



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.**  
**Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών.**  
**Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών.**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ  
ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ LASER**



**ΣΤΑΓΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον επιβλέποντα την εργασία καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου τη μελέτη και τη διεκπεραίωση της διπλωματικής αυτής εργασίας, αλλά και για την πολύτιμες και ουσιαστικές συμβουλές του και τον κ. ΑΓΓΕΛΟ ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟ για την εποικοδομητική συνεργασία κατά την εκπόνηση της.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου την σύζυγο μου Ιωάννα και τα παιδιά μου Μιχαέλα και Ανδρέα για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη που μου έχουν προσφέρει καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

**Σταγάκης Εμμανουήλ**

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στις κατεργασίες αποβολής υλικού με laser σε μέταλλα, οι οποίες ανήκουν στις μη συμβατικές κατεργασίες. Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στις συμβατικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού ενώ στο Κεφάλαιο 2 στις μη συμβατικές κατηγορίες κοπής, ώστε να γίνουν εμφανείς οι διαφορές τους, ενώ παρουσιάζονται τα σχετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε κατηγορίας. Το Κεφάλαιο 3 πραγματεύεται τη φυσική του laser, την αρχή λειτουργίας του, καθώς και τον τρόπο παραγωγής του. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται οι κατεργασίες αποβολής υλικού με laser, καθώς και υβριδικές διαδικασίες, οι οποίες αποτελούνται από την υπέρθεση περισσότερων μη συμβατικών κατεργασιών. Επίσης καταγράφονται οι τελευταίες εξελίξεις και πειραματικές μελέτες στο συγκεκριμένο τομέα, οι οποίες στοχεύουν στη βελτιστοποίηση των συνθηκών κοπής. Το Κεφάλαιο 5 αφορά συγκεκριμένα στα μέταλλα και τα κράματά τους, αφού αποτελούν το κύριο προς κατεργασία υλικό. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα κυριότερα είδη laser και οι κυριότερες εφαρμογές τους. Τέλος στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία σχετικά με τις κατεργασίες αποβολής υλικού.

**Λέξεις κλειδιά:** μη συμβατικές κατεργασίες, laser, αποβολή υλικού, μέταλλα , εφαρμογές laser

## **Abstract**

This diploma thesis refers to the laser beam machining of metals, which belongs to the unconventional machining processes. At first (Chapter 1, Chapter 2), we describe the conventional and unconventional ablation processes, so as to make their differences clear and to present the advantages and disadvantages of each category. Chapter 3 deals with the laser physics and its operation principle. In Chapter 4 laser beam machining is analyzed, as well as some hybrid processes, which include conventional and unconventional machining. Also, the major areas of experimental studies are presented. Furthermore, Chapter 5 refers to metals and their alloys and finally Chapter 6 concerns the main laser types and their key applications. In the end, the conclusions of this diploma thesis are summarized.

Key words: unconventional machining, laser beam machining (LBM), ablation of material, metals, laser applications

## Περιεχόμενα

|  |    |
|--|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Συμβατικές κατεργασίες αποβολής υλικού .....             | 11 |
| 1.1 Εισαγωγή .....   | 11 |
| 1.2 Κατεργασιμότητα των υλικών.....                                  | 12 |
| 1.3 Συμβατικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού.....                     | 13 |
| 1.4 Αρχές της κοπής .....  | 16 |
| 1.4.1 Μορφή αποβλίττου .....   | 16 |
| 1.4.2 Ψευδόκοψη .....  | 17 |
| 1.5 Γεωμετρία της κοπής.....   | 20 |
| 1.6 Θερμοκρασίες κατά την κοπή .....                                 | 23 |
| 1.7 Φθορά κοπτικών εργαλείων .....                                   | 24 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μη συμβατικές κατεργασίες αποβολής υλικού.....           | 27 |
| 2.1 Εισαγωγή- Η ανάγκη για μη συμβατικές κατεργασίες .....           | 27 |
| 2.2 Κατάταξη Μη Συμβατικών Μηχανουργικών Κατεργασιών.....            | 27 |
| 2.3 Περιγραφή των μη συμβατικών μηχανουργικών κατεργασιών .....      | 30 |
| 2.3.1 Μηχανικές.....   | 30 |
| 2.3.2 Ηλεκτροχημικές.....  | 33 |
| 2.3.3 Ηλεκτροθερμικές .....  | 37 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εισαγωγή στη λειτουργία των laser.....                   | 45 |
| 3.1 Εισαγωγή- Ορισμός.....   | 45 |
| 3.2 Ιστορική αναδρομή.....   | 46 |
| 3.3 Η παραγωγή του laser.....  | 48 |
| 3.4 Οι ιδιότητες των laser .....                                     | 50 |
| 3.5 Θεωρία των κοιλοτήτων laser .....                                | 55 |
| 3.6 Εκπομπή και απορρόφηση φωτός στην κβαντική θεωρία .....          | 57 |
| 3.7 Η θεωρία του Einstein για την αλληλεπίδραση φωτός και ύλης ..... | 57 |
| 3.8 Τρόποι λειτουργίας του laser.....                                | 61 |
| 3.8.1 Laser συνεχούς εκπομπής (Continuous wave lasers -CW) .....     | 61 |
| 3.8.2 Laser ενός παλμού (Single pulse lasers).....                   | 61 |

|   |  |    |
|---|--|----|
| 3.8.3   | Laser ενός παλμού με χρονοκαθυστέρηση (Single pulsed Q-Switched lasers)..... | 62 |
| 3.8.4   | Laser σάρωσης (Scanning lasers).....   | 62 |
| 3.8.5   | Laser κλειδωμένης εκπομπής (Mode locked lasers) .....                        | 62 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Κατεργασίες αποβολής υλικού με laser..... |  | 63 |
| 4.1   | Επιλογή κατεργασίας και πλεονεκτήματα της τεχνολογίας laser .....            | 63 |
| 4.2   | Η αρχή των κατεργασιών με ακτίνες laser .....                                | 65 |
| 4.3   | Οι κυριότερες κατεργασίες αποβολής υλικού με ακτίνες laser.....              | 69 |
| 4.3.1   | Διάτρηση.....  | 69 |
| 4.3.2   | Κοπή και Αυλάκωση .....  | 70 |
| 4.3.3   | Τόρνευση και Φρεζάρισμα .....  | 70 |
| 4.3.4   | Μικροκατεργασία .....  | 72 |
| 4.4   | Υβριδικές κατεργασίες με χρήση ακτίνων laser .....                           | 72 |
| 4.5   | Βασικές περιοχές έρευνας στις κατεργασίες με laser: state-of-the-art         | 76 |
| 4.5.1   | Πειραματικές μελέτες .....   | 76 |
| 4.5.2   | Ρυθμός αποβολής υλικού (MRR) .....   | 77 |
| 4.5.3   | Κατεργασμένη γεωμετρία.....  | 79 |
| 4.5.4   | Επιφανειακή τραχύτητα.....   | 81 |
| 4.5.5   | Μεταλλουργικά χαρακτηριστικά.....  | 83 |
| 4.5.6   | Μηχανικές ιδιότητες.....   | 85 |
| 4.5.7   | Σχόλια .....   | 85 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Τα μέταλλα και τα κράματα τους .....      |  | 87 |
| 5.1   | Εισαγωγή .....   | 87 |
| 5.2   | Τύποι κραμάτων μετάλλων .....  | 87 |
| 5.2.1   | Μαλακός χάλυβας .....  | 87 |
| 5.2.2   | Ανοξείδωτος χάλυβας.....   | 88 |
| 5.2.3   | Κράματα αλουμινίου .....   | 89 |
| 5.2.4   | Κράματα τιτανίου και νικελίου .....  | 89 |
| 5.2.5   | Κράματα χαλκού.....  | 90 |
| 5.3   | Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες.....   | 91 |

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 5.3.1   | Οξείδωση .....                            | 94  |
| 5.3.2   | Λίπανση .....                             | 94  |
| 5.3.3   | Επένδυση .....                            | 94  |
| 5.3.4   | Δυνατότητα σώρευσης .....                 | 95  |
| 5.3.5   | Αποθήκευση .....                          | 95  |
| 5.3.6   | Οπτικές ιδιότητες.....                    | 95  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Κύρια είδη και εφαρμογές των laser.....         |   | 97  |
| 6.1   | Κυριότερα είδη laser .....                | 97  |
| 6.2   | Εφαρμογές των laser .....                 | 102 |
| 6.2.1   | Μικροδιάτρηση με laser .....              | 104 |
| 6.2.2   | Κατεργασία του διαμαντιού με laser.....   | 106 |
| 6.2.3   | Μικροσυγκόλληση με laser .....            | 108 |
| 6.2.4   | Μικροδιαμόρφωση με laser.....             | 109 |
| 6.2.5   | Μικροκοπή με laser .....                  | 110 |
| 6.2.6   | Επένδυση και κραματοποίηση με laser ..... | 110 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα – Κατευθύνσεις για το μέλλον ..... |   | 111 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Βιβλιογραφία .....                              |   | 113 |

## Ευρετήριο Εικόνων

|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 1-1: Κατηγοριοποίηση κατεργασιών μορφοποίησης μετάλλου [1] ...  | 11 |
| Εικόνα 1-2: Φραιζάρισμα, πλάνιση, λείανση και εργαλειομηχανές κοπής.....   | 15 |
| Εικόνα 1-3: Τόρνευση, διάτρηση και εργαλειομηχανές κοπής.....  | 15 |
| Εικόνα 1-4: Μορφές αποβλίττου σε κατεργασίες με αφαίρεση υλικού.....   | 17 |
| Εικόνα 1-5: Ψευδόκοψη.....   | 18 |
| Εικόνα 1-6: Φάσεις δημιουργίας της ψευδόκοπης.....   | 18 |
| Εικόνα 1-7: Το φαινόμενο της ψευδόκοπης σε σχέση με την ταχύτητα κοπής.....  | 20 |
| Εικόνα 1-8: Γεωμετρία της κόπης.....   | 21 |
| Εικόνα 1-9: Γωνίες κοπής ανάλογα με το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου<br>.....  | 22 |
| Εικόνα 1-10: Δημιουργία αποβλίττου στη ζώνη διάτμησης.....   | 23 |
| Εικόνα 1-11: Κατανομή θερμοκρασιών στο κατεργαζόμενο τεμάχιο –<br>απόβλιττο και κοπτικό εργαλείο.....  | 24 |
| Εικόνα 1-12: Είδη φθοράς κοπτικών εργαλείων.....   | 25 |
| Εικόνα 1-13: Μορφές φθοράς κατά την κοπή.....  | 26 |
| Εικόνα 1-14: Ρωγμές σε κοπτικά εργαλεία από σκληρομέταλλο.....   | 26 |
| Εικόνα 2-1: Κατεργασία με χρήση υπερήχων και τη βοήθεια της κρουστικής<br>αποξεστικής δράσης κόκκων λειαντικού υλικού.....   | 32 |
| Εικόνα 2-2: Ηλεκτροχημική κατεργασία.....  | 34 |
| Εικόνα 2-3: Διάταξη κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση.....  | 37 |
| Εικόνα 2-4: Διάταξη κοπής με ηλεκτροδιάβρωση.....  | 41 |
| Εικόνα 2-5: Γενική διάταξη συσκευής κατεργασίας με δέσμη ηλεκτρονίων... ..   | 43 |
| Εικόνα 2-6: Συνδυασμός μη συμβατικών κατεργασιών [4].....  | 44 |
| Εικόνα 3-1: Η συσκευή των Shawlow και Townes.....  | 47 |
| Εικόνα 3-2: Το πρώτο laser.....  | 48 |
| Εικόνα 3-3: Βασικά στοιχεία του laser.....   | 49 |
| Εικόνα 3-4: Ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής laser, που απεικονίζει τα<br>στοιχεία που είναι υπεύθυνα για την είσοδο της ενέργειας, την ενίσχυση και<br>την έξοδο..... | 49 |



