

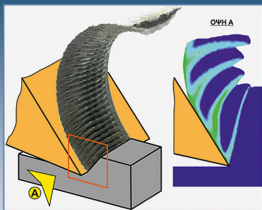
Κοθηγητής Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Dr.h.c.

Κων/νος - Διονύσιος Ε. Μπουζάκης

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Μηχανική και Τεχνολογία Μηχανουργικών Μορφοποιήσεων με Αφαίρεση Υλικού



Κάθε γνήσιο αντίτυπο φέρει την υπογραφή του συγγραφέα

ISBN 978-960-456-232-9

© Copyright, 2010, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Κ.-Δ. Μπουζάκης

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 & Σία 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



**ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΖΗΤΗ**

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 - ΕΝΩΣΗ ΕΚΔΟΤΩΝ ΒΙΒΛΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:

Στοά του Βιβλίου (Πεσμαζόγλου 5), 105 64 Αθήνα • Τηλ.-Fax: 210.3211.097

ΑΠΟΘΗΚΗ ΑΘΗΝΩΝ - ΠΩΛΗΣΗ ΧΟΝΔΡΙΚΗ:

Ασκληπιού 60, 114 71 Αθήνα

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

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ: 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, ή μη γεωμετρία κόψης καθώς και αυτές, μέσω αποχωρισμού υλικού από το κατεργαζόμενο κομμάτι, με προσαγωγή ενέργειας θερμικά, ή ηλεκτροχημικά. 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. Έτσι, το παρόν σύγγραμμα απευθύνεται τόσο στο φοιτητή, μηχανολόγο μηχανικό, που εισάγεται για πρώτη φορά στην επιστημονική περιοχή των μηχανουργικών μορφοποιήσεων, όσο και στον επαγγελματία μηχανικό, που εργάζεται σε σχετικά πεδία.

Στο σύγγραμμα καθίσταται εμφανής η υπερτριακονταετής 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 και στη συνεργατίδα μου και μέλος του Ειδικού Εκπαιδευτικού Προσωπικού του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΑΠΘ, Διπλ. Μηχ. Μηχ. Μ. Γρηγοριάδου, για την επιμέλεια των σχημάτων προηγούμενων εκδόσεων του βιβλίου, στα οποία εν μέρει βασίσθηκαν και αυτά της τρέχουσας έκδοσης. Επίσης, ιδιαίτερα ευχαριστώ τον συνεργάτη μου Δρ. Μηχ. Μηχ. Ι. Μυρισίδη, για την άοκνη συνεισφορά του στην επιμέλεια της παρούσας 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, Οκτώβριος 2010

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

13

Κεφάλαιο 2

Δομή και κρυσταλλογραφικές μορφές κατεργαζόμενων υλικών

23

2.1	Δημιουργία στοιχειωδών κρυσταλλικών πλεγμάτων	25
2.1.1	Δόμηση κρυσταλλικού πλέγματος ατόμων, συγκρατούμένων μέσω μεταλλικού δεσμού	25
2.1.2	Δημιουργία κρυσταλλικού πλέγματος μέσω ετεροπολικών δεσμών	27
2.1.3	Κρυσταλλικά πλέγματα, δομημένα μέσω ομοιοπολικού δεσμού ατόμων	29
2.1.4	Σχηματισμός κρυσταλλοδομών μέσω μοριακού δεσμού (van der Waals)	31
2.2	Κρυσταλλικά πλέγματα στερεών διαλυμάτων	31
2.3	Παραμορφωσιμότητα των διαφόρων κρυσταλλοδομών	33
2.4	Δημιουργία κρυσταλλογραφικών μορφών, μέσω ανάπτυξης των κρυστάλλων	35
2.5	Αταξίες κρυσταλλικών πλεγμάτων και επίδρασή τους επί των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών	37
2.5.1	Γεωμετρίες αταξιών κρυσταλλικών πλεγμάτων	37
2.5.2	Δημιουργία αταξιών μέσω μηχανικών υπερκαταπονήσεων	38
2.5.3	Μετατοπίσεις αταξιών εντός κρυσταλλικών πλεγμάτων, μέσω εξάσκησης μηχανικών τάσεων	40
2.5.4	Επιδράσεις αταξιών και διαχύσεων επί των μηχανικών ιδιοτήτων, συναρτήσει του μεγέθους των κόκκων.	42
2.5.5	Επίδραση αταξιών και διαχύσεων επί των μηχανικών ιδιοτήτων ιδιαίτερα λεπτοκόκκων υλικών, όπως των PVD επικαλύψεων, συναρτήσει της θερμοκρασίας	46
2.5.6	Επίδραση αταξιών και διαχύσεων επί των μηχανικών ιδιοτήτων κανονικής κοκκομετρίας υλικών, συναρτήσει της θερμοκρασίας και της ταχύτητας παραμόρφωσης	47

2.6	Επίδραση της παραμόρφωσης και της θερμοκρασίας επί του μηχανισμού ανακρυστάλλωσης	49
2.7	Επίδραση θερμοκρασιών, υψηλότερων από αυτές της ανακρυστάλλωσης, καθώς και της ταχύτητας παραμόρφωσης, επί των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών	51

Κεφάλαιο 3

53

Μηχανική της κοπής με εργαλεία προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης

3.1	Περιγραφή της κοπτικής γεωμετρίας του εργαλείου	55
3.2	Μηχανισμοί δημιουργίας του αποβλίττου κατά την κοπή	62
3.2.1	Παραμορφώσεις και κρυσταλλικοί μετασχηματισμοί του υλικού, στην περιοχή σχηματισμού του αποβλίττου	62
3.2.2	Καταпонήσεις του υλικού κατά το σχηματισμό του αποβλίττου	68
3.2.3	Μικροδομές αποβλίττων	69
3.3	Αναλυτικός προσδιορισμός της δημιουργίας του αποβλίττου με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)	72
3.3.1	FEM-λογισμικά για την προσομοίωση μηχανισμών κοπής	72
3.3.2	Μέθοδοι πειραματικού προσδιορισμού της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς υλικών σε υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης και θερμοκρασίες	75
3.3.3	Μαθηματική περιγραφή νόμων πλαστικής διαρροής υλικού κατά την FEM προσομοίωση του μηχανισμού της κοπής	77
3.4	Προσδιορισμός διαφόρων χαρακτηριστικών μεγεθών κατά την κοπή, με τη βοήθεια FEM υπολογισμών	82
3.4.1	FEM υπολογισμός πεδίων μηχανικών τάσεων, παραμορφώσεων και θερμοκρασιών στην περιοχή δημιουργίας του αποβλίττου	82
3.4.2	Υπολογισμός παραμενουσών τάσεων στις επιφάνειες των κατεργαζομένων τεμαχίων	85
3.4.3	Δαπανώμενα έργα και δημιουργούμενη θερμότητα κατά τον σχηματισμό του αποβλίττου	87
3.5	Επίδραση διαφόρων παραμέτρων επί της μικροδομής του αποβλίττου κατά την κοπή	91
3.5.1	Επίδραση της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής επί της μικροδομής του αποβλίττου	91
3.5.2	Επίδραση της γωνίας αποβλίττου επί της μικροδομής του αποβλίττου	95

3.5.3	Επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων του κατεργαζόμενου υλικού επί της μικροδομής του αποβλίττου	98
3.6	Έλεγχος της μακρο-γεωμετρίας των αποβλίττων	102
3.7	Δημιουργούμενη τραχύτητα επί των επιφανειών των τεμαχίων κα- τά την κοπή	109
3.8	Δημιουργία ψευδοκόψεων κατά την κοπή	111
3.9	Δημιουργία απολήξεων κατά την κοπή	118

Κεφάλαιο 4

123

Δυνάμεις και θερμοκρασίες κατά την κοπή με εργαλεία προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης

4.1	Ανάλυση της δύναμης κοπής σε συνιστώσες, χαρακτηριστικά συ- στήματα αναφοράς	125
4.2	Επίδραση της μικροδομής του αποβλίττου επί της δύναμης κοπής ..	130
4.3	Μέτρηση των συνιστωσών της δύναμης κοπής	132
4.4	Επίδραση των συνθηκών κατεργασίας επί της δύναμης κοπής	136
4.4.1	Επίδραση της ταχύτητας κοπής	136
4.4.2	Επίδραση του βάθους και της πρόωσης κοπής επί των συνιστωσών της δύναμης κοπής	140
4.4.3	Επίδραση γωνιών της κοπτικής γεωμετρίας επί των συνιστωσών της δύναμης κοπής	142
4.4.4	Επίδραση της φθοράς του εργαλείου επί της δύναμης κοπής	143
4.4.5	Επίδραση του υλικού επί της δύναμης κοπής	145
4.5	Πειραματικός-αναλυτικός προσδιορισμός των συνιστωσών της δύναμης κοπής	148
4.5.1	Μαθηματική περιγραφή των πειραματικά προσδιορισμένων συνι- στωσών της δύναμης κοπής	148
4.5.2	Πειραματική-αναλυτική μέθοδος για τον γρήγορο προσδιορισμό ειδικών δυνάμεων κοπής και σχετικών εκθετών	155
4.5.3	Πειραματικός-αναλυτικός προσδιορισμός συνιστωσών δυνάμεων κοπής σε κατεργασίες πολύπλοκης γεωμετρίας αποβλίττων	158
4.6	Μέτρηση και υπολογισμός θερμοκρασιακών πεδίων κατά την κο- πή	163
4.6.1	Μεθοδολογίες μέτρησης θερμοκρασιών κατά την κοπή	163
4.6.2	FEM προσδιορισμός θερμοκρασιακών πεδίων κατά την κοπή	167

Κεφάλαιο 5

171

Μηχανισμοί φθοράς ακαλύπτων κοπτικών εργαλείων προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης

