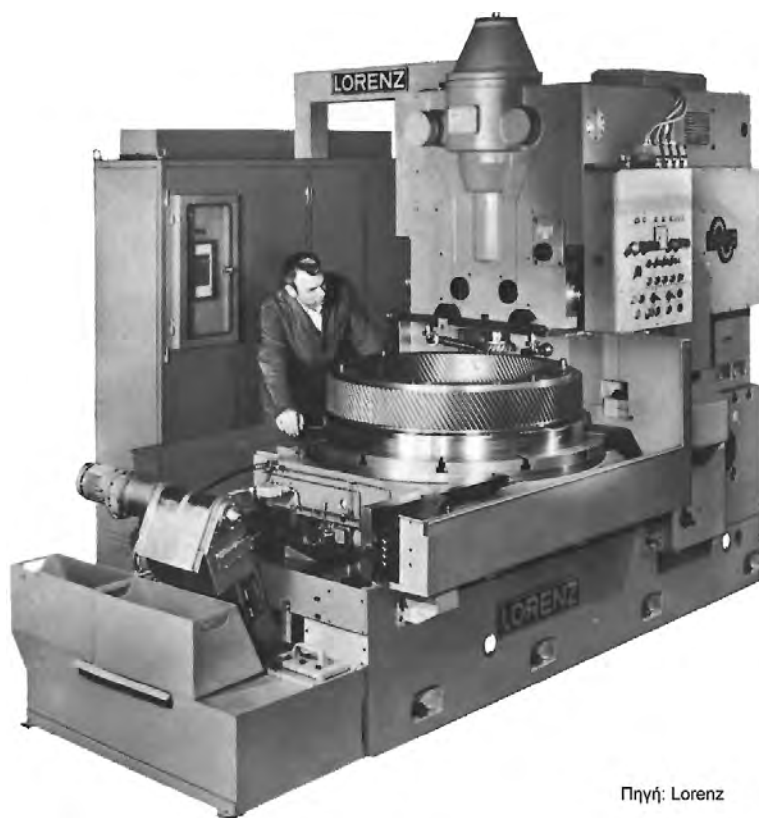
**Σχήμα 11.70:** Διάφορες κατασκευαστικές διαμορφώσεις κοπτικών τροχών.



νήθεις. Η κωδωνοειδής διαμόρφωση (γ), αυξάνει μέσω της πλευρικής της περιοχής το ωφέλιμο μήκος της παλινδρομούσας ατράκτου. Για το λόγο αυτό, η διαμόρφωση αυτή ενδείκνυται σε κατεργασίες εσωτερικών οδοντώσεων, όπου η άτρακτος πρέπει να εισέλθει σε σχετικά μεγάλο βάθος εντός της λεκάνης της εσωτερικής οδόντωσης. Τέλος, η διαμόρφωση με κωνικό στέλεχος (δ) χρησιμοποιείται κυρίως, εάν απαιτείται η εξωτερική διάμετρος του εργαλείου να είναι μικρότερη από αυτή της παλινδρομούσας ατράκτου. Η διαμόρφωση αυτή, σε συνδυασμό με ψηφιακά καθοδηγούμενες διατάξεις αυτόματης αλλαγής εργαλείων, επιτρέπει τη ταχεία σύσφιξη του κοπτικού τροχού επί της ατράκτου.

#### *Γ. Δομή εργαλειομηχανής πλάνισης με κύλιση*

Η κατασκευαστική διαμόρφωση εργαλειομηχανής πλάνισης με κύλιση παρουσιάζεται στο **σχήμα 11.71**. Η κατεργαζόμενη οδόντωση, στη συγκεκριμένη πε-



Πηγή: Lorenz

**Σχήμα 11.71:** Εργαλειομηχανή πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων.



ρίπτωση μια στεφάνη με εσωτερική και συγχρόνως εξωτερική οδόντωση, διαμέτρου περίπου 1200 mm, εδράζεται στη τράπεζα της εργαλειομηχανής, η οποία τη περιστρέφει και συγχρόνως τη μετακινεί ακτινικά μέχρι να επιτευχθεί το βάθος κοπής. Η άτρακτος εκτελεί παλινδρομική κίνηση μήκους απλής διαδρομής ίσου με το πλάτος της στεφάνης, συν κάποια διαστήματα στο άνω και κάτω μέρος της, απαραίτητα για το μηδενισμό της ταχύτητας κοπής, πριν την αναστροφή της κίνησης του εργαλείου. Η πλάγια μετατόπιση σε οριζόντιο επίπεδο του άξονα του εργαλείου, για την αποφυγή σύγκρουσης κατά τη παλινδρόμηση του, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 11.1.2.2, υλοποιείται μέσω της μετατόπισης της υδροστατικής έδρασης της ατράκτου στις κατευθύνσεις που σημειώνονται στο σχήμα. Τόσο η συγκράτηση του τεμαχίου, όσο και του κοπτικού τροχού, έχουν σχεδιομελετηθεί να έχουν ικανοποιητική στιβαρότητα, που να εξασφαλίζει περιορισμένες ελαστικές παραμορφώσεις στις αναμενόμενες υψηλές δυνάμεις κοπής (βλέπε παράγραφο 11.1.2.4).

#### **Δ. Τυπικά τεμάχια μορφοποιούμενα μέσω πλάνισης με κύλιση**

Ένεκα της κινηματικής του εργαλείου κατά τη πλάνιση με κύλιση, ο χρόνος της παλινδρόμησής του παραμένει ανεκμετάλλευτος (νεκρός χρόνος), γεγονός που περιορίζει αισθητά την οικονομικότητα της κατεργασίας σε σχέση με το φραιζάρισμα. Για το λόγο αυτό, γενικά, μέσω πλάνισης με κύλιση μορφοποιούνται οδοντώσεις, των οποίων η κατεργασία δεν είναι δυνατή με χρησιμοποίηση φραιζαρίσματος με κύλιση. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων οδοντωτών τροχών εμφανίζονται στο **σχήμα 11.72**. Η πλειοψηφία των εσωτερικών οδοντώσεων, όπως αυτές που εικονίζονται στις φωτογραφίες (α),(β) και (γ), κατεργάζονται μέσω πλάνισης με κύλιση. Εν προκειμένω, αξίζει να σημειωθεί, ότι προσπάθειες μορφοποίησης εσωτερικών οδοντώσεων μέσω φραιζαρίσματος με βαρελοειδή φραιζα, έχουν πειραματικό χαρακτήρα, καθόσον το κόστος των εργαλείων είναι υψηλό και η επιτυγχάνομενη ακρίβεια κατεργασίας περιορισμένη. Η οδόντωση συμπλέκτη της περίπτωσης (γ), έχει ειδική γεωμετρία και μορφοποιείται με το κοπτικό τροχό που διακρίνεται στη φωτογραφία. Η οδόντωση της περίπτωσης (δ) δεν είναι δυνατόν να φραιζαρισθεί με κύλιση, καθόσον λόγω της περιορισμένης απόστασης της από το κάτω τροχό, αυτός θα καταστρεφόταν. Επίσης, περαιτέρω ειδικές γεωμετρίες οδοντώσεων, όπως ενδεικτικά η συμπαγής τοξοειδής οδόντωση (ε), η κορωνοειδής (ζ), οδοντωτού κανόνα (η) κα. μπορούν να μορφοποιηθούν μέσω πλάνισης με κύλιση.