|   |    |
|---|----|
| Εικόνα 3-5: Σχηματική απεικόνιση κοιλότητας laser που παρουσιάζει τη γωνιακή απόκλιση της ακτίνας στο κάτοπτρο εξόδου.....  | 51 |
| Εικόνα 3-6: Εύρος φάσματος εκπομπής ηλιακού φωτός και ενός αντιπροσωπευτικού σχεδόν μονοχρωματικού laser.....   | 52 |
| Εικόνα 3-7: Κόκκινο (635 nm), πράσινο (532 nm), και μπλε-ιώδες (445 nm) laser [5] .....   | 52 |
| Εικόνα 3-8: Εκπομπή φωτονίου που συνοδεύεται από κβαντισμένη μετάβαση από τη στάθμη 2 στη στάθμη 1 .....  | 54 |
| Εικόνα 3-9: Δύο διαμορφώσεις καθρεπτών που δημιουργούν κοιλότητες laser. (α) διαμόρφωση σταθερού κύματος , (β) διαμόρφωση μεταφερόμενου κύματος, αντίστοιχα. ....   | 55 |
| Εικόνα 3-10: Ορθογωνική κοιλότητα με μήκη πλευρών $L_x, L_y, L_z$ .....   | 56 |
| Εικόνα 3-11: Διάγραμμα που απεικονίζει το πλεονέκτημα των μονοδιάστατων κοιλοτήτων. Η σταθερή λειτουργία σχετίζεται μόνο με τις ακτίνες που αντανακλώνται πολλές φορές. ....  | 56 |
| Εικόνα 3-12: Διαδικασίες ενεργειακής μετάβασης .....  | 58 |
| Εικόνα 4-1: Σύστημα κοπής με ακτίνες laser .....  | 66 |
| Εικόνα 4-2: (1) laser, (2) οδήγηση δέσμης, (3) κεφαλή κοπής, (4) τραπέζι κοπής με συντεταγμένες, (5) μονάδα ελέγχου, (6) σύστημα παροχής ενέργειας [9] .....  | 66 |
| Εικόνα 4-3: (α) κρουστική διάτρηση, (β) διάτρηση τύπου δραπεάνου.....   | 69 |
| Εικόνα 4-4: Κοπή με laser .....   | 70 |
| Εικόνα 4-5: Τρισδιάστατη κατεργασία (α) τόννευση με laser (ελικοειδής αποβολή υλικού), (β) τόννευση με laser (δακτυλιοειδής αποβολή υλικού), (γ) φρεζάρισμα με laser .....  | 71 |
| Εικόνα 4-6: Συμβατικές κατεργασίες και κατεργασίες με laser LAT: τόννευση με τη βοήθεια laser (laser-assisted turning), LAS: διαμόρφωση με τη βοήθεια laser (laser assisted shaping), LAG: λείανση με τη βοήθεια laser (laser assisted grinding) , LAEDM: laser assisted EDM, LAECM: laser assisted ECM ,UALBM: ultrasonic-assisted LBM, LAE: laser assisted etching..... | 73 |
| Εικόνα 4-7: (α) Τόννευση με τη βοήθεια laser , (β) Λείανση με τη βοήθεια laser .....  | 74 |
| Εικόνα 4-8: Σχηματική απεικόνιση διαφόρων χαρακτηριστικών ποιότητας κοπής. $K_{entry}$ : πλάτος ίχνους κοπής στην πλευρά εισόδου, $K_{exit}$ : πλάτος ίχνους κοπής στην πλευρά εξόδου, Ra: επιφανειακή τραχύτητα, S: πάχος υλικού, 1:   |    |

|  |     |
|--|-----|
| οξειδωμένο στρώμα, 2: αναμορφωμένη στρώση και 3: θερμοεπιθεαζόμενη ζώνη (HAZ).....   | 77  |
| Εικόνα 4-9: Οι ρυθμοί αφαίρεσης υλικού μικροκατεργασίας με laser συναρτήσει της πυκνότητας ισχύος laser για (α) δίσκο ζαφειριού και (β) δίσκο πυριτίου, για διαφορετικές ταχύτητες κοπής. ....   | 78  |
| Εικόνα 4-10: Σχηματική αναπαράσταση του προφίλ της δέσμης .....  | 79  |
| Εικόνα 4-11: Μεταβολή της επιφανειακής τραχύτητας (surface roughness) συναρτήσει της ισχύος του laser και του ρυθμού τροφοδότησης.....   | 82  |
| Εικόνα 4-12: Μέσο πάχος της αναμορφωμένης στρώσης, HAZ και οξειδωμένης στρώσης για διαφορετικές γωνίες διάτρησης.....  | 84  |
| Εικόνα 5-1: Τυπικό προφίλ της σκληρότητας συναρτήσει της απόστασης από το ίχνος κοπής για σιδηρούχα μέταλλα .....  | 91  |
| Εικόνα 5-2: Μεταβολή της επιφανειακής αντανακλαστικότητας των μετάλλων συναρτήσει του μήκους κύματος ης δέσμης laser σε θερμοκρασία δωματίου. 96   |     |
| Εικόνα 6-1: Ορθογωνική κυματομορφή παλμού εξόδου μεγάλης αιχμής .....  | 99  |
| Εικόνα 6-2: Συσχέτιση του πάχους της πλάκας με την ταχύτητα κοπής.....   | 100 |
| Εικόνα 6-3: Διαμόρφωση ενός Laser Nd: YAG και του συστήματος επεξεργασίας.....   | 101 |
| Εικόνα 6-4: Συσχέτιση της ισχύος εξόδου του laser και της μέγιστης ταχύτητας κοπής για πλάκα μαλακού χάλυβα.....   | 102 |
| Εικόνα 6-5: Περιοχές εφαρμογών κατεργασιών συναρτήσει πυκνότητας ισχύος και χρόνου επαφής laser και υλικού .....   | 103 |
| Εικόνα 6-6: (α) Αποβολή υλικού μέσω προβολής μάσκας. Ένας συγκεντρωτικός φακός μπορεί να εφαρμοσθεί για να συγκεντρώσει την ακτίνα στο άνοιγμα του φακού επαφής, (β) εγκατάσταση μάσκας για διάτρηση μικρών οπών. Η μάσκα 1 επιλέγει το ομογενές μέρος της ακτίνας laser, η μάσκα 2 απεικονίζεται στο προϊόν, (γ) οπή, διαμέτρου 0.5 μm σε μολυβδένιο. Το υγρό που έχει αποβληθεί φαίνεται καθαρά στο μπροστινό τμήμα (δεξιά)..... | 106 |
| Εικόνα 6-7: Μήτρα χάραξης διαμαντιού .....   | 107 |
| Εικόνα 6-8: Συγκολλημένα με laser εξαρτήματα παραγωγής ηλεκτρονίων σε τηλεόραση.....   | 108 |
| Εικόνα 6-9: Συγκόλληση με laser χάλυβα (πάνω) σε αλουμίνιο.....  | 109 |
| Εικόνα 6-10: Χρήση ρομπότ στη συγκόλληση με laser .....  | 109 |
| Εικόνα 6-11: Ρύθμιση με laser.....   | 110 |

## **Ευρετήριο Πινάκων**

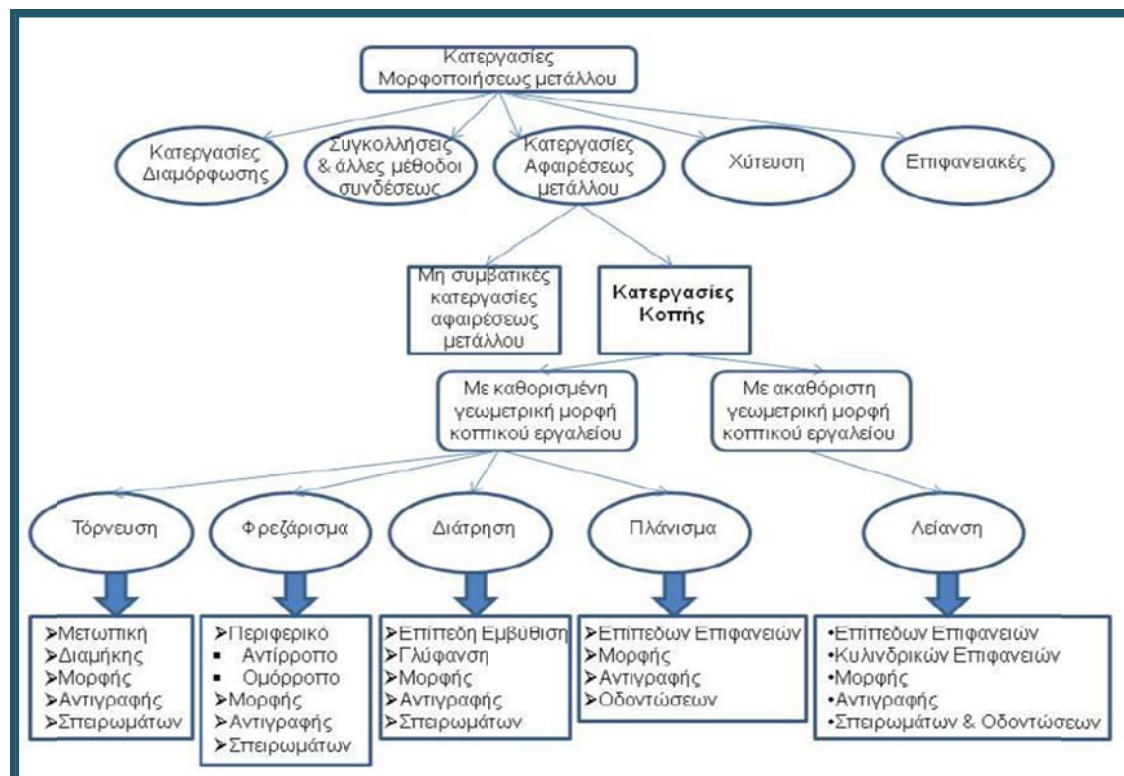
|   |     |
|---|-----|
| Πίνακας 1-1: Συμβατικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού και αντίστοιχες εργαλειομηχανές .....  | 13  |
| Πίνακας 2-1: Μη συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες.....   | 29  |
| Πίνακας 5-1: Φυσικές ιδιότητες ορισμένων μετάλλων .....   | 93  |
| Πίνακας 5-2: Σύγκριση των θερμικών ιδιοτήτων και της θερμικής ενέργειας που απαιτείται για την τήξη ή την εξάτμιση ενός όγκου μετάλλου..... | 93  |
| Πίνακας 6-1: Σύγκριση διαφόρων τύπων laser αερίου.....  | 98  |
| Πίνακας 6-2: Σύγκριση των laser για την κατεργασία του διαμαντιού .....   | 107 |

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Συμβατικές κατεργασίες αποβολής υλικού

## 1.1 Εισαγωγή

Γενικά ως κατεργασία ορίζεται η διαδικασία αλλαγής γεωμετρικών ή/ και μηχανικών ιδιοτήτων σε προϊόντα από διάφορα υλικά, όπως κράματα μετάλλων ή πλαστικά. Οι κατεργασίες μπορούν να ταξινομηθούν σε συμβατικές και μη συμβατικές, ανάλογα με το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιούν. Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 1-1 οι κατεργασίες αποβολής ή αφαίρεσης υλικού είναι μια υποκατηγορία των κατεργασιών μορφοποίησης. Στις κατεργασίες αυτές ανήκουν επίσης οι κατεργασίες διαμόρφωσης, οι συγκολλήσεις και άλλες μέθοδοι συνδέσεως, η χύτευση και οι επιφανειακές κατεργασίες.