5.1	Μηχανισμοί φθοράς υλικών συνεργαζομένων επιφανειών	175
5.1.1	Συναφειακές μικροσυγκολλήσεις	177
5.1.2	Αποξέσεις	178
5.1.3	Μικρορηγματώσεις λόγω κόπωσης	179
5.1.4	Τριβοχημικές αντιδράσεις	180
5.2	Φθορά ακαλύπτων εργαλείων κατά την κοπή	181
5.2.1	Συναφειακές μικροσυγκολλήσεις κατά την κοπή	182
5.2.2	Φθορά εργαλείων λόγω αποξέσεων	182
5.2.3	Θραύσεις των κοπτικών ακμών λόγω κόπωσης	185
5.2.3.1	Δημιουργία ρωγμών σε επίπεδα παράλληλα στην επιφάνεια του αποβλίττου	186
5.2.3.2	Δημιουργία ρωγμών σε επίπεδα κάθετα στην επιφάνεια του αποβλίττου και την κοπτική ακμή	188
5.2.4	Φθορά εργαλείων λόγω τριβοχημικών αντιδράσεων	190
5.2.4.1	Χημικές αντιδράσεις επί της επιφάνειας του εργαλείου κατά την κοπή	190
5.2.4.2	Διαφοροποιήσεις της χημικής σύστασης υλικών εργαλείου και αποβλίττου λόγω διαχύσεων	194
5.3	Μεγέθη για την μαθηματική περιγραφή της φθοράς κοπτικών εργαλείων	197

Κεφάλαιο 6

201

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

6.1	Προσδιορισμός ιδιοτήτων υλικών επικαλύψεων	209
6.1.1	Προσδιορισμός καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης επικαλύψεων και άλλων υλικών μέσω νανοδιεισδύσεων	209
6.1.2	Προσδιορισμός αντοχής σε κόπωση επικαλύψεων	217
6.1.3	Πειραματικός και αναλυτικός προσδιορισμός σκληρότητας επικαλύψεων	227
6.1.4	Έλεγχος και ποσοτικοποίηση της συνάφειας επικαλύψεων	231
6.2	Μηχανισμοί φθοράς επικαλυμμένων εργαλείων και αναλυτική προσέγγισή τους	240

6.2.1	Αστοχία της επικάλυψης λόγω μηχανικής υπερφόρτισης	241
6.2.2	Αστοχία της επικάλυψης λόγω κόπωσης του υλικού της	244
6.2.3	Αστοχία της επικάλυψης λόγω διάχυσης και οξείδωσης	251
6.2.4	Αστοχία της επικάλυψης λόγω ανεπαρκούς συνάφειας	256
6.2.4.1	Προετοιμασία της επιφάνειας υποστρώματος για την επί- τευξη υψηλής συνάφειας, στην περίπτωση έως και υψηλού ενεργειακού πιπέδου πλάσματος	257
6.2.4.2	Προετοιμασία της επιφάνειας του υποστρώματος για την επίτευξη υψηλής συνάφειας, στην περίπτωση υψηλού ιονι- σμού πλάσματος (HPPMS)	260
6.2.5	Φθορά επικαλύψεων λόγω συναφειακών μικροσυγκολλήσεων	266
6.3	Επίδραση διαφόρων παραμέτρων των κατεργασιών κοπής επί της φθοράς των επικαλύψεων	267
6.3.1	Επίδραση της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής επί της φθοράς επικαλυμμένων εργαλείων	267
6.3.2	Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας του εργαλείου στη φθορά των επικαλυμμένων εργαλείων	271
6.3.3	Επίδραση διαδικασιών επαναχρησιμοποίησης, επικαλυμμένων ερ- γαλείων από σκληρομέταλλο, στη συμπεριφορά της φθοράς τους ...	272

Κεφάλαιο 7

277

Υλικά και επικαλύψεις κοπτικών εργαλείων προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης

7.1	Υλικά κοπτικών εργαλείων από χάλυβα	285
7.1.1	Ψυχροί εργαλειοχάλυβες	285
7.1.2	Ταχυχάλυβες	286
7.2	Σκληρομέταλλα	296
7.3	Σκληρομέταλλα τύπου Cermets	305
7.4	Κεραμικά υλικά	307
7.5	Κυβικά βοριονιτρίδια (CBN)	313
7.6	Διαμάντι ως υλικό κοπτικών εργαλείων	317
7.6.1	Μονοκρυσταλλικά διαμάντια (DM)	317
7.6.2	Πολυκρυσταλλικά διαμάντια (DP)	318
7.7	Επικαλύψεις κοπτικών εργαλείων	321
7.7.1	PVD-επικαλύψεις	323
7.7.1.1	Μέθοδοι παραγωγής	333
7.7.1.2	Τυπικές εγκαταστάσεις PVD επικαλύψεων με βομβαρδι- σμό στόχων	333

7.7.1.3	Επιδράσεις επί της φθοράς επικαλυμμένων εργαλείων με- ρικών μη σταθερών ιδιοτήτων των επικαλύψεων, λόγω ιδι- αιτεροτήτων της διαδικασίας εναπόθεσης	341
7.7.1.4	Βελτιώσεις ιδιοτήτων επικαλύψεων μέσω μικροκοκκοβο- λών	344
7.7.2	CVD-επικαλύψεις	346
7.7.3	CVD Αδαμαντοεπικαλύψεις	348

Κεφάλαιο 8

351

Κατεργαστικότητα υλικών κατά την κοπή με εργαλεία

προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης.

Συνεισφορά του ψυκτικού-λιπαντικού μέσου

8.1	Κατεργαστικότητα σιδηρούχων υλικών, χαλύβων και χυτοσιδήρων	355
8.1.1	Επίδραση της θερμικής κατεργασίας χαλύβων επί της κατεργαστι- κότητας	360
8.1.1.1	Επίδραση επί της κατεργαστικότητας, της θερμοκρασί- ας ωστενιτοποίησης και της ταχύτητας συνεχούς απόψυ- ξης, κατά ανοπτήσεις επηρεασμού μεγέθους των κόκκων	361
8.1.1.2	Επίδραση επί της κατεργαστικότητας, του χρόνου και της θερμοκρασίας επαναφοράς, μαρτενιτικά βαμμένων χα- λύβων	366
8.1.1.3	Επίδραση επί της κατεργαστικότητας, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας απόψυξης, κατά ισοθερμοκρασιακή, ή συνεχή απόψυξη αντίστοιχα	370
8.1.1.4	Επίδραση του μεγέθους χυτευμένων τεμαχίων, και αυτών που υπέστησαν συνεχή απόψυξη, ή προκατεργασίες με παραμόρφωση υλικού, επί της κατεργαστικότητας	375
8.1.2	Κατεργαστικότητα σκληρυμένων χαλύβων	377
8.1.3	Αυτόματοι χάλυβες, αυξημένης κατεργαστικότητας, μέσω προσθή- κης μικροπροσμίξεων	381
8.1.4	Κατεργαστικότητα ανοξειδίων χαλύβων	383
8.1.5	Κατεργαστικότητα των χυτοσιδήρων	388
8.1.5.1	Λευκοί χυτοσίδηροι	388
8.1.5.2	Φαιοί χυτοσίδηροι	389
8.1.6	Επίδραση μικροπροσμίξεων, που χρησιμοποιούνται για την απο- ξειδωση τήγματος χάλυβα, επί της κατεργαστικότητάς του κατά την κοπή	391
8.1.7	Επίδραση των συνθηκών κατεργασίας επί της κατεργαστικότητας των χαλύβων	393

8.2	Κατεργαστικότητα κραμάτων αλουμινίου Al, μαγνησίου Mg και χαλκού Cu κατά την κοπή	396
8.2.1	Κράματα αλουμινίου	397
8.2.2	Κράματα μαγνησίου	402
8.2.3	Κράματα χαλκού	403
8.3	Κατεργαστικότητα κραμάτων τιτανίου και νικελίου	404
8.3.1	Κράματα τιτανίου	407
8.3.2	Κράματα νικελίου	418
8.4	Κατεργαστικότητα γραφίτη	425
8.5	Κατεργαστικότητα συνθέτων υλικών	426
8.6	Επίδραση ψυκτικού-λιπαντικού στην κατεργαστικότητα κατά την κοπή	427
8.6.1	Ψυκτικά-λιπαντικά υγρά	428
8.6.2	Επίδραση των ψυκτικών-λιπαντικών στην κατεργαστικότητα κατά την κοπή	430
8.6.3	Επίδραση της ποσότητας και του τρόπου προσαγωγής του ψυκτικού-λιπαντικού μέσου επί της κατεργαστικότητας	433

Κεφάλαιο 9

439

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	443
9.1.1	Μαθηματική περιγραφή της διάρκειας χρησιμοποίησης του κοπτικού εργαλείου	444
9.1.2	Μαθηματική περιγραφή της χρονικής μεταβολής της φθοράς επιφανείας ελευθερίας	455
9.2	Αναλυτική περιγραφή του κόστους των κατεργασιών συναρτήσει του χρόνου παραγωγής ανά μονάδα παραγωγής και εργαλειομηχανή	458
9.2.1	Μαθηματική διατύπωση του χρόνου κατεργασίας	458
9.2.2	Μαθηματική διατύπωση του κόστους κατεργασίας	460
9.3	Βελτιστοποίηση των κυρίων συνθηκών κατεργασίας κοπής	462
9.3.1	Βελτιστοποίηση της ταχύτητας κοπής	463
9.3.1.1	Βελτιστοποίηση της ταχύτητας κοπής με κριτήριο το ελάχιστο κόστος κατεργασίας	463

9.3.1.2	Βελτιστοποίηση της ταχύτητας κοπής με κριτήριο τον ελάχιστο χρόνο κατεργασίας	466
9.3.2	Βελτιστοποίηση της πρόωσης	466
9.3.3	Βελτιστοποίηση του βάθους κοπής	468
9.3.4	Περιορισμοί των συνθηκών κατεργασίας κατά τη βελτιστοποίησή τους	469
9.3.5	Παραδείγματα βελτιστοποίησης συνθηκών κατεργασίας	473
9.4	Επιτήρηση συνθηκών κατεργασίας	474

Κεφάλαιο 10

479

Χαρακτηριστικές γεωμετρίες εργαλείων προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης

10.1	Συμπαγή εργαλεία	481
10.2	Εργαλεία με ένθετα πλακίδια	483
10.2.1	Εργαλεία με επικολλημένα ένθετα πλακίδια	483
10.2.2	Εργαλεία με πρόσδεση ενθétων κοπτικών πλακιδίων	485
10.3	Τυποποιήσεις ενθétων κοπτικών πλακιδίων	490