Οι κατεργασίες αφαίρεσης μετάλλου είναι αυτές που μας αφορούν στην παρούσα διπλωματική εργασία, γι' αυτό και θα αναλυθούν εκτενέστερα. Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τις κυριότερες κατεργασίες κοπής (συμβατικές κατεργασίες), ενώ τα υπόλοιπα κεφάλαια της εργασίας αφορούν στις μη συμβατικές κατεργασίες αποβολής υλικού.



Εικόνα 1-1: Κατηγοριοποίηση κατεργασιών μορφοποίησης μετάλλου [1]

Η επιθυμητή μορφή και διάσταση στο τεμάχιο δίνεται, αφαιρώντας υλικό από αυτό, με την χρήση κοπτικών εργαλείων ή εργαλειομηχανών, σε μορφή αποβλίτων (γρεζιών). Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται είναι δυνατόν

να έχει **συγκεκριμένη γεωμετρία**, όπως είναι το μαχαίρι του τόννου, το τρυπάνι κλπ, ή να έχει **ακαθόριστη γεωμετρία**, πράγμα που συμβαίνει στον λειαντικό τροχό. Το κοπτικό εργαλείο επίσης, μπορεί να διαθέτει μία κύρια κόψη, όπως είναι το εργαλείο του τόννου, ή και περισσότερες από μία, όπως το τρυπάνι, ο κοπτήρας της φρέζας κλπ.

Κάθε κατεργασία αφαίρεσης υλικού μπορεί να διαιρεθεί σε τρία κύρια στάδια:

**αρχική κατεργασία:** αποτελεί το πρώτο "πέρασμα" του κοπτικού εργαλείου για την απομάκρυνση άχρηστων στρωμάτων υλικού από την προηγηθείσα διαμόρφωσή του,

**βασική κατεργασία :** αποτελείται από μια σειρά "περασμάτων" του κοπτικού εργαλείου ώστε να δοθεί το επιθυμητό σχήμα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο,

**κατεργασία αποπερατώσεως** (φινίρισμα) : είναι το τελικό πέρασμα του κοπτικού εργαλείου ώστε να επιτευχθούν οι προδιαγραφές για διαστατική ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας.

Το κόστος των κατεργασιών αφαίρεσης υλικού είναι μεγαλύτερο, συγκριτικά με το αντίστοιχο κόστος των κατεργασιών διαμορφώσεως και το κόστος των άλλων μεθόδων μορφοποίησεως τεμαχίων. Η *ελαχιστοποίηση του κόστους* στην κατεργασία σημαίνει οικονομικότερη κατεργασία, η οποία επιτυγχάνεται με:

- *ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας,*
- *βέλτιστη χρησιμοποίηση των κοπτικών εργαλείων ώστε να αυξάνεται ο χρόνος ζωής τους,*
- *ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας για την κατεργασία,*
- *κατάλληλες συνθήκες κοπής, για αξιοποίηση των δυνατοτήτων των υλικών των κοπτικών εργαλείων, σε συνδυασμό με το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου και την μέθοδο κατεργασίας.*

## **1.2 Κατεργασιμότητα των υλικών**

• Η **κατεργασιμότητα**, ως ιδιότητα των υλικών, είναι μία σύνθετη έννοια, η οποία ορίζεται ως η δυνατότητα (ευκολία ή δυσκολία) κατεργασίας, που παρουσιάζει ένα υλικό, προκειμένου από αυτό να κατασκευασθούν εξαρτήματα συγκεκριμένης γεωμετρίας. Η κατεργασία αυτή μπορεί να είναι κατεργασία διαμόρφωσης, κοπής, συγκόλλησης ή χύτευσης. Η παραπάνω έννοια της κατεργασιμότητας, ως γενική, μπορεί να διαιρεθεί σε επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με το είδος της κατεργασίας που μας ενδιαφέρει :

• **Συγκολλησιμότητα** καλείται η δυνατότητα συγκόλλησης ενός υλικού. Η καθαρότητα του μετάλλου και η χημική σύσταση του κράματος προς

συγκόλληση είναι παράγοντες που άλλοτε επηρεάζουν θετικά και άλλοτε αρνητικά τη συγκολλησιμότητα. Π.χ. χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα (> 0,3%) εμφανίζουν ρωγμές κατά τη συγκόλληση και έτσι χαρακτηρίζονται από μικρή συγκολλησιμότητα, ενώ αντίθετα προσθήκες σε μαγγάνιο (Mn) έως 1% και πυρίτιο (Si) έως 0,3% αυξάνουν τη ρευστότητα του τήγματος, καθώς και την αντίστασή του σε οξείδωση υψηλών θερμοκρασιών, αυξάνοντας έτσι τη συγκολλησιμότητα των χαλύβων.

- **Ευχυτότητα** ή χυτευσιμότητα καλείται η δυνατότητα ενός υλικού να διαμορφωθεί, μέσω χύτευσης, σε εξάρτημα συγκεκριμένης γεωμετρίας. Το σημείο τήξεως του μετάλλου, το ιξώδες και η επιφανειακή τάση του τήγματος του μετάλλου, καθώς και οι διάφορες προσμείξεις είναι παράγοντες, που επηρεάζουν σημαντικά την ευχυτότητα του μετάλλου.

- **Διαμορφωσιμότητα** καλείται η δυνατότητα ενός υλικού να διαμορφωθεί σε μία συγκεκριμένη γεωμετρία (έλασμα, φύλλο, σύρμα, κ.λπ.), μέσω κατεργασίας πλαστικής παραμόρφωσης. Όταν η κατεργασία αυτή αποβλέπει στη διαμόρφωση ελάσματος, τότε η δυνατότητα αυτή λέγεται ελατότητα, ενώ όταν αποβλέπει στη διαμόρφωση σύρματος, τότε λέγεται ολκιμότητα. Ειδικότερα, όσο μαλακό είναι ένα μέταλλο, τόσο πιο εύκολα μπορεί να διαμορφωθεί σε ελάσματα ή σε σύρματα, δηλαδή αυξάνεται η ελατότητα και η ολκιμότητά του αντίστοιχα.

- **Κατεργασιμότητα στην κοπή** καλείται η δυνατότητα διαμόρφωσης, που παρουσιάζει ένα υλικό, μέσω κατεργασιών αφαίρεσης υλικού (π.χ. τόννευση, φρεζάρισμα, πλάνιση, λείανση, κ.λπ.). Και σε αυτή την κατηγορία η χημική σύσταση και η δομή του υλικού παίζουν πρωτεύοντα ρόλο. Οι χάλυβες ελευθέρας κοπής (δηλαδή υψηλής κατεργασιμότητας στην κοπή), που περιέχουν μαγγάνιο (Mn) και θείο (S), παρουσιάζουν μεγάλη ευκολία κατά την κοπή, λόγω της ύπαρξης απομονωμένων σωματιδίων (εγκλεισμάτων) σουλφιδίου του μαγγανίου (MnS).

### 1.3 Συμβατικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού

Οι βασικότερες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού και οι εργαλειομηχανές στις οποίες γίνονται οι αντίστοιχες κατεργασίες, είναι:

**Πίνακας 1-1:** Συμβατικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού και αντίστοιχες εργαλειομηχανές

| <i>Κατεργασία</i> | <i>Εργαλειομηχανή</i> |
|-------------------|-----------------------|
| Τόννευση          | Τόρνος                |

|            |                   |
|------------|-------------------|
|            |                   |
| Φρεζάρισμα | Φρέζα             |
| Διάτρηση   | Δράπανο           |
| Πλάνισμα   | Πλάνη             |
| Λείανση    | Λειαντικός τροχός |

Στις Εικόνες 1-2 και 1-3 παρουσιάζονται οι βασικότερες κατεργασίες αφαίρεσης υλικού και σχηματικά οι αντίστοιχες χρησιμοποιούμενες εργαλειομηχανές. Οι εργαλειομηχανές κατατάσσονται με διάφορους τρόπους.

Οι συνήθεις τρόποι κατάταξης είναι :

- **ως προς το είδος της κατεργασίας**

- **ως προς το είδος της πρωτεύουσας κίνησης**

εργαλειομηχανές με περιστροφική πρωτεύουσα κίνηση,

εργαλειομηχανές με ευθύγραμμη πρωτεύουσα κίνηση,

- **ως προς τον βαθμό εξειδίκευσεως**

εργαλειομηχανές γενικής χρήσεως,

ειδικές εργαλειομηχανές,

εξειδικευμένες εργαλειομηχανές,

εργαλειομηχανές μεταφοράς,

- **ως προς την ακρίβεια κατεργασίας**

εργαλειομηχανές συνήθους ακριβείας,

εργαλειομηχανές ακριβείας,

εργαλειομηχανές μεγάλης ακριβείας,

εργαλειομηχανές υψίστης ακριβείας,

- ως προς το βάρος

εργαλειομηχανές ελαφρές (βάρος μικρότερο του 1 tn),

εργαλειομηχανές μέσου βάρους (βάρος μικρότερο των 10 tn),

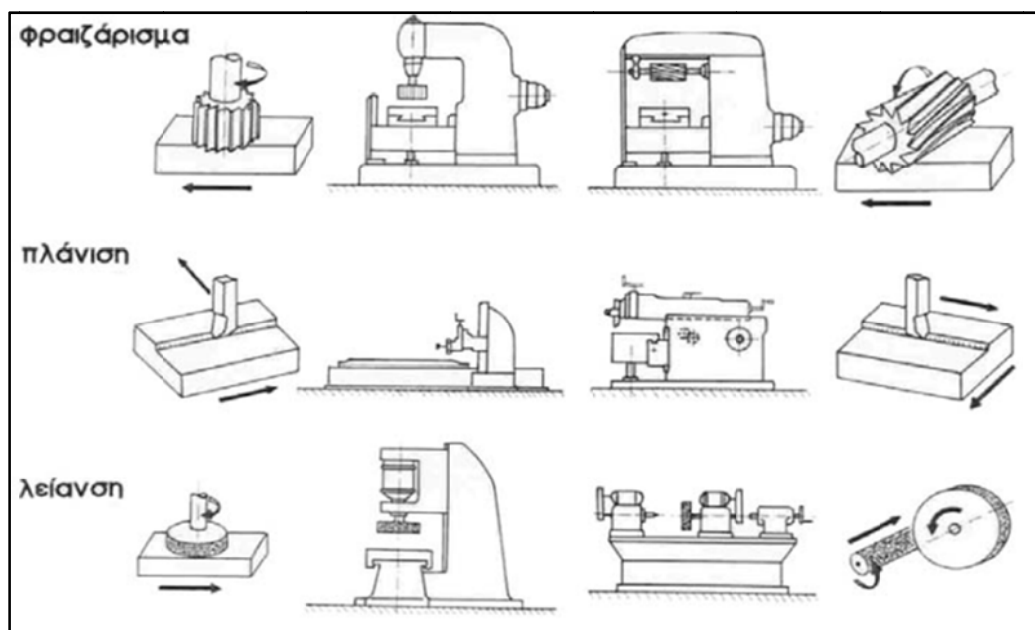
εργαλειομηχανές βαριές (βάρος μεγαλύτερο των 10 tn),