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

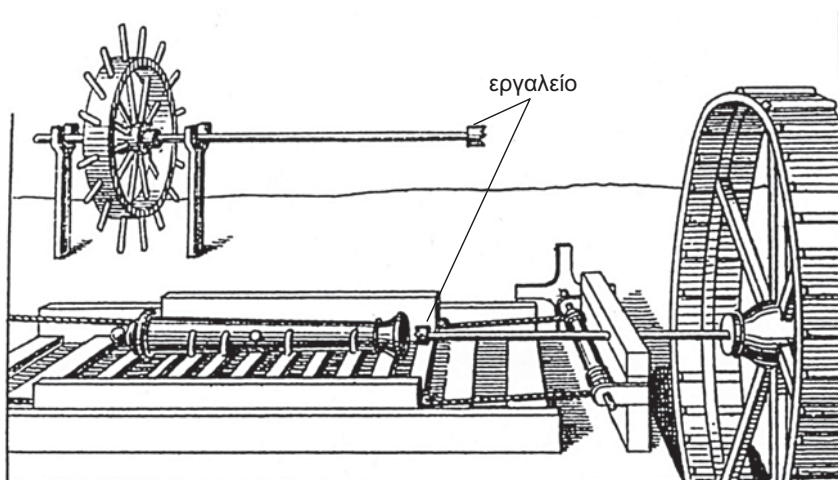
Οι δυνατότητες μορφοποίησης εργαλείων, όπλων, χρηστικών αντικειμένων κα, συνέβαλαν αποφασιστικά στην επιβίωση και εξέλιξη του πρώιμου ανθρώπου. Τέτοιες δυνατότητες παρείχαν σπασμένες πέτρες, με κατάλληλο σχήμα, που τις χρησιμοποιούσαν οι πρωτόγονοι άνθρωποι, προκειμένου να δώσουν σε ένα κομμάτι υλικού την επιθυμητή μορφή, μέσω τεμαχισμού, πριονίσματος, λιμαρίσματος κλπ. Κοινό χαρακτηριστικό όλων αυτών των διαδικασιών, ήταν η αφαίρεση υλικού από ένα τεμάχιο, συνήθως με κάποια μορφή κοπής, με τη βοήθεια ενός αιχμηρού άκρου. Από όταν ο άνθρωπος άρχισε να χρησιμοποιεί αντί λίθους, μέταλλα και συγκεκριμένα κράματα χαλκού και στη συνέχεια σιδήρου, η εξέλιξη των εργαλείων ήταν ραγδαία. Η χρησιμοποίηση των προηγούμενων υλικών χαρακτηρίζει 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”. Η χρησιμοποίηση τórνων για κατασκευές μεταλλικών αντικειμένων, όπως κυλινδρικών σφικτήρων από μπρούντζο, συνδετικών στοιχείων σπονδύλων κίωνων, τεκμηριώνεται μέσω της εικονιζομένης στο **σχήμα 1.1** επιγραφής του 4^{ου} αιώνα π.Χ., που ανακαλύφθηκε κατά ανασκαφές στην Ελευσίνα [ΒΑΡ 96]. Στην επιγραφή, δίδονται οδηγίες για την κατασκευή μεταλλικών κυλινδρικών σφικτήρων με μορφοποίηση, όπως αυτή του τορναρίσματος αντικείμενων από ξύλο. Επειδή όμως το τορνάρισμα μεταλλικών αντικειμένων, προϋποθέτει την ύπαρξη σκληρών εργαλείων, δυναμένων να αντιμετωπίσουν τα δημιουργούμενα φορτία κατά την κοπή, καθώς και στιβαρές μηχανικές διατάξεις, φαίνεται ότι οι σχετικές μηχανουργικές τεχνικές, ήταν γνωστές ήδη από την περίοδο αυτή. Επίσης, η εφαρμογή και άλλων μηχανουργικών μορφοποιήσεων κατά την αρχαιότητα και μέχρι τον 17^ο αιώνα, όπως της διάτρησης, του πριονισμού κα, περιγράφονται σε διάφορα κείμενα.

Ενδεικτική είναι η αναπαράσταση διαδικασίας βαθείας διάτρησης πυροβλητικών σωλήνων κανονιών, προερχόμενη από το έτος 1540, που φαίνεται στο **σχήμα 1.2** [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 εικονιζομένου μεγάλου τροχού, η δε πρόωση με έλξη του ολισθαίνοντος φορείου του τεμαχίου, επί κατάλληλα διαμορφωμένου επιπέδου, μέσω σχοινιών, που τυλιγόντουσαν σε χειροκίνητα περιστρεφόμενο κύλινδρο.

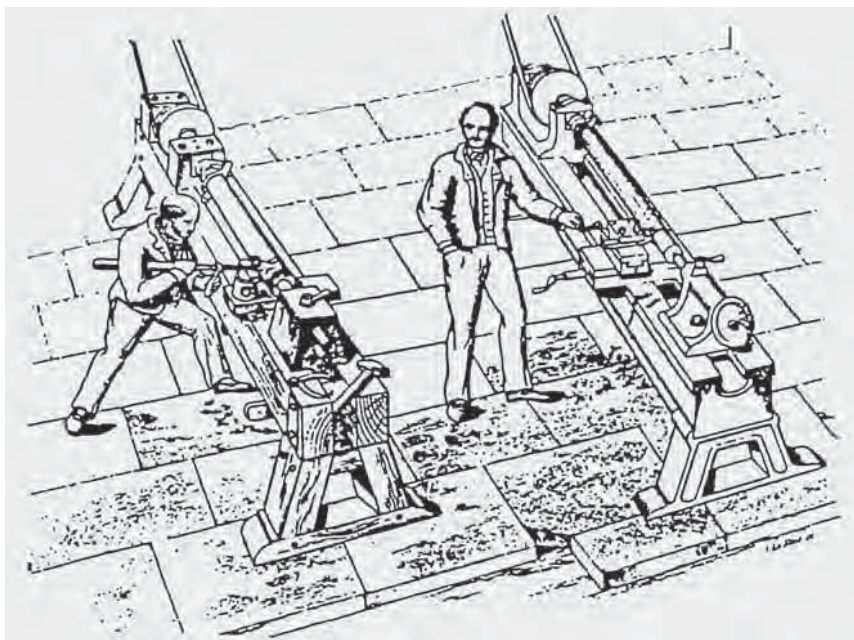
Σχήμα 1.1:

Αρχαία επιγραφή από την Ελευσίνα (~4^{ος} αιώνας π.Χ.), στην οποία γίνεται διάκριση μεταξύ τορναρίσματος μεταλλικών και ξύλινων τεμαχίων.



Σχήμα 1.2: Μηχανική διάταξη εργαλειομηχανής βαθείας διάτρησης πυροβλητικών σωλήνων (Vannucio Biringuccio, 1540).

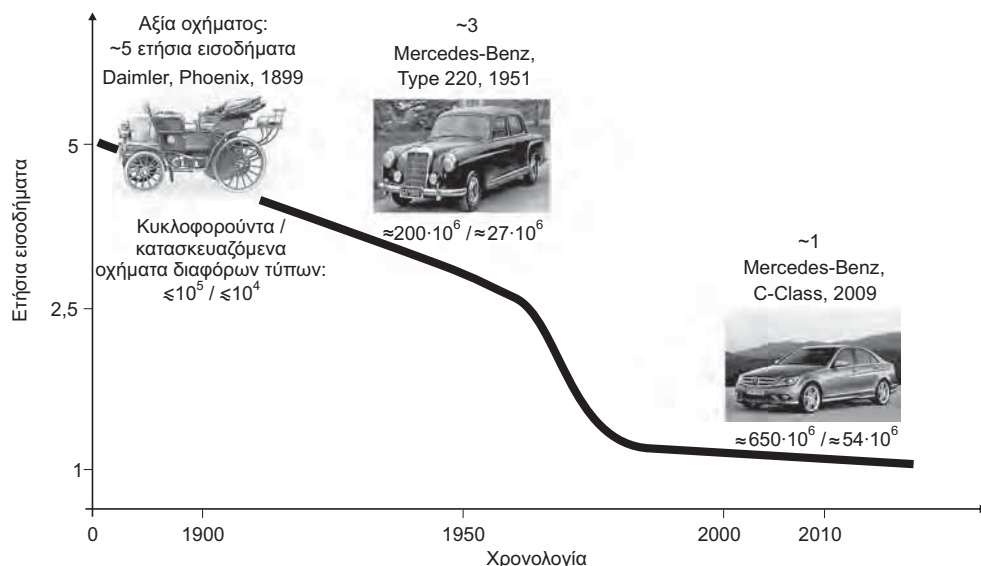
Η βιομηχανική επανάσταση του 18^{ου} αιώνα και η χρησιμοποίηση των ατμο-μηχανών, για την κίνηση ατράκτων εργαλειομηχανών μέσω ιμάντων, αποτέλεσε σταθμό για την εξέλιξη των μηχανουργικών μορφοποιήσεων και των σχετικών εργαλειομηχανών. Σύνθετοι μηχανισμοί για τη στήριξη και τη μηχανική καθοδήγηση των εργαλείων, άρχισαν να αναπτύσσονται ήδη από τον 19^ο αιώνα. Χαρακτηριστική είναι η απεικόνιση του έτους 1841, που παρουσιάζεται στο **σχήμα 1.3** και προβάλλει τα πλεονεκτήματα, που προκύπτουν για τον χειριστή τόρνου 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.



Σχήμα 1.3: Χειροκίνητη και μηχανική καθοδήγηση εργαλείου τόρνου (Nasmyth, 1841).

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 αυτοκινητο-

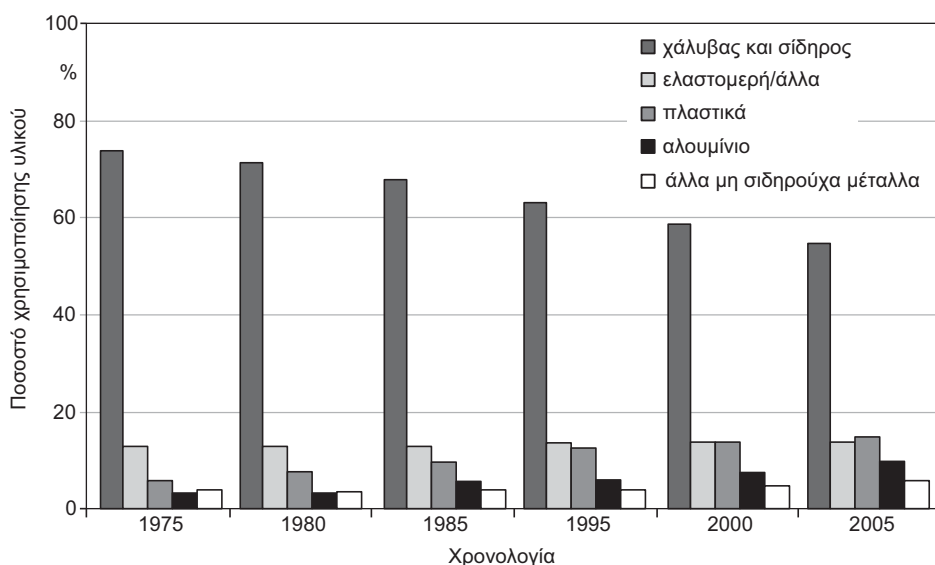
βιομηχανίας, τυπικής δραστηριότητας μαζικής παραγωγής εξαρτημάτων μέσω μηχανουργικών μορφοποιήσεων, αντιπροσωπευτικά μεγέθη της οποίας παρατίθενται στο **σχήμα 1.4**. Το 1900 κυκλοφορούσαν παγκοσμίως, κατ' εκτίμηση, λιγότερα από εκατό χιλιάδες οχήματα, ενώ σήμερα, περισσότερα από 650 εκατομμύρια. Αντίστοιχα, 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 να αξίζει ένα ετήσιο εισόδημα, 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 παραγωγή έχει επιμεριστεί σε μικρότερες παρτίδες, το κόστος όμως παραγωγής ανά τεμάχιο έχει περιοριστεί δραστικά. Αυτό επιτεύχθηκε, λόγω της δυνατότητας μορφοποίησης τεμαχίων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, στην ίδια σειρά παραγωγής, μέσω εφαρμογής συγχρόνων μεθόδων επιτήρησης και αυτόματης κα-



Σχήμα 1.4: Ενδεικτική αξία και πλήθος κυκλοφορούντων και κατασκευαζομένων οχημάτων.

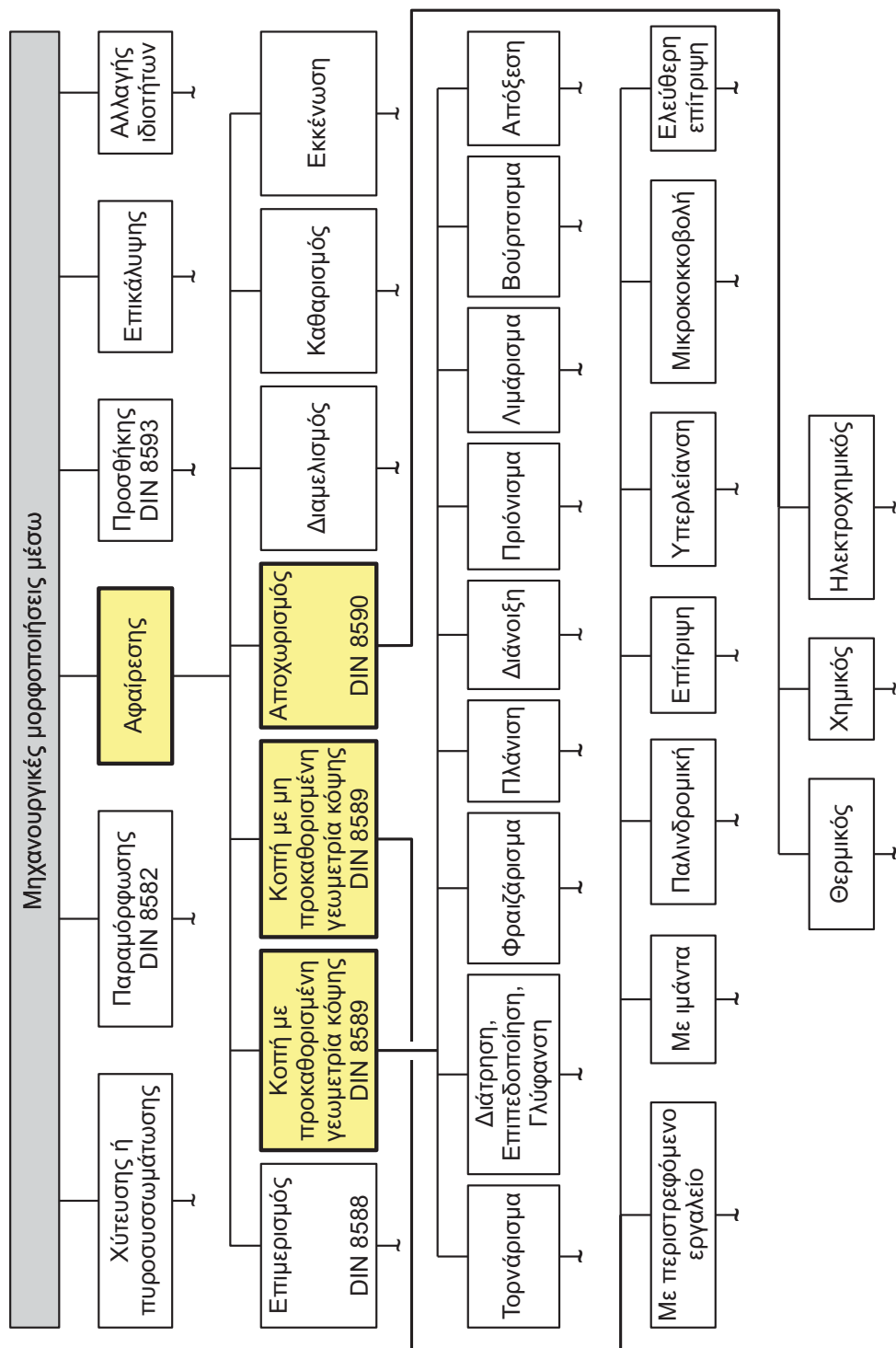
θοδήγησης όλων των σχετικών διαδικασιών. Επίσης, στο στόχο αυτό συνέβαλε και η κατασκευή συνθέτων εργαλείων και μηχανών, που επιτρέπουν τη διεξαγωγή περισσότερων μορφοποιήσεων σε μια μόνο εργαλειομηχανή, ενώ προηγουμένως ήσαν απαραίτητες πολλές.

Σήμερα, το κυρίως χρησιμοποιούμενο υλικό στην αυτοκινητοβιομηχανία και γενικά στη βιομηχανία μέσω μεταφοράς, εξακολουθεί να είναι ο σίδηρος, ενώ στις αεροδιαστημικές κατασκευές είναι τα κράματα του τιτανίου, αλουμινίου, νικελίου, καθώς και τα σύνθετα υλικά. Στο **σχήμα 1.5** φαίνονται τα κυρίως κατεργαζόμενα υλικά στην αυτοκινητοβιομηχανία. Το αλουμίνιο, τα πλαστικά και άλλα μη σιδηρούχα μέταλλα, εκτοπίζουν συνεχώς τα σιδηρούχα κράματα και δημιουργούν ανάγκες έρευνας, αλλά και εξέλιξης νέων μεθόδων μορφοποίησης.



Σχήμα 1.5: Χρησιμοποιούμενα υλικά στην αυτοκινητοβιομηχανία (κατά Daimler AG).

Μια συστηματική ταξινόμηση των τεχνικών των μορφοποιήσεων, σύμφωνα με το Γερμανικό κανονισμό DIN 8589, εκτίθεται στο **σχήμα 1.6**. Στο σχήμα επεξηγείται εκτενέστερα η περιοχή (3), των μηχανουργικών κατεργασιών με αφαίρεση υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή γεωμετρία. 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 περιο-