- ως προς το βαθμό αυτοματισμού

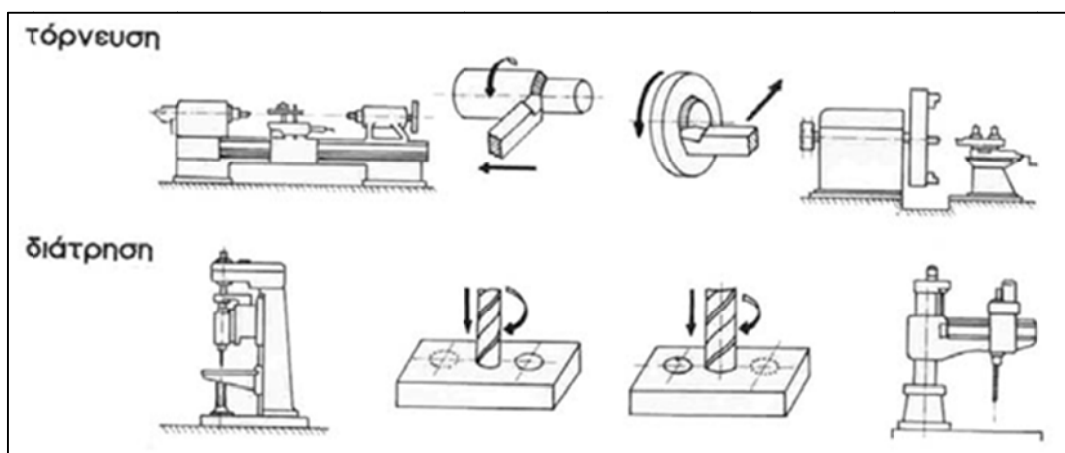
κοινές εργαλειομηχανές,

ημιαυτόματες εργαλειομηχανές (οι κινήσεις γίνονται αυτόματα),

αυτόματες εργαλειομηχανές (οι κινήσεις και η τροφοδοσία γίνονται αυτόματα)



Εικόνα 1-2: Φραιζάρισμα, πλάνιση, λείανση και εργαλειομηχανές κοπής



Εικόνα 1-3: Τόρνευση, διάτρηση και εργαλειομηχανές κοπής



## 1.4 Αρχές της κοπής

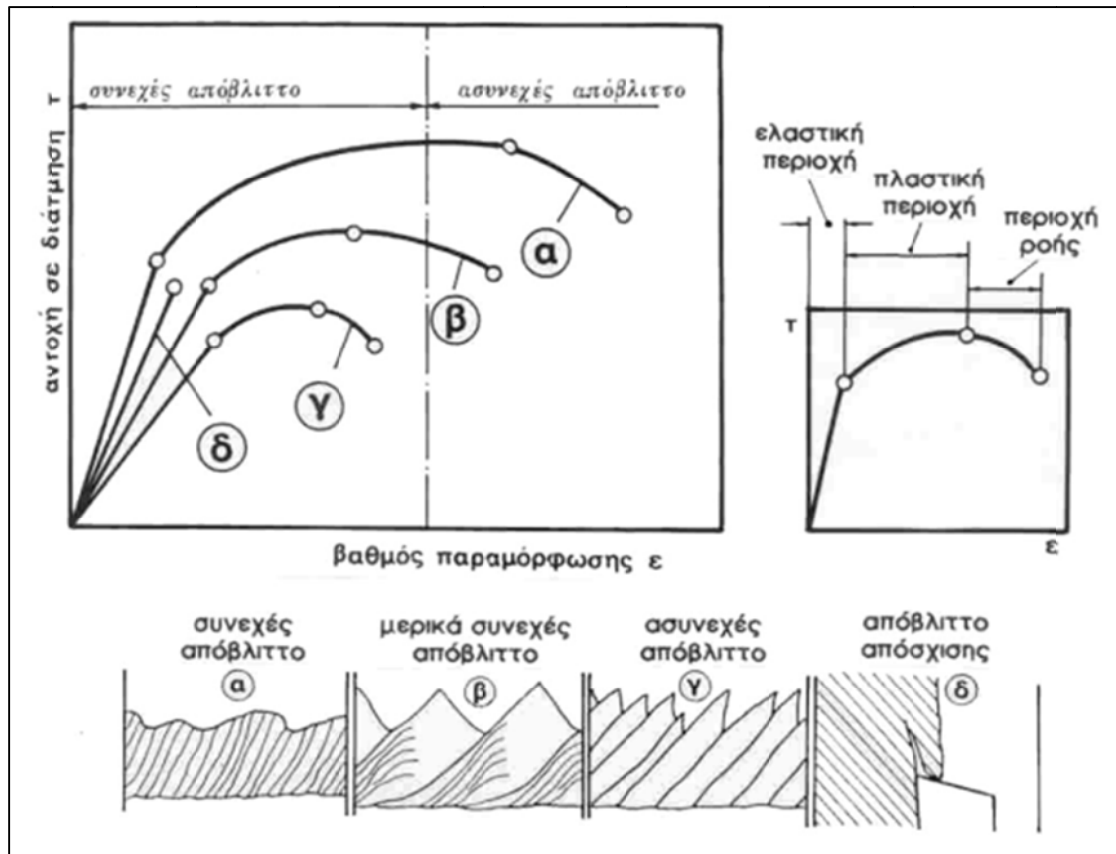
### 1.4.1 Μορφή αποβλίττου

Η αφαίρεση του υλικού στις εργαλειομηχανές επιτυγχάνεται μέσω της διαφορετικής κινηματικής του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, με καθορισμένο βάθος (το οποίο ονομάζεται **βάθος κοπής**) και προδιαγεγραμμένη ταχύτητα εισχώρησης. Το υλικό του τεμαχίου που απομακρύνεται λέγεται **απόβλιττο** (γρέξι) και μπορεί, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες κατεργασίας και το υλικό του τεμαχίου, να έχει διάφορες μορφές.

Ανάλογα με τον βαθμό παραμορφώσεως  $\epsilon$  και την αντοχή σε διάτμηση  $\tau$  του κατεργαζόμενου υλικού, το παραγόμενο απόβλιττο μπορεί να είναι συνεχές ή ασυνεχές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-4. Το συνεχές απόβλιττο είναι και το επιθυμητό στην πράξη, μια και σχετίζεται με ευνοϊκές συνθήκες όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, την καταναλισκόμενη ισχύ, την προκύπτουσα τραχύτητα επιφάνειας του τεμαχίου καθώς και την αναπτυσσόμενη φθορά στο κοπτικό εργαλείο. Το **συνεχές απόβλιττο** δημιουργείται από συνεχή πλαστική παραμόρφωση που επικρατεί στην περιοχή της ζώνης διάτμησης. Το γεγονός αυτό, έχει σαν συνέπεια την διαρροή του υλικού και την ροή του σαν ταινία πάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου. Το **ασυνεχές απόβλιττο** δημιουργείται με την περιοδική θραύση του αποβλίττου κατά την διέλευσή του από την ζώνη διατμήσεως. Τέτοιο απόβλιττο συναντάται σε ψαθυρά υλικά όπως ο χυτοσίδηρος ή σε πολύ χαμηλές ταχύτητες κοπής, σε μεγάλες προώσεις ή σε κοπή με εργαλεία με μικρές γωνίες αποβλίττου.

Έτσι ευνοϊκές συνθήκες κοπής όσον αφορά στη δημιουργία του αποβλίττου, γενικά επιτυγχάνονται με τις εξής συνθήκες :

- *μεγάλη ταχύτητα κοπής*
- *μικρή πρόωση*
- *μεγάλη γωνία αποβλίττου*

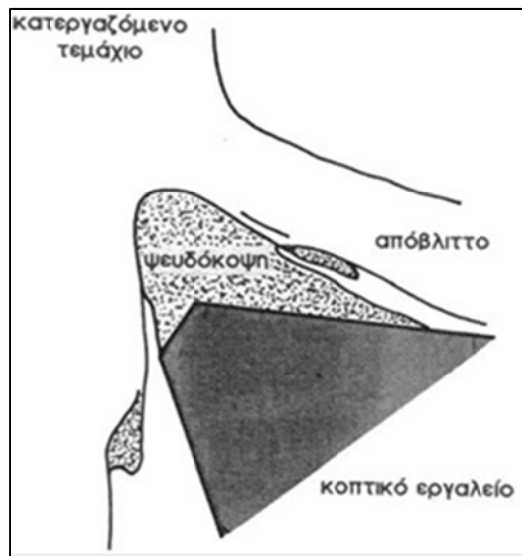


Εικόνα 1-4: Μορφές αποβλίττου σε κατεργασίες με αφαίρεση υλικού

Σε περιπτώσεις που το συνεχές απόβλιττο αποκτά μεγάλο μήκος (ιδίως στην κατεργασία όλκιμων υλικών), με αποτέλεσμα να επιφέρει δυσκολίες αλλά και κινδύνους κατά την ώρα της κατεργασίας, χρησιμοποιούνται κατάλληλες διαμορφώσεις του κοπτικού εργαλείου που ονομάζονται **γρεζοθραύστες**. Ένα φαινόμενο που σχετίζεται με την δημιουργία του συνεχούς αποβλίττου είναι και η δημιουργία της **ψευδόκοψης**.