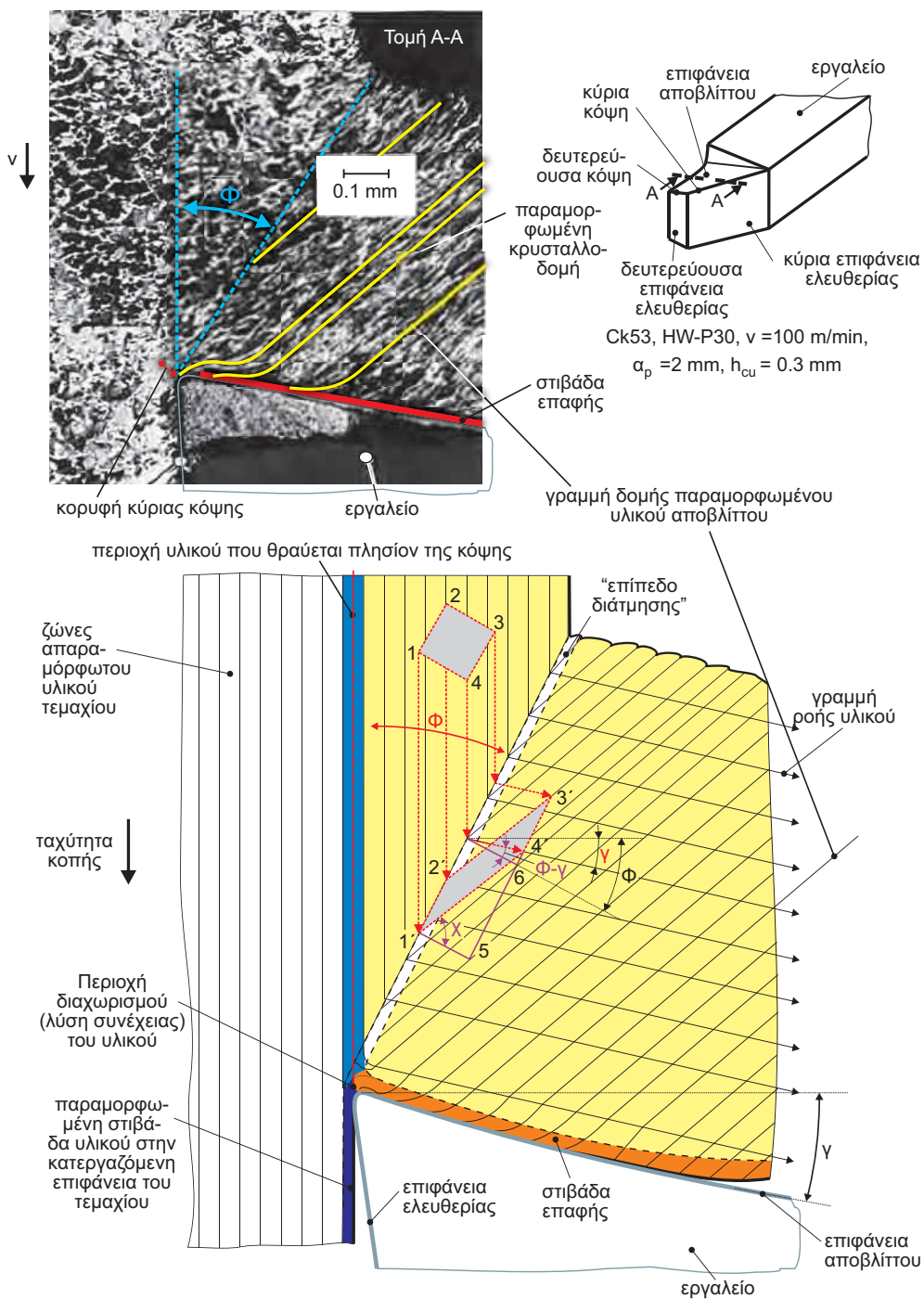
Σχήμα 1.6: Ταξινόμηση των μηχανουργικών μορφοποιήσεων, σύμφωνα με το Γερμανικό κανονισμό DIN 8589.

χή 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].

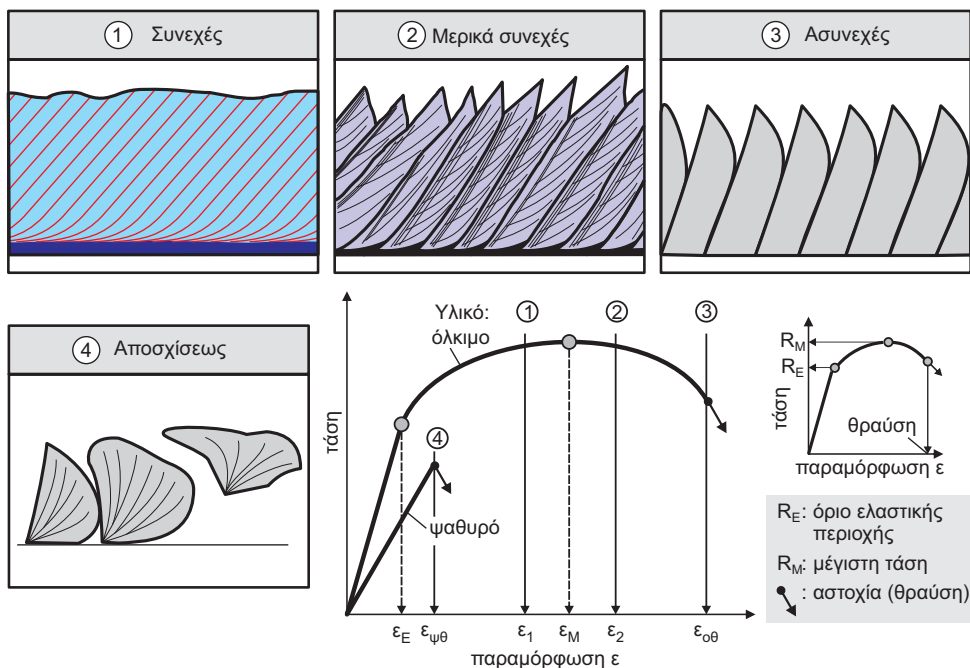
Κατά όλες τις μηχανουργικές μορφοποιήσεις με αφαίρεση υλικού, μέσω των μνημονευθέντων μηχανισμών της παραμόρφωσης, ή υγροποίησης, ή εξαέρωσης, ή χημικής προσβολής του υλικού, επιχειρείται ο αποχωρισμός μικρών ποσοτήτων της ύλης από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, που χαρακτηρίζονται σαν απόβλιττα. Ο όρος απόβλιττο προέρχεται από το αρχαίο ρήμα αποβλίττω, που περιγράφει την ενέργεια αποχωρισμού ενός υλικού από ένα τεμάχιο, μέσω μίας ιδιοσυσκευής, ή με τη βοήθεια κατάλληλης μηχανικής διάταξης.

Η αποτελεσματική χρησιμοποίηση των μηχανουργικών μορφοποιήσεων και των σχετικών εργαλειομηχανών, στις διάφορες περιπτώσεις κατεργασίας υλικών, προϋποθέτει τεκμηριωμένες γνώσεις, σχετικές με τους μηχανισμούς, που λαμβάνουν χώρα κατά την επενέργεια ενός εργαλείου, ή την προσαγωγή ενέργειας, προκειμένου από την αρχική γεωμετρία ενός αντικειμένου να προκύψει μια άλλη. Το παρόν σύγγραμμα πραγματεύεται τους μηχανισμούς αυτούς, κατά τις μορφοποιήσεις μέσω κοπής με προκαθορισμένη, ή μη γεωμετρία κόψης, καθώς και μέσω αποχωρισμού του υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Το σύγγραμμα εισάγει τον αναγνώστη στα εργαλεία και τις τεχνικές, που συμβάλουν στην κατάλληλη χρησιμοποίηση των σχετικών μεθόδων μορφοποίησης, για την επίτευξη ενός τεχνοοικονομικά βέλτιστου αποτελέσματος, όπως επίσης και στόχων, που επιβάλλονται από την ορθολογική χρησιμοποίηση των διατιθεμένων πηγών ενέργειας. Επίσης, ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στα φαινόμενα, που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεξαγωγή των διαφόρων κατεργασιών, καθώς και στους τρόπους της θεωρητικής προσέγγισής τους. Τοιουτοτρόπως, αποσκοπείται η δυνατότητα κατανόησης και περιγραφής των πολυπλόκων μηχανισμών, που εξελίσσονται κατά τις μηχανουργικές μορφοποιήσεις με αφαίρεση υλικού και επηρεάζουν τη διαστατική ακρίβεια του τεμαχίου, τις εν γένει ιδιότητές του και τη συμπεριφορά του κατά την χρησιμοποίησή του. Οι εξελίξεις των τεχνικών υπολογισμών και ειδικά αυτών με χρησιμοποίηση της μεθόδου των πεπε-

ρασμένων στοιχείων (FEM), παρέχουν σήμερα εξαιρετικές δυνατότητες μαθηματικής προσέγγισης συνθέτων μηχανισμών παραμόρφωσης-αστοχίας των κατεργαζομένων υλικών, καθιστώντας εφικτή τη διερεύνηση όλων των σχετικών παραμέτρων, επί της πορείας διεξαγωγής μίας διαδικασίας μορφοποίησης, καθώς και επί του αποτελέσματός της, δηλαδή επί των εν γένει ιδιοτήτων του ετοίμου τεμαχίου. Καινοτομίες στην περιοχή των εργαλείων, όπως π.χ. η χρησιμοποίηση λεπτών σκληρών προστατευτικών επικαλύψεων, καθώς και κοπτικών υλικών με προηγμένες ιδιότητες, βελτιώνουν δραστικά την αποτελεσματικότητα των μεθόδων μορφοποίησης και για το λόγο αυτό, δίδεται έμφαση στις σχετικές εφαρμογές. Τέλος, το παρόν σύγγραμμα πραγματεύεται την κατεργαστικότητα διαφόρων τυπικών κατασκευαστικών υλικών, όπως των χαλύβων, χυτοσιδήρων, κραμάτων αλουμινίου, τιτανίου, νικελίου κα, τα μέτρα, για την απρόσκοπτη διεξαγωγή των σχετικών κατεργασιών, καθώς και τη βελτιστοποίηση των διαφόρων παραμέτρων τους.



Σχήμα 3.8: Περιοχή δημιουργίας αποβλήτου κατά την κοπή.

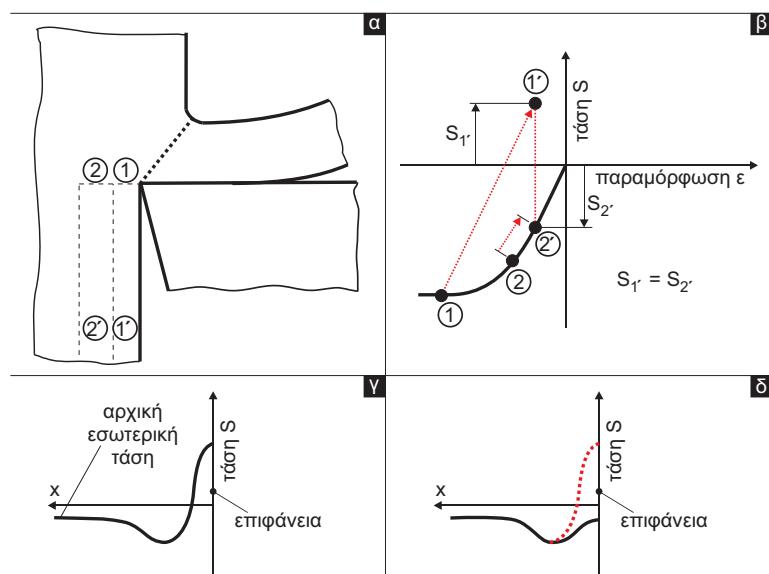


Σχήμα 3.13: Χαρακτηριστικές μικροδομές αποβλίπτων διαφόρων υλικών.

τητα κοπής και το απόβλιττο είναι ελαφρά κυρτωμένο. Η έντονα παραμορφωμένη στιβάδα του υλικού στην κάτω επιφάνεια του αποβλίττου είναι διακριτή σε διαμήκη τομή του. Εάν μέσω των συνθηκών κατεργασίας, η παραμόρφωση του υλικού αυξηθεί έως τις τιμές ϵ_2 και $\epsilon_{οθ}$, το απόβλιττο με μικρή επιπλέον ή χωρίς επιπρόσθετη παραμόρφωση αντίστοιχα, θραύεται. Στην διαμήκη τομή των αποβλίπτων 2 και 3 λόγω της διαρροής επί του επιπέδου διάτμησης, η κλίση του επιπέδου αυτού γίνεται αντιληπτή. Στο μερικά ασυνεχές απόβλιττο παρουσιάζεται περιορισμένη στιβάδα υψηλής παραμόρφωσης στην κάτω επιφάνειά του, η οποία και συγκρατεί τις επιμέρους κεκλιμένες περιοχές του, ανάμεσα στις οποίες το υλικό έχει σχεδόν ή πλήρως χάσει τη συνέχειά του λόγω υψηλής διάτμησης. Στο ασυνεχές απόβλιττο η δημιουργούμενη κύρτωση είναι αμελητέα και οι επιμέρους περιοχές του, δύναται ήδη κατά την κοπή να κατακερματισθούν. Από την άλλη πλευρά, εάν ένα ψαθυρό υλικό φορτιστεί στο επίπεδο διάτμησης μέχρι την παραμόρφωση θραύσης του $\epsilon_{ψθ}$, δημιουργούνται απόβλιττα απόσχισης και προκαλείται σημαντική χειροτέρευση της ποιότητας της κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου. Σε όλο το επίπεδο διάτμησης, όπως και στην κορυφή της κόψης, αναπτύσσεται τάση οριακής ελαστικής παραμόρφωσης, που είναι πρακτικά ίση με την τάση θραύσης στην περιοχή του ψαθυ-

3.4.2 Υπολογισμός παραμενουσών τάσεων στις επιφάνειες των κατεργαζομένων τεμαχίων

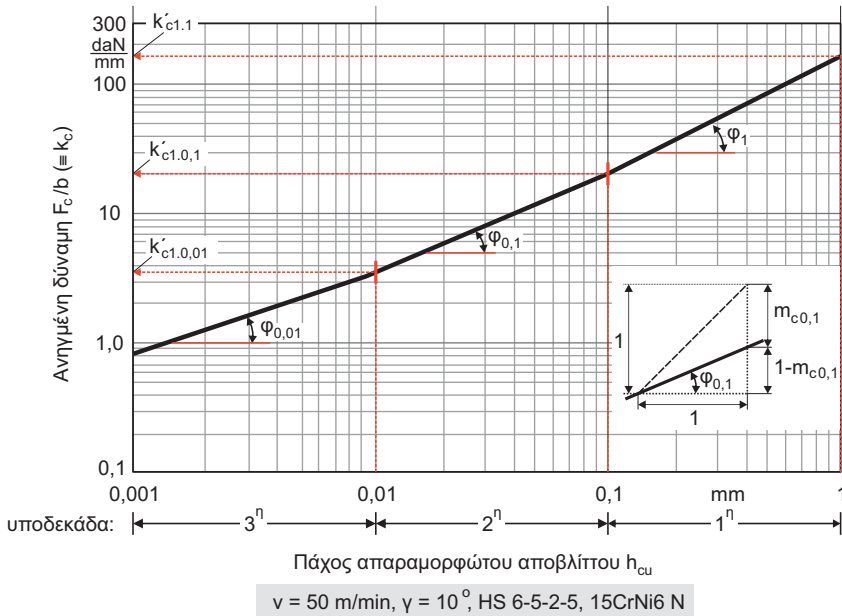
Με τη βοήθεια FEM-υπολογισμών προσεγγίζεται και η κατανομή των παραμενουσών τάσεων στην περιοχή της τελικής επιφάνειας του κατεργαζομένου τεμαχίου. Οι τάσεις αυτές μπορούν να υπολογισθούν επί της επιφάνειας του τεμαχίου, παράλληλα ή σε τυχαία διεύθυνση προς αυτήν καθώς και οι κατανομές τους προς το εσωτερικό του υλικού. Οι παραμένουσες τάσεις δημιουργούνται λόγω της πλαστικής επιφανειακής παραμόρφωσης του τεμαχίου κατά την κοπή, όπως αναφέρθηκε στο σχήμα 3.9. Για να γίνει αντιληπτή η πορεία μεταβολής των παραμενουσών τάσεων, ας υποθεθεί ότι κατά την κοπή, παραμορφώνονται, λόγω της πίεσης της κορυφής του κοπτικού σφύνα επί της δημιουργούμενης τελικής επιφάνειας, δύο διακριτές περιοχές του υλικού, οι 1 και 2 (βλέπε **σχήμα 3.24** διάγραμμα α). Εκ των περιοχών αυτών, η 1 θεωρείται ότι παραμορφώνεται πλαστικά και η 2 ελαστικά, όπως εικονίζεται και στο διάγραμμα β. Μετά το πέρας της επαφής του εργαλείου με την επιφάνεια, τόσο η περιοχή 1' όσο και η 2' προσπαθούν να αποσυμπιεστούν, με νόμο υλικού για την 1', παράλληλο προς την ευθεία της ελαστικής παραμόρφωσης και για την περιοχή 2 ελαστικά. Για να αποκατασταθεί ισορροπία μεταξύ των περιοχών 1' και 2', οι σχετικές τάσεις $S_{1'}$ και $S_{2'}$ σε μια τυχαία διεύθυνση ως προς την επιφάνεια του τεμαχίου, πρέπει να είναι ίσες και αντίθετες. Τοιουτοτρόπως η περιοχή 1' εφελκύεται,



Σχήμα 3.24: Δημιουργία παραμενουσών τάσεων στην τελική επιφάνεια του κατεργαζομένου τεμαχίου κατά την κοπή.

Τα υπεισερχόμενα μεγέθη στη σχέση αυτή, επεξηγούνται στο **σχήμα 4.28**. Με απλή μαθηματική επεξεργασία της προηγούμενης σχέσης, προκύπτει η εξίσωση:

$$F = k'_{c1,0,1} \cdot b \cdot h_{cu}^{\tan \varphi_{0,1}} \cdot 10^{\tan \varphi_{0,1}} \quad (4.29)$$



Σχήμα 4.28: Προσδιορισμός της ειδικής δύναμης κοπής και του σχετικού εκθέτη, σε περιοχές υποδεκάδων του πάχους απαραμορφώτου αποβλήτου.

Με τον ίδιο τρόπο, όπως προηγουμένως περιγράφηκε, προσδιορίζεται γραφικά η εφαπτομένη της γωνίας $\varphi_{0,1}$, που περιγράφεται από τον εκθέτη $m_{c0,1}$. Επίσης η ειδική δύναμη κοπής $k_{c1,0,1}$, ανάγεται τώρα, σε διατομή αποβλήτου πλάτους b ίσου με 1 mm, πάχους όμως 0,1 mm. Ισχύει δηλ. ότι:

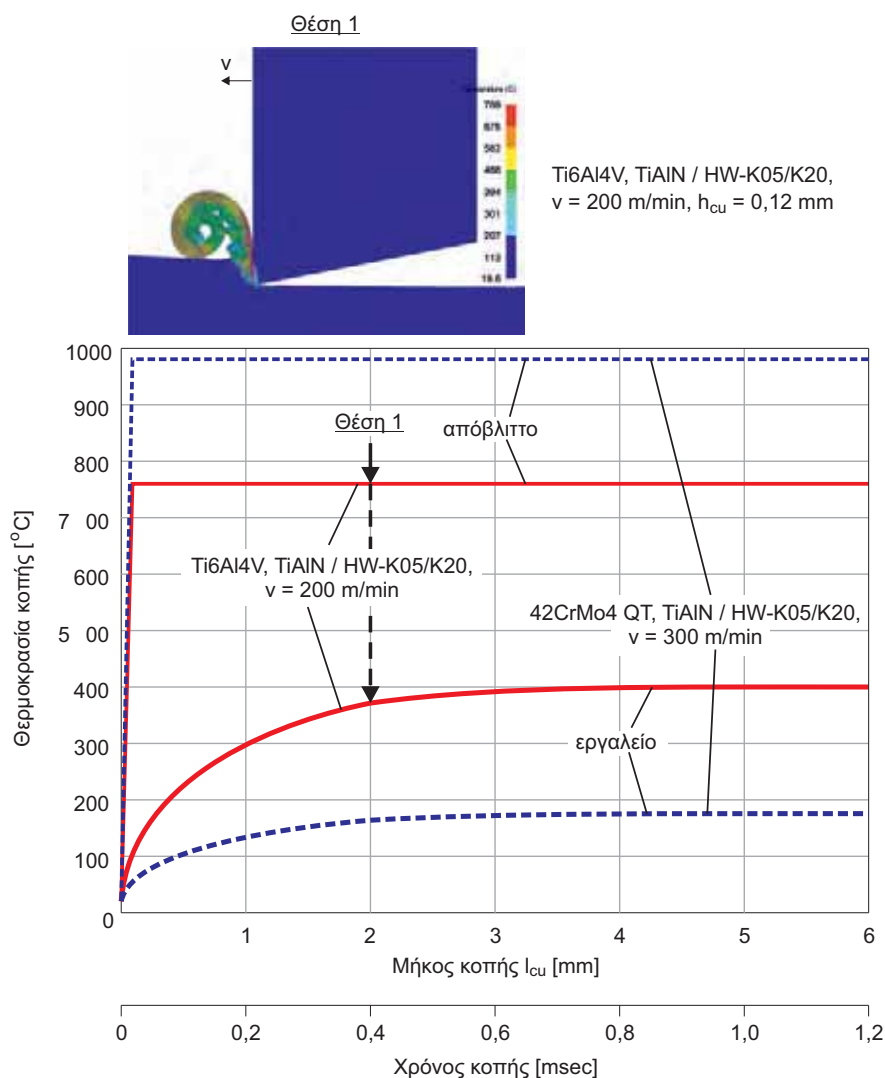
$$k_{c1,0,1} = 10 \cdot k'_{c1,0,1} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (4.30)$$