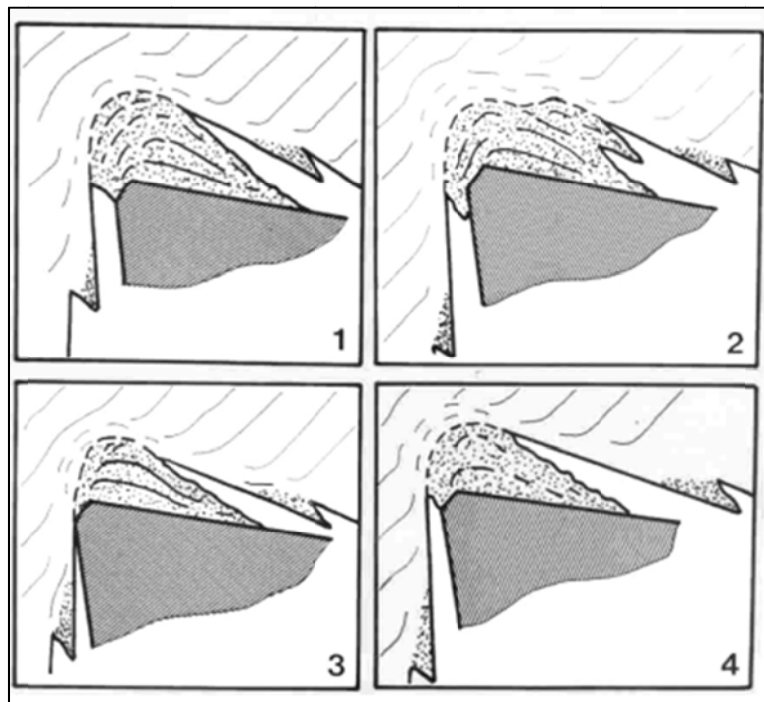
### 1.4.2 Ψευδόκοψη

Κατά την διαδικασία δημιουργίας του αποβλίττου, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί στην κόψη του εργαλείου η ψευδόκοψη. Πρόκειται για σφηνοειδές, ασύμμετρο σώμα από ισχυρά παραμορφωμένο και σκληρυμένο υλικό του τεμαχίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-5. Στην εικόνα αυτή διακρίνονται η κοπτική ακμή του εργαλείου που έχει μορφή σφήνας, το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το απόβλιττο που παράγεται και η ψευδόκοψη ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο. Η ψευδόκοψη αυτή δημιουργείται από επάλληλα στρώματα υλικού του τεμαχίου, που προσκολλώνται στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου.



**Εικόνα 1-5:** Ψευδόκοψη

Η ψευδόκοψη αναπτύσσεται καθώς η κοπή προχωρεί. Όταν η ψευδόκοψη αποκτά ένα ορισμένο μέγεθος, αποχωρίζονται από το σώμα της, λόγω των δυνάμεων κοπής, μικρά κομμάτια τα οποία προσκολλώνται είτε στο απόβλιττο που ρέει, είτε στην νεοσχηματισμένη επιφάνεια του τεμαχίου. Ο περιοδικός αυτός σχηματισμός και τεμαχισμός της ψευδόκοψης φαίνεται στην Εικόνα 1-6, όπου παρατηρείται στην φάση 2 ο διαχωρισμός της ψευδόκοψης προς το απόβλιττο και την κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου, τεμαχισμός που ολοκληρώνεται στη συνέχεια.



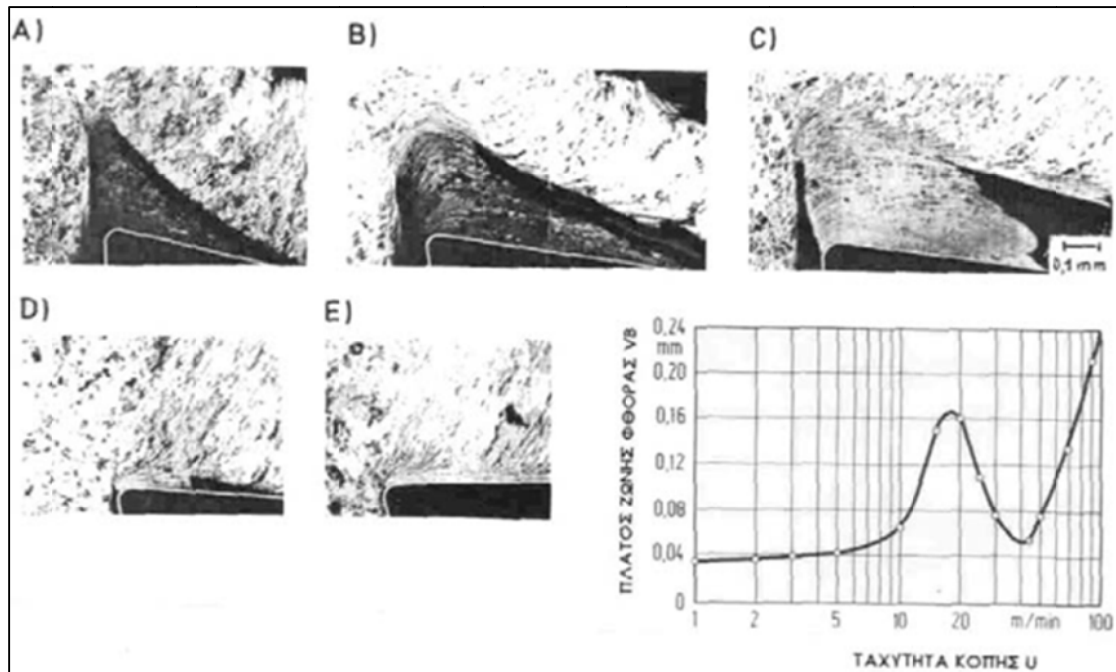
**Εικόνα 1-6:** Φάσεις δημιουργίας της ψευδόκοψης

Η ύπαρξη της ψευδόκοψης χειροτερεύει την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, ενώ η συμπεριφορά της ως προς το κοπτικό εργαλείο εξαρτάται από τις συνθήκες κοπής. Έτσι υπάρχει περίπτωση η σταθερή παρουσία της ψευδόκοψης να προστατεύει το κοπτικό εργαλείο, μια και κόβει αυτή και όχι άμεσα η κοπτική ακμή του, ενώ υπάρχει και η περίπτωση, ανάλογα με τις συνθήκες κοπής, η ψευδόκοψη να φθείρει το εργαλείο κυρίως στην επιφάνεια αποβλίττου του, με τον μηχανισμό της απόξεσης. Η δημιουργία ή αποφυγή της ψευδόκοψης μπορεί να ελεγχθεί από την κατάλληλη επιλογή των συνθηκών κατεργασίας.

Έτσι το μέγεθος της ψευδόκοψης μειώνεται αν :

- αυξηθεί η ταχύτητα κοπής,
- χρησιμοποιηθεί εργαλείο με μεγαλύτερη γωνία αποβλίττου,
- μειωθεί η χρησιμοποιούμενη πρόωση,
- χρησιμοποιηθεί κατάλληλο υγρό κοπής.

Η παρουσία της ψευδόκοψης επηρεάζεται από τους παράγοντες που προαναφέρθηκαν ενώ ισχυρότερη επίδραση παρουσιάζει η ταχύτητα κοπής. Έτσι μπορεί κανείς να διακρίνει στην Εικόνα 1-7 την επίδραση της χρησιμοποιούμενης ταχύτητας κοπής στην αναπτυσσόμενη φθορά ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου, φθορά που σχετίζεται με την ύπαρξη της ψευδόκοψης. Στην εικόνα οι πέντε φωτογραφίες αντιστοιχούν σε πέντε διαφορετικές ταχύτητες κοπής : **A)** :  $v=2$  m/min **B)** :  $v=10$  m/min **C)** :  $v=20$  m/min **D)** :  $v=30$  m/min **E)** :  $v=40$  m/min. Το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι ο χάλυβας Ck53N, ενώ το κοπτικό εργαλείο είναι σκληρομέταλλο P30 με γωνία αποβλίττου  $\gamma=10^\circ$ . Από το σχήμα γίνεται φανερό πως το πλάτος ζώνης φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου, αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας, αλλά παρουσιάζεται μια περιοχή (στην περίπτωση του σχήματος ανάμεσα στα 18 m/min και 40 m/min) όπου η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε ελάττωση της παρουσίας της ψευδόκοψης και αντίστοιχα μείωση του πλάτους ζώνης φθοράς. Όπως διακρίνεται στην φωτογραφία C, η ψευδόκοψη στην περίπτωση αυτή δεν υπερβαίνει σε μέγεθος κάποια δέκατα του χιλιοστού.



Εικόνα 1-7: Το φαινόμενο της ψευδόκοπης σε σχέση με την ταχύτητα κοπής

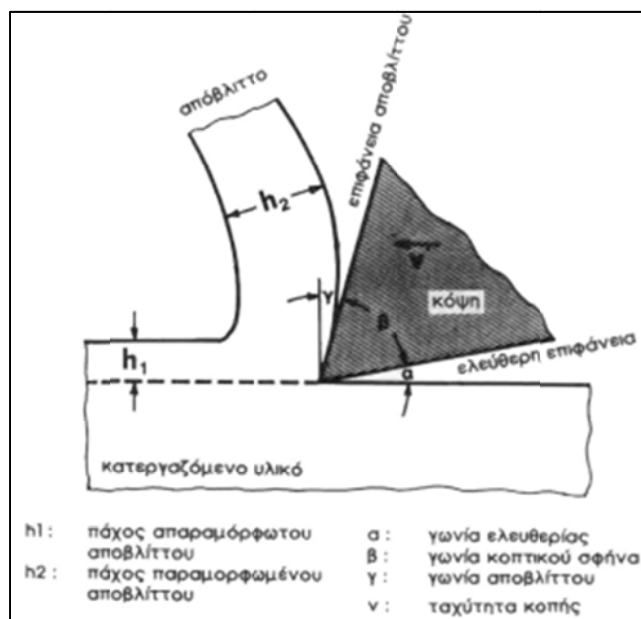
## 1.5 Γεωμετρία της κοπής

Κατά την διάρκεια της κοπής, με την υπόθεση πως το κοπτικό εργαλείο κινείται με ταχύτητα  $v$  ενάντια στο σταθερό κατεργαζόμενο τεμάχιο, το υλικό του τεμαχίου που κόβεται, σχηματίζεται με συνεχή πλαστική διάτμηση που λαμβάνει χώρα ακριβώς μπροστά στην κόψη του εργαλείου. Το απόβλιττο που παράγεται κινείται πάνω στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και απομακρύνεται, ενώ η τελική παραγόμενη επιφάνεια του τεμαχίου δημιουργείται από συνεχή θραύση του υλικού του. Η πλαστική διάτμηση που γίνεται σε μια στενή περιοχή που ονομάζεται **ζώνη διατμήσεως**, έχει σαν συνέπεια το υλικό του τεμαχίου που περνά από την ζώνη αυτή να εφελκύεται.