Γενικά, για την n -οστή υποδεκάδα πάχους αποβλήτου, οι σχέσεις (4.29) και (4.30) λαμβάνουν την μορφή:

$$F_i = k'_{i1, (1/10^{n+1})} \cdot b \cdot n_{cu}^{\tan \varphi_{(1/10^{n+1})}} \cdot 10^{-(n+1) \tan \varphi_{(1/10^{n+1})}} \quad (4.31)$$

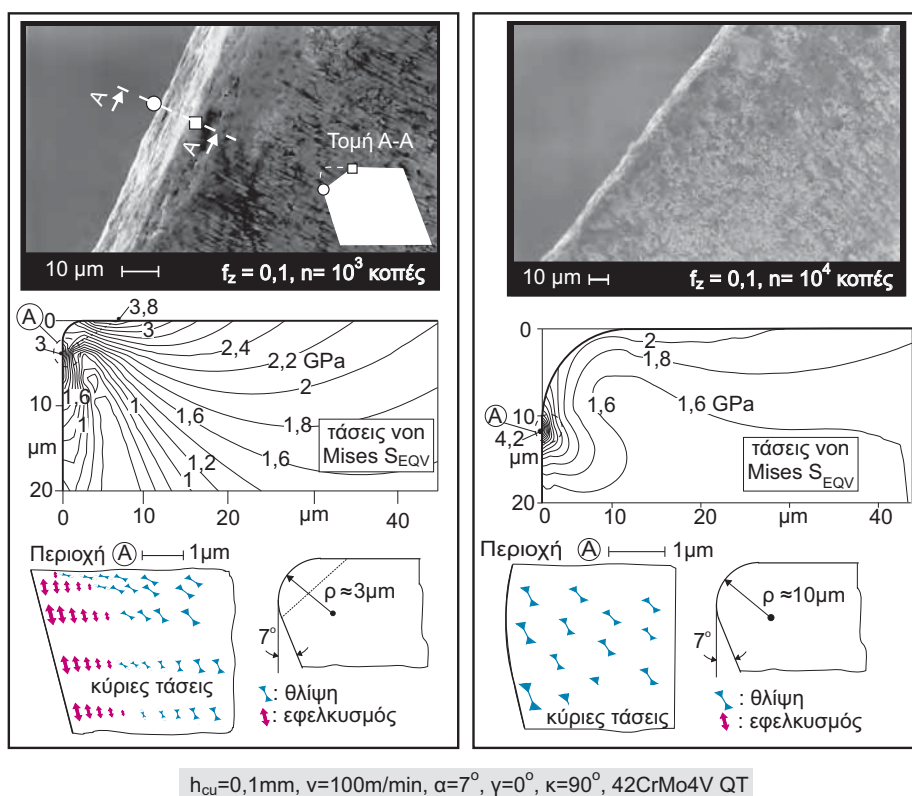
όπου i αντιστοιχεί στις διευθύνσεις των συνιστωσών της δύναμης κοπής c , f και p . Επίσης:

ου υλικού, προκαλεί τη μείωση της θερμοκρασίας του αποβλίττου και σε συνέπεια αυτής, συγχρόνως την αύξηση της θερμοκρασίας του εργαλείου, συγκριτικά με αντίστοιχες τους κατά το φραιζάρισμα του σκληρυμένου χάλυβα. Κατά την κοπή του χάλυβα η ταχύτητα κοπής είναι μάλιστα πλέον αυξημένη σε σχέση με αυτήν κατά το φραιζάρισμα του TiAl6V4.

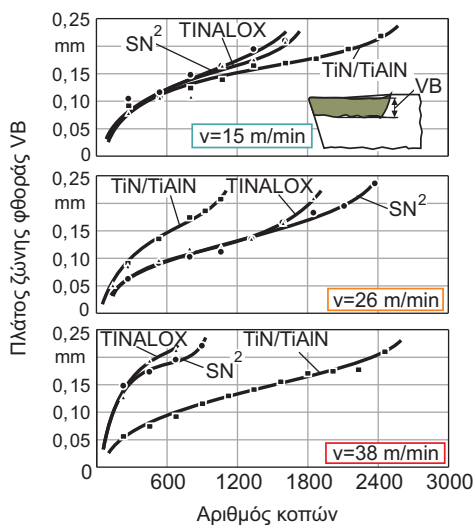
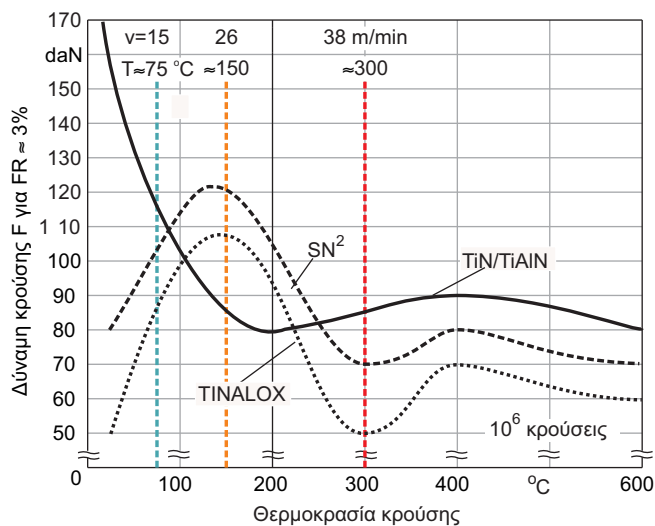


Σχήμα 4.44: Εξέλιξη θερμοκρασίας κατά το φραιζάρισμα σκληρυμένου χάλυβα και κράματος τιτανίου.

Ένα περαιτέρω παράδειγμα άμεσης αστοχίας εργαλείου λόγω θραύσης της κόψης, που προκαλείται από υψηλές εφελκυστικές τάσεις, στον κοπτικό σφήνα σκληρομετάλλου, εκτίθεται στο **σχήμα 5.2**. Λόγω της μικρής ακτίνας καμπυλότητας, περίπου 3 μm , του μη επικαλυμμένου εργαλείου, η ανάλυση σε κυρίες τάσεις των ισοδυνάμων κατά von Mises τάσεων στη μεταβατική περιοχή της κόψης, από την επιφάνεια αποβλίττου προς την ελευθερίας, αποκαλύπτει υψηλές εφελκυστικές τάσεις. Οι τάσεις αυτές, λαμβάνοντας υπόψη την ανισοτροπία των ιδιοτήτων σε εφελκυσμό και θλίψη, του κονιομεταλλουργικά παραγμένου σκληρομετάλλου, οδηγούν στην εικονιζόμενη στο σχήμα θραύση της κοπτικής ακμής. Από την άλλη πλευρά, κατά την αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας ρ από 3 σε 10 μm , διατηρείται μεν η συγκέντρωση των ισοδυνάμων von Mises τάσεων στη μεταβατική περιοχή, αποφεύγονται όμως πλήρως οι εφελκυστικές κύριες τάσεις και η κοπτική ακμή αντέχει τις συμπιεστικές κοπτικές καταπονήσεις.



Σχήμα 5.2: Τάσεις στον κοπτικό σφήνα, εργαλείων από σκληρομέταλλο με μικρή και μεγάλη καμπυλότητα ακμής.

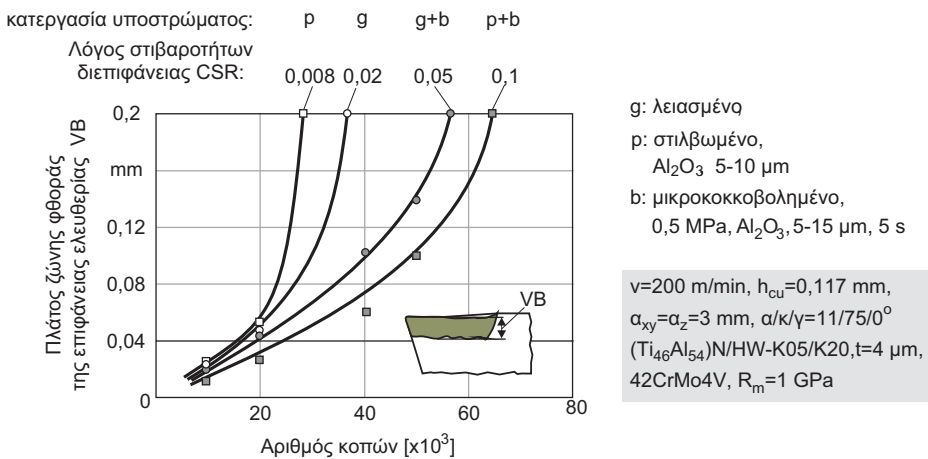


$\alpha_z=2 \text{ mm}$, $\alpha_{xy}=0,04 \text{ mm}$, $\alpha/k/\gamma=11/75/0^\circ$, $\rho_{\text{eff}} \approx 10 \text{ }\mu\text{m}$,
 $l_{\text{cu}}=3,2 \text{ mm}$, $h_{\text{cu}}=0,06 \text{ mm}$, HW-K05/K20, Inconel 718

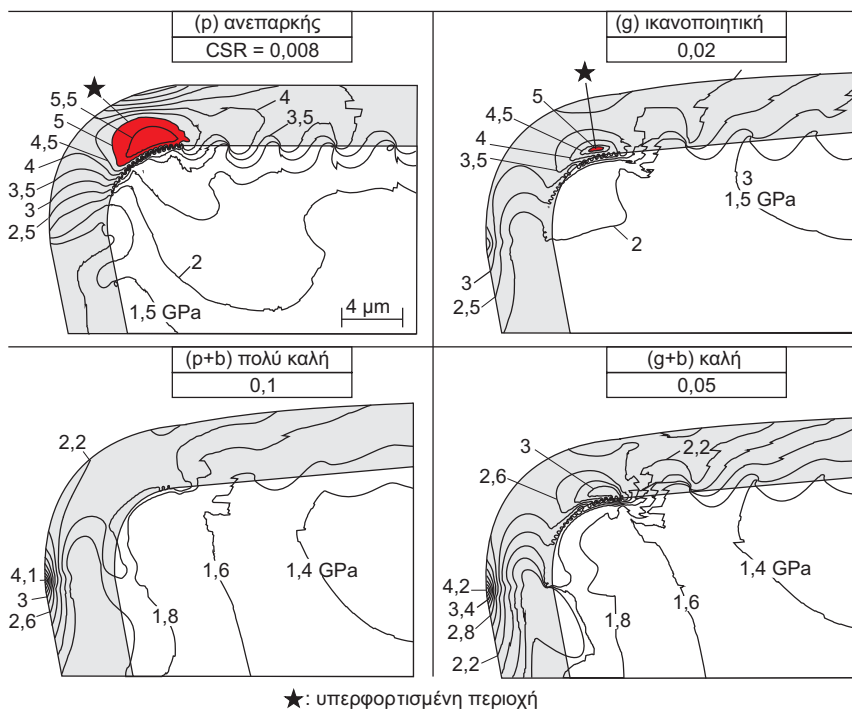
Σχήμα 6.43:

Συσχέτιση της αντοχής επικαλύψεων σε επαναλαμβανόμενη κρούση και σε φθορά με βάση τις μέγιστες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες.

σκολοκατέργαστου υλικού Inconel 718, του οποίου τα χαρακτηριστικά θα περιγραφούν στο κεφάλαιο περί κατεργαστικότητας των υλικών, η μέγιστη θερμοκρασία κοπής αναπτύσσεται στην περιοχή της κόψης και με μικρή άνοδο της ταχύτητας κοπής αυξάνεται έντονα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, με αύξηση της ταχύτητας κοπής από 15 μόνο σε 38 m/min, η θερμοκρασία μεγαλώνει απότομα σε 300°C [BOU 07.4]. Μια σύγκριση των συμπεριφορών των εξεταζομένων επικαλύψεων σε εναλλασσόμενη κρούση και σε φθορά κατά την κο-

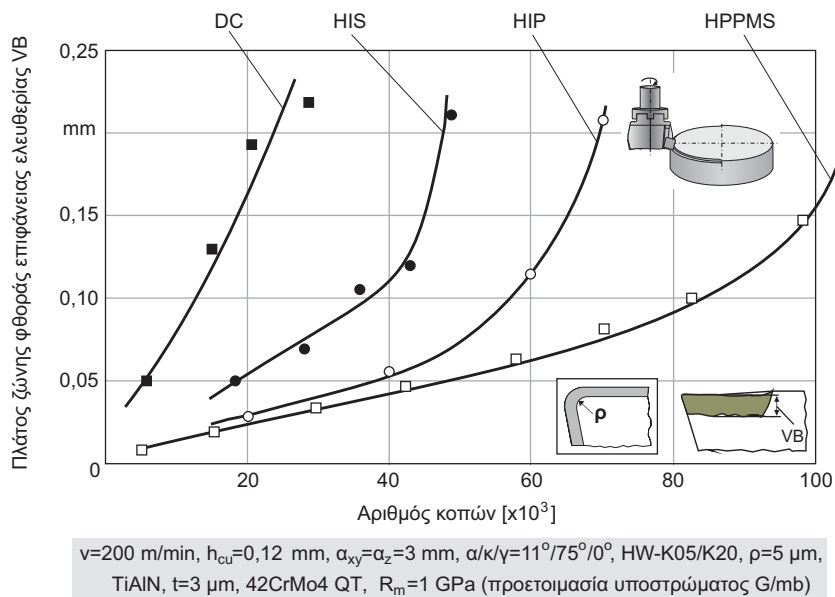


Σχήμα 6.50: Εξέλιξη της φθοράς της επιφάνειας ελευθερίας για διάφορες περιπτώσεις κατεργασίας υποστρώματος και συνεπακόλουθης ποιότητας συνάφειας.



Σχήμα 6.51: Κατανομή τάσεων στην κοπτική ακμή επικαλυμμένων πλακιδίων σκληρομετάλλου σε υποστρώματα διαφορετικής ποιότητας συνάφειας.

βομβαρδισμό των στόχων και την παραγωγή του πλάσματος οι προηγούμενες περιγραφείσες μεθοδολογίες. Η σταδιακή αύξηση του ενεργειακού δυναμικού του πλάσματος, μέσω των διαδικασιών DC, HIS, HIP και τέλος HPPMS, οδήγησε σε σημαντικές βελτιώσεις της συνάφειας και των μηχανικών ιδιοτήτων της στιβάδας. Αποτελέσματα αυτού είναι η εντυπωσιακή βελτίωση της συμπεριφοράς της φθοράς των επικαλυμμένων κοπτικών πλακιδίων σκληρομετάλλου, όπως δείχνουν οι πορείες της αύξησης του πλάτους ζώνης φθοράς VB, συναρτήσει του αριθμού κοπών κατά το φραιζάρισμα.

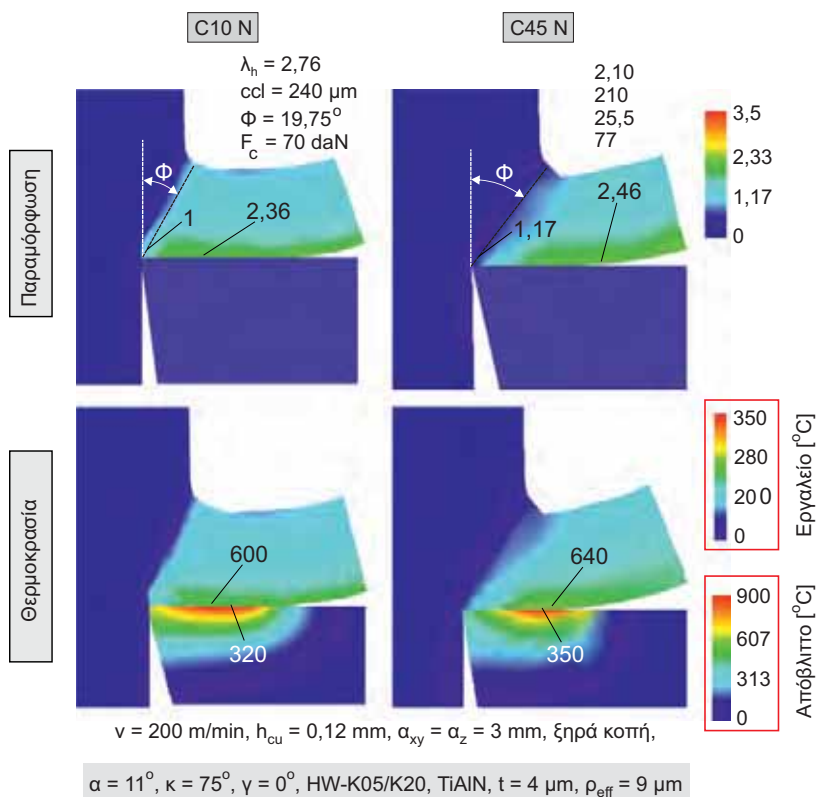


Σχήμα 7.47: Εξέλιξη φθοράς επιφάνειας ελευθερίας της στιβάδας TiAlN για διαφορετικούς τρόπους παραγωγής πλάσματος κατά την PVD εναπόθεση της επικάλυψης.

Για την αποτελεσματική καθοδήγηση των μεταλλικών ιόντων του πλάσματος, προς τις επιφάνειες των τεμαχίων προς επικάλυψη, αυτές τίθενται υπό αρνητική τάση (τάση πόλωσης BIAS-voltage). Μεγάλη αύξηση της τάσης πόλωσης, ελκύει και σημαντικό πλήθος ιόντων Ar^+ , γεγονός ανεπιθύμητο, γιατί λόγω της ενσωμάτωσής τους στο πλέγμα της επικάλυψης, δημιουργούνται αταξίες, που μειώνουν τις μηχανικές ιδιότητες της. Επίσης, τα τελευταία χρόνια, έχουν εξελιχθεί υβριδικές διαδικασίες, που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των μεθόδων εξάτμισης των στόχων “arcing” και “sputtering”. Για τις διαδικασίες “arcing” έχουν αναπτυχθεί μάλιστα, ειδικά ηλεκτρομαγνητικά φίλτρα, για την κατακράτηση σταγονιδίων (droplets), μεγάλου μεγέθους, οδηγώντας έτσι στη βελτίωση των δομών των επικαλύψεων.

τητας κοπής, η οποία αυξάνει την θερμοκρασία. Συγχρόνως όμως, επηρεάζεται και η φθορά του εργαλείου. Για το λόγο αυτό, η επιλογή των συνθηκών κατεργασίας διεξάγεται με συνεκτίμηση πολλών παραμέτρων, μεταξύ των οποίων σημαντική θέση κατέχουν και οι ιδιότητες του υλικού οι οποίες, στην περίπτωση σιδηρούχων υλικών, επηρεάζονται σημαντικά από την περιεκτικότητα σε άνθρακα.

Όπως φαίνεται στο **σχήμα 8.33**, κατά την κοπή υπό τις ίδιες συνθήκες κατεργασίας του χάλυβα C10 και του C45, και οι δύο με εξομαλυμένη κρυσταλλική δομή, διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη, όπως οι μέγιστες θερμοκρασίες στο απόβλιττο και στο εργαλείο, οι λόγοι παραμόρφωσης λ_h , οι γωνίες του επιπέδου διάτμησης Φ κ.ά., έχουν διαφορετικές τιμές. Αυτό συμβαίνει, καθόσον κατά τον σχηματισμό του αποβλίττου, στο επίπεδο διάτμησης, στην περίπτωση κοπής του χάλυβα C45 συγκριτικά με τον C10, το κατεργαζόμενο υλικό, παραμορφώνεται συνολικά λιγότερο. Συνέπεια του γεγονότος αυτού εί-



Σχήμα 8.33: Τιμές διάφορων χαρακτηριστικών μεγεθών, κατά την κοπή δύο χαλύβων, διαφορετικής περιεκτικότητας σε άνθρακα, εξομαλυμένης κρυσταλλογραφικής μορφής.