Η κατεργασία με αφαίρεση υλικού μπορεί να προσομοιωθεί με την είσοδο στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, μιας κοπτικής σφήνας. Η κόψη αυτής της σφήνας έχει σχεδόν πάντα συγκεκριμένη γεωμετρία, επιλεγμένη σχετικά με το προς κατεργασία υλικό και τις συνθήκες κατεργασίας. Τα χαρακτηριστικά αυτής της γεωμετρίας αποτελούν και τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε κοπτικού εργαλείου. Το επιλεγόμενο βάθος κοπής για κάθε κατεργασία αποτελεί επίσης σημαντική παράμετρο που ανήκει στις συνθήκες κοπής. Στην Εικόνα 1-8 φαίνεται η μορφή αυτής της κοπτικής σφήνας στην οποία διακρίνονται δύο κύριες επιφάνειες :

- **επιφάνεια αποβλίττου** : είναι αυτή πάνω στην οποία ρέει το απόβλιττο,

- **ελεύθερη επιφάνεια** : είναι η επιφάνεια προς το μέρος της νεοσχηματισμένης επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου



Εικόνα 1-8: Γεωμετρία της κόψης

Στο ίδιο σχήμα το πάχος  $h_2$  του παραμορφωμένου αποβλίττου, λόγω της συνεχούς πλαστικής διάτμησης, παρουσιάζεται μεγαλύτερο από το πάχος  $h_1$  του αντίστοιχου απαραμόρφωτου αποβλίττου ενώ διακρίνονται και οι τρεις χαρακτηριστικές γωνίες κοπής, που είναι :

- γωνία  $\alpha$  : γωνία αποβλίττου
- γωνία  $\beta$  : γωνία κοπτικού σφήνα
- γωνία  $\gamma$  : γωνία ελευθερίας

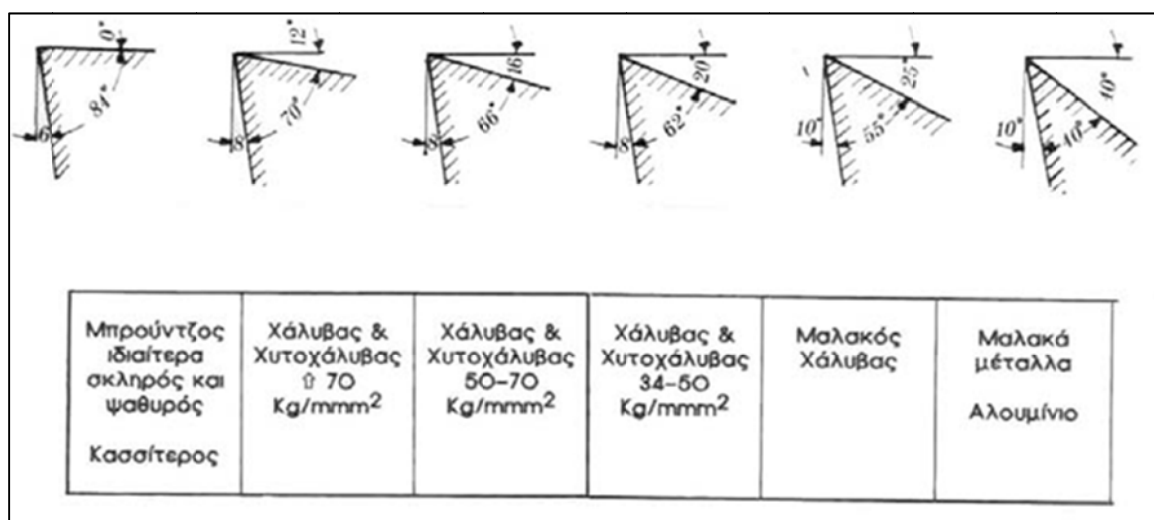
Οι γωνίες αυτές είναι χαρακτηριστικές στην κοπή, την επηρεάζουν σημαντικά και επιλέγονται ανάλογα με τον συνδυασμό υλικού κοπτικού εργαλείου - κατεργαζόμενου τεμαχίου και συνθηκών κοπής. Μεταξύ των τριών αυτών γωνιών, που ονομάζονται **γωνίες κοπής**, ισχύει η σχέση :  $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$

- Η **γωνία ελευθερίας  $\alpha$** , σχηματίζεται ανάμεσα στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου (δηλαδή στην επιφάνεια που κείται προς την κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου) και την κατεύθυνση της κοπής. Η γωνία  $\alpha$  επηρεάζει την φθορά του κοπτικού εργαλείου.
- Η **γωνία κοπτικού σφήνα  $\beta$** , είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στις επιφάνειες αποβλίττου και ελευθερίας του κοπτικού εργαλείου.
- Η **γωνία αποβλίττου  $\gamma$** , σχηματίζεται ανάμεσα στην επιφάνεια αποβλίττου του εργαλείου (δηλαδή στην επιφάνεια επάνω στην οποία κινείται το

απόβλιττο) και την κάθετο στην κατεύθυνση της κοπής. Η γωνία  $\gamma$  μπορεί να πάρει θετικές τιμές, αρνητικές ή μηδέν.

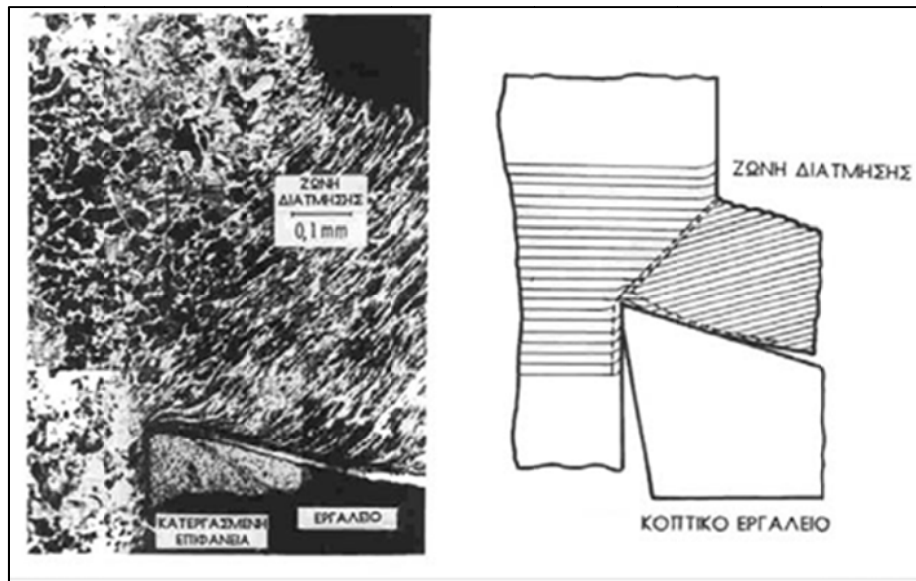
Στην Εικόνα 1-9 παρουσιάζονται, ενδεικτικές γωνίες κοπής για διάφορα υλικά. Από την Εικόνα 1-9 γίνεται φανερό πως τα πιο μαλακά κατεργαζόμενα υλικά, απαιτούν πιο αιχμηρή κόψη του κοπτικού σφήνα ενώ τα σκληρά υλικά απαιτούν στιβαρότερο και άρα πιο χοντρό σφήνα. Συνολικά μπορεί να παρατηρηθεί πως όσο πιο μαλακό είναι ένα υλικό, τόσο οι γωνίες κοπής του κοπτικού εργαλείου πρέπει να τείνουν αντίστοιχα σε :

- αύξηση της γωνίας ελευθερίας  $\alpha$
- μείωση της γωνίας σφήνας  $\beta$
- αύξηση της γωνίας αποβλίττου  $\gamma$



Εικόνα 1-9: Γωνίες κοπής ανάλογα με το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου

Η διαδικασία παραμόρφωσης και διάτμησης του υλικού κατά την διάρκεια της κοπής, φαίνεται στην Εικόνα 1-10 Στο σχήμα αυτό παρατηρείται η θέση δημιουργίας του αποβλίττου, ενώ διακρίνονται και οι χαρακτηριστικές επιφάνειες του κοπτικού εργαλείου. Η λοξή περιοχή όπου φαίνεται ο διαχωρισμός ανάμεσα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και το απόβλιττο είναι η ζώνη διατμήσεως. Η φωτογραφία του σχήματος αντιστοιχεί σε κατεργασία χάλυβα Ck 53 με κοπτικό εργαλείο σκληρομέταλλο P30 και ταχύτητα κοπής 100 m/min.



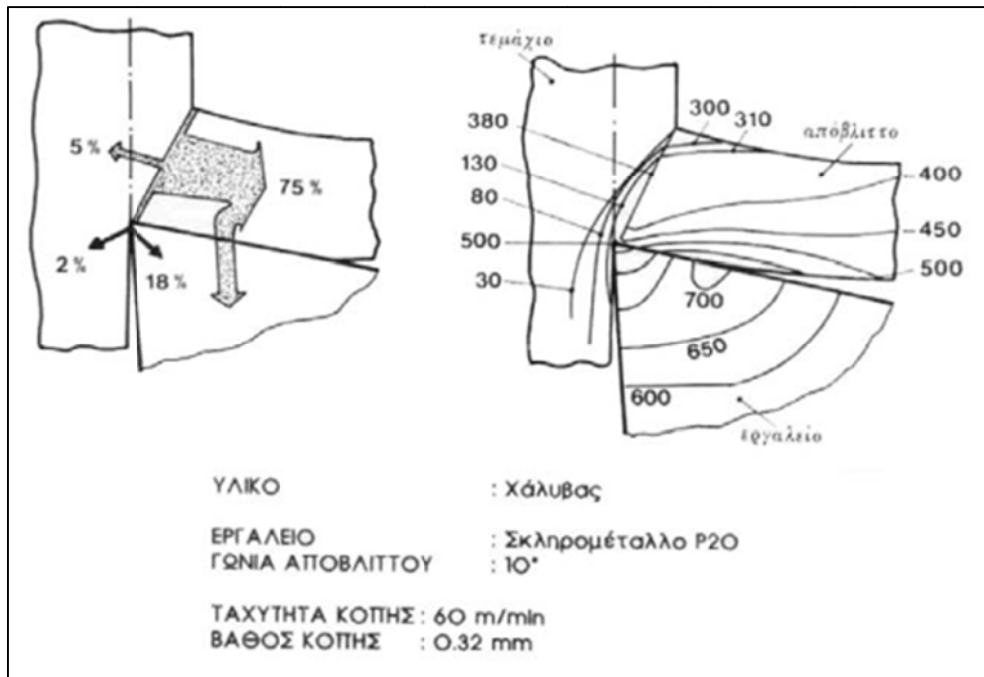
Εικόνα 1-10: Δημιουργία αποβλίττου στη ζώνη διάτμησης

## 1.6 Θερμοκρασίες κατά την κοπή

Η συνολική ενέργεια που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η κοπή, καταναλίσκεται σε δύο βασικά περιοχές, στη ζώνη διατμήσεως και στη ζώνη τριβής. Πολύ λιγότερη ενέργεια καταναλίσκεται στη θέση τριβής της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου και της κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου. Όλες αυτές οι περιοχές ανάλωσης ενέργειας, αποτελούν και πηγές έκλυσης θερμότητας.

Η παραγόμενη αυτή θερμότητα κατά την κοπή, παράγεται κατά κύριο λόγο στην ζώνη διατμήσεως και κυμαίνεται σε ποσοστό 65% έως 80%. Η υπόλοιπη θερμότητα παράγεται στην ζώνη τριβής του αποβλίττου, πάνω στο κοπτικό εργαλείο, αλλά και στην θέση που εφάπτεται η ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου με το τεμάχιο. Η συνολική θερμότητα που παράγεται, παραλαμβάνεται από το απόβλιττο κατά κύριο λόγο, από το κοπτικό εργαλείο και από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Στην Εικόνα 1-11 για μια περίπτωση κατεργασίας τόννευσης χάλυβα ( $K_f=850 \text{ N/mm}^2$ ) από κοπτικό εργαλείο σκληρομέταλλο P30 με γωνία αποβλίττου  $\gamma=10^\circ$  και ταχύτητα  $v=60\text{m/min}$ , φαίνονται οι ισοθερμοκρασιακές καμπύλες στο κοπτικό εργαλείο, το απόβλιττο και το τεμάχιο καθώς και τα ποσοστά κατανομής της θερμότητας.





**Εικόνα 1-11:** Κατανομή θερμοκρασιών στο κατεργαζόμενο τεμάχιο – απόβλιττο και κοπτικό εργαλείο

Από το σχήμα γίνεται φανερό πως οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο κοπτικό εργαλείο, είναι πιο υψηλές από τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο απόβλιττο ή στο τεμάχιο, ενώ η μέγιστη θερμοκρασία του εργαλείου δεν βρίσκεται στην μύτη του εργαλείου αλλά σε θέση που απέχει αρκετά από αυτήν. Το γεγονός αυτό, που έχει σχέση με την ροή του αποβλίττου πάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου, οδηγεί σε δημιουργία κοιλώματος ή κρατήρα πάνω στην επιφάνεια αυτή. Αυτή είναι χαρακτηριστική αιτία για την φθορά του κοπτικού εργαλείου. Ταυτόχρονα όμως, οι υψηλές θερμοκρασίες στην περιοχή της κοπής, έχουν και ευνοϊκή επίδραση πάνω στην **κατεργαστικότητα** του υλικού του τεμαχίου, μια και μειώνεται το όριο διαρροής του. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την κοπή, αυξάνονται όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής ή η ειδική αντίσταση κοπής του κατεργαζόμενου μετάλλου.

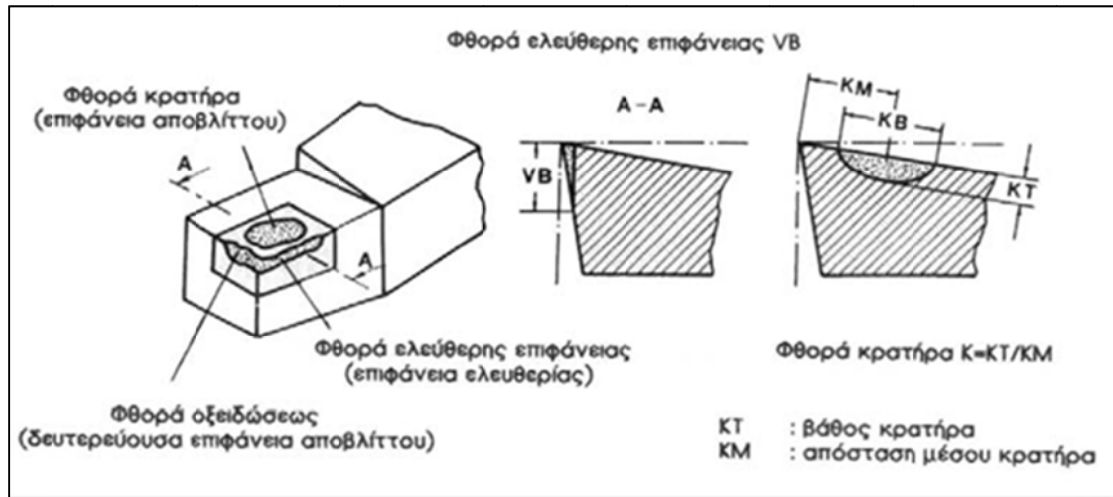
### 1.7 Φθορά κοπτικών εργαλείων

Το κοπτικό εργαλείο κατά την κοπή, υπόκειται όπως προαναφέρθηκε, σε υψηλές θερμοκρασίες και τάσεις. Αυτό έχει σαν συνέπεια το κοπτικό εργαλείο σταδιακά να **φθείρεται** και τελικά να **αστοχεί**, που σημαίνει πως είναι πλέον άχρηστο και πρέπει να επανατροχιστεί ή να απορριφθεί. Η φθορά που αναπτύσσεται παρουσιάζεται με τις παρακάτω μορφές :

- φθορά της ελεύθερης επιφάνειας
- φθορά κρατήρα στην επιφάνεια αποβλίττου
- απολέπιση της κόψης

- μικροθραύσεις, ρωγμές

Στην Εικόνα 1-12, παρουσιάζονται οι μορφές φθοράς των κοπτικών εργαλείων καθώς και τα μεγέθη με τα οποία αυτή μετράται. Γενικά η φθορά του κοπτικού εργαλείου επηρεάζεται σημαντικά από το είδος της κατεργασίας, τις συνθήκες κοπής, τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και το συνδυασμό υλικών εργαλείου – κατεργαζόμενου τεμαχίου.



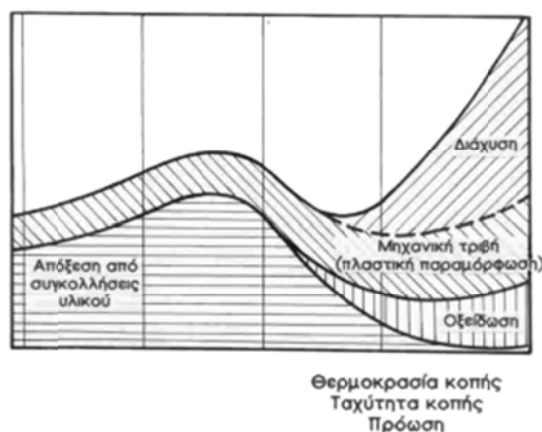
Εικόνα 1-12: Είδη φθοράς κοπτικών εργαλείων

Οι μηχανισμοί βάσει των οποίων εξελίσσεται η φθορά στα κοπτικά εργαλεία είναι οι εξής :

- **σχηματισμός και λύση συγκολλητών δεσμών** : Οι δεσμοί αυτοί δημιουργούνται λόγω της τριβής μεταξύ αποβλίττου και εργαλείου ή εργαλείου και τεμαχίου. Ο διαρκής σχηματισμός και καταστροφή των δεσμών αυτών κατά την διάρκεια της κοπής, έχει σαν συνέπεια την απόσπαση μικρών τεμαχίων από το εργαλείο προς το απόβλιττο ή το τεμάχιο αντίστοιχα.
- **απόξεση** : Σκληρά τεμαχίδια του αποβλίττου κινούμενα και συγχρόνως πιεζόμενα πάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου, την φθείρουν συνεχώς, εκτελώντας κοπή σε μικρή κλίμακα. Τα τεμαχίδια αυτά μπορεί να προέρχονται και από μικρά κομμάτια της ψευδόκοψης.
- **διάχυση στερεάς κατάστασης** : Άτομα από το υλικό του κοπτικού εργαλείου, διαχέονται προς το απόβλιττο ή το τεμάχιο, λόγω της ύπαρξης ευνοϊκών συνθηκών για διάχυση που προσφέρουν οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες και η μεταλλική επαφή του εργαλείου με το απόβλιττο ή το τεμάχιο.

Συνολικά η φθορά που αναπτύσσεται στα κοπτικά εργαλεία είναι συνήθως προϊόν και των τριών προαναφερθέντων μηχανισμών. Στην Εικόνα 1-13

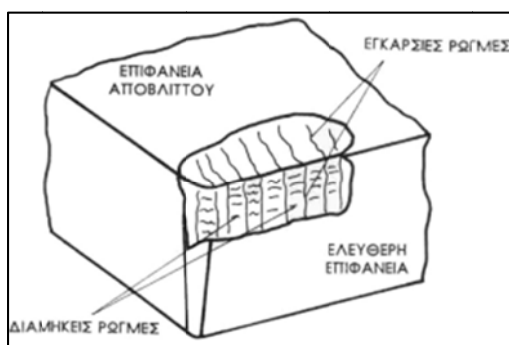
παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά την κοπή, στην ενεργοποίηση των διαφόρων μηχανισμών φθοράς.



**Εικόνα 1-13:** Μορφές φθοράς κατά την κοπή

Έτσι ενώ σε χαμηλές ταχύτητες κοπής και προώσεις, άρα και αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες, η φθορά ακολουθεί κυρίως τους μηχανισμούς της απόξεσης (μέσω της ύπαρξης της ψευδόκοπης) και της φθοράς λόγω σχηματισμού και λύσης συγκολλητών δεσμών (μέσω της τριβής εργαλείου-κατεργαζόμενου τεμαχίου), όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής και η πρόωση, άρα αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες, η φθορά ακολουθεί κυρίως τον μηχανισμό της διάχυσης στερεάς κατάστασης, ενώ παρουσιάζεται και οξείδωση του κοπτικού εργαλείου. Σε υψηλές θερμοκρασίες η φθορά που οφείλεται σε απόξεση είναι ελάχιστη λόγω της ελάττωσης του φαινομένου της ψευδόκοπης στις ταχύτητες αυτές.

Στην Εικόνα 1-14 παρουσιάζονται οι διαμήκεις ρωγμές που αναπτύσσονται στα κοπτικά εργαλεία από σκληρομέταλλα λόγω πολύ υψηλών θερμοκρασιών κοπής. Οι αντίστοιχες διαμήκεις ρωγμές εμφανίζονται λόγω υψηλών μηχανικών καταπονήσεων. [2]



**Εικόνα 1-14:** Ρωγμές σε κοπτικά εργαλεία από σκληρομέταλλο

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μη συμβατικές κατεργασίες αποβολής υλικού**

### **2.1 Εισαγωγή- Η ανάγκη για μη συμβατικές κατεργασίες**

Οι συμβατικές κατεργασίες περιλαμβάνουν συνήθως τη μεταβολή του σχήματος του εργαζόμενου τεμαχίου μέσω εργαλείου κατασκευασμένου από κάποιο σκληρότερο υλικό. Η χρήση συμβατικών μεθόδων για την κατεργασία σκληρών μετάλλων και κραμάτων συνεπάγεται αυξημένες απαιτήσεις χρόνου και ενέργειας και άρα αυξημένο κόστος: σε ορισμένες περιπτώσεις η συμβατική κατεργασία δεν είναι καν εφικτή. Οι συμβατικές κατεργασίες κοστίζουν επίσης από την άποψη της φθοράς του κοπτικού εργαλείου και της μείωσης της ποιότητας του τελικού προϊόντος λόγω των παραμενουσών τάσεων κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Λόγω της ολοένα αυξανόμενης ζήτησης για προϊόντα κατασκευασμένα από σκληρά κράματα και μέταλλα, όπως το Inconel 718 ή το τιτάνιο, το ενδιαφέρον έχει στραφεί προς τις μη συμβατικές κατεργασίες.

### **2.2 Κατάταξη Μη Συμβατικών Μηχανουργικών Κατεργασιών**

Μια συμβατική κατεργασία μπορεί να ορισθεί ως μια διαδικασία που χρησιμοποιεί μηχανική ενέργεια (κίνηση).

Μια μη συμβατική κατεργασία μπορεί να ορισθεί ως μια διαδικασία που χρησιμοποιεί και άλλες μορφές ενέργειας. Αυτές οι κατεργασίες χωρίζονται σε τέσσερες ομάδες, ανάλογα με τη μορφή ενέργειας που χρησιμοποιούν:

- 1. Μηχανικές μέθοδοι.** Μ' αυτές, η αφαίρεση υλικού γίνεται με εφαρμογή της δράσης εκτριβής λειαντικών ή υπερλειαντικών υλικών. Εφαρμόζονται σε περιπτώσεις υλικών όπως, σύνθετα, κεραμικά και οργανικά υλικά που είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και ευαίσθητα σε θερμικά φορτία.
- 2. Ηλεκτροχημικές μέθοδοι.** Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε υλικά που είναι ηλεκτρικά αγωγικά. Μπορούν να παραχθούν πολύπλοκες μορφές με ένα πάσο και στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει φθορά του χρησιμοποιούμενου εργαλείου.
- 3. Ηλεκτροθερμικές μέθοδοι.** Στις θερμικές μεθόδους περιλαμβάνονται δύο από τις πιο διαδεδομένες μη συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) και η χρήση laser. Επειδή μ' αυτές τις μεθόδους γίνεται χρήση της θερμικής ενέργειας, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να απαιτηθεί η αφαίρεση από τα κομμάτια τυχόν θερμικά επηρεασμένων ζωνών ή τουλάχιστον η θερμική κατεργασία τους.

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

Στον Πίνακα 2-1 αναφέρονται οι διάφορες, σε χρήση, μη συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες, κατανεμημένες στις ομάδες που αναφέρθηκαν πιο πριν.

**Πίνακας 2-1:** Μη συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες

**A. Μηχανικές.**

1. Εκτριβή με λειαντικούς κόκκους σε ρεύμα αερίου υψηλής ταχύτητας.
2. Εκτριβή με λειαντικούς κόκκους σε ρευστό υψηλού ιξώδους.
3. Υδατοκοπή.
4. Υδατοκοπή με λειαντικούς κόκκους.
5. Μηχανουργική κατεργασία με χρήση υπερήχων.

**B. Ηλεκτροχημικές.**

1. Ηλεκτροχημική κατεργασία.
2. Ηλεκτροχημική λείανση.
3. Λείανση με ηλεκτροχημική διάβρωση
4. Διάτρηση με ροή ηλεκτρολύτη

**Γ. Ηλεκτροθερμικές**

1. Ηλεκτροδιάβρωση.
2. Ηλεκτροδιάβρωση με σύρμα κοπής
3. Λείανση με ηλεκτροχημική διάβρωση
4. Μηχανουργική κατεργασία με χρήση δέσμης ηλεκτρονίων
5. Μηχανουργική κατεργασία με χρήση δέσμης ακτίνων laser
6. Μηχανουργική κατεργασία με χρήση θερμικής ενέργειας

**Δ. Χημικές.**

1. Αφαίρεση υλικού με χημική δράση.
2. Αφαίρεση υλικού με φωτοχημική δράση.

## **2.3 Περιγραφή των μη συμβατικών μηχανουργικών κατεργασιών**

### **2.3.1 Μηχανικές**

#### **2.3.1.1 Εκτριβή με λειαντικούς κόκκους σε ρεύμα αερίου υψηλής ταχύτητας (Abrasive Jet Machining, AJM)**

Η μέθοδος αυτή εκμεταλλεύεται την αποξεστική ικανότητα κόκκων λειαντικού υλικού που μεταφέρονται στο στόχο με ένα ρεύμα αερίου υψηλής ταχύτητας. Το αέριο είναι απαλλαγμένο από υγρασία και συνήθως είναι αέρας, άζωτο ή διοξείδιο του άνθρακα, πίεσης περί τα 850 kPa και ταχύτητας ~ 300 m/s. Το λειαντικό υλικό είναι, ανάλογα με τη κατεργασία,  $Al_2O_3$  ή SiC για βαριές κατεργασίες,  $MgCO_3$  και  $Na_2CO_3$  για ελαφρότερες και μικρά ψήγματα γυαλιού για τελικό γυάλισμα. Το μέγεθος του κόκκου είναι 10 - 50  $\mu m$ .

**Με τη μέθοδο αυτή :**

- Ανοίγονται οπές και γίνονται κοπές σε σκληρά και εύθραυστα υλικά.
- Χαράζονται γράμματα, αριθμοί ή σχήματα σε επιφάνειες αντικειμένων.
- Καθαρίζονται επιφάνειες από οξειδία ή υπολείμματα κατεργασιών κοπής.
- Καθαρίζονται έργα τέχνης, πολύτιμα έγγραφα, κλπ.

Τα συνήθη προβλήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι στρογγυλεύονται οι οξείες ακμές, η ρύπανση του αέρα από το λειαντικό υλικό, με συνεπαγόμενα προβλήματα αναπνοής και τέλος το γεγονός ότι το λειαντικό υλικό δεν μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί λόγω μόλυνσης του από το υλικό του τεμαχίου.

Το ακροφύσιο απ' όπου εκτοξεύεται το ρεύμα αερίου με τα μεταφερόμενα σωματίδια, κατασκευάζεται συνήθως από WC (καρβίδιο βολφραμίου) και σε μερικές περιπτώσεις από  $SiO_2$  (χαλαζία - σάπφειρο). Η διάρκεια ζωής του εξαρτάται από τη σκληρότητα του χρησιμοποιούμενου λειαντικού υλικού και είναι ~10h για SiC, ~30h για  $Al_2O_3$  και ~300h για ψήγματα γυαλιού ή  $Na_2CO_3$ .

#### **2.3.1.2 Εκτριβή με λειαντικούς κόκκους σε ρευστό υψηλού ιξώδους (Abrasive Flow Machining, AFM)**

Το κατεργαζόμενο κομμάτι περιρρέεται ή διαρρέεται από ρευστό υψηλού ιξώδους (πολυμερές με μορφή ελαστικού, αναμιγμένο με λιπαντικό υγρό) το οποίο μεταφέρει το λειαντικό υλικό (SiC, BoC,  $Al_2O_3$ , διαμάντι) σε μορφή κόκκων μεγέθους 0,5-1,5 $\mu m$ .

Η κίνηση του ρευστού γίνεται με αντλίες με πιέσεις λειτουργίας 700-22000 kPa. Μια τέτοια αντλία περιλαμβάνει δύο αντικριστούς κυλίνδρους, στο

καθένα από τους οποίους κινείται και από ένα έμβολο σε συγχρονισμό μεταξύ τους, με αποτέλεσμα το ρευστό να ωθείται από τον ένα στον άλλο κύλινδρο. Ανάμεσα σ' αυτούς τοποθετείται και συγκρατείται, με τη βοήθεια κατάλληλων διατάξεων, το τεμάχιο. Όπως είναι ευνόητο, η εκτριβή είναι τόσο πιο έντονη όσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα του ρευστού. Αυτό εξαρτάται, κατ' αρχήν, από τη δράση της αντλίας, αλλά σε σταθερές και συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας της, η ροή του υγρού ρυθμίζεται από τη γεωμετρία των διόδων του κομματιού.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για την απομάκρυνση γραζιών κοπής, στρογγύλεμα αιχμηρών ακμών, γυάλισμα επιφανειών τεμαχίων διαφόρων χρήσεων και μεγεθών, από πολύ μικρά (π.χ. γρανάζια διαμέτρου 1,5mm για ρολόγια,) μέχρι εξαρτήματα τουρμπινών (διαμέτρου 1,0m), εξαρτήματα μηχανών, συμπιεστών, χειρουργικά εργαλεία κ.ά.

### **2.3.1.3 Υδατοκοπή (Water-Jet Machining, WJM)**

Η υδατοκοπή χρησιμοποιεί σαν εργαλείο κοπής μια φλέβα νερού υψηλής ταχύτητας. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να κοπούν διάφορα υλικά όπως, πλαστικά, υφάσματα, ελαστικό, προϊόντα ξύλου, χαρτί, δέρμα, μονωτικά, τούβλα, σύνθετα υλικά, κ.τ.λ. Το πάχος των κομματιών, ανάλογα και με το υλικό τους, μπορεί να είναι και περισσότερο από 25 mm. Επειδή είναι μια μέθοδος καθαρής κοπής, χρησιμοποιείται πολύ στη βιομηχανία τροφίμων.

Η κοπή μπορεί να αρχίσει από οποιοδήποτε σημείο του κομματιού χωρίς την ανάγκη πρότυπας, δεν παράγεται θερμότητα, το κομμάτι δεν παραμορφώνεται, δεν παρατηρείται απορρόφηση νερού εκτός από μερικές περιπτώσεις πολύ υδρόφιλων υλικών και το παραγόμενο απόβλητο είναι ελάχιστο και βέβαια δεν υπάρχει φθορά και ανάγκη επανατροχίσισης ή/και αντικατάστασης κοπτικού εργαλείου. Επίσης δεν δημιουργούνται περιβαλλοντικά προβλήματα.

Η πίεση είναι 100-400MPa, το ακροφύσιο έχει διάμετρο από 0,05 μέχρι 1,0 mm, η ταχύτητα της ροής του νερού είναι υψηλή, 400-900 m/s, η δε ταχύτητα κοπής εξαρτάται τόσο από το υλικό όσο και από τη ταχύτητα και τη παροχή της ροής και είναι από 0,1-200 m/min.

### **2.3.1.4 Υδατοκοπή με χρήση λειαντικών κόκκων (Abrasive Water-Jet Machining, AWJM)**

Η απλή υδατοκοπή δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε υλικά που έχουν μεγάλο πάχος ή και μεγάλη πυκνότητα και σκληρότητα. Σ' αυτές τις περιπτώσεις προστίθενται στη φλέβα του νερού σωματίδια λειαντικού υλικού και έτσι είναι δυνατή η κοπή μετάλλων και κραμάτων, κεραμικών υλικών, σύνθετων υλικών,



γυαλιού, πολυμερών υψηλής αντοχής, σε διάφορα πάχη. Το ακροφύσιο κατασκευάζεται από υλικά υψηλής σκληρότητας και αντοχής στην εκτριβή όπως, ρουμπίνι, σάπφειρο, διαμάντι, χαλαζία, κλπ. Η ταχύτητα ροής και η ταχύτητα κοπής είναι στα ίδια πλαίσια όπως και στην απλή υδατοκοπή. Η διαφορά βέβαια, όπως ήδη ειπώθηκε, είναι ότι με τη μέθοδο αυτή κόβονται μεταλλικά υλικά σε μεγαλύτερα πάχη (π.χ. Ti, Al και κράματά τους, αλλά και ταχυχάλυβες και Inconel), μη μεταλλικά υλικά μεγάλης σκληρότητας, εύθραυστα υλικά καθώς και υλικά στα οποία δεν πρέπει, κατά τη κατεργασία, να υψωθεί η θερμοκρασία. Τέλος κόβονται υλικά που δε μπορούν να κοπούν με τις γνωστές συμβατικές μεθόδους όπως π.χ. ανθρακονήματα, γραφίτης, κλπ.

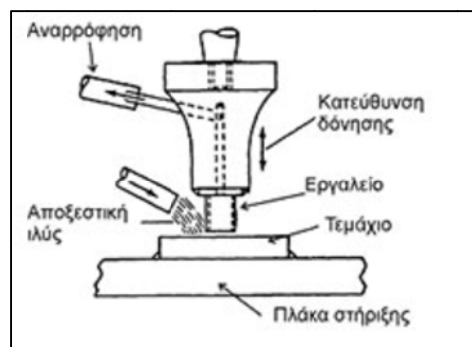
### 2.3.1.5 Μηχανουργική κατεργασία με χρήση υπερήχων (Ultrasonic Machining, USM)

Σ' αυτή τη μέθοδο η κατεργασία γίνεται με χρήση υπερήχων.

Σε γενικές γραμμές, η συσκευή αποτελείται από μια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, συχνότητας 20-40kHz, από ένα ηλεκτρομαγνητικό ή πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανικές δονήσεις και από ένα σύστημα ενίσχυσης και εστίασης των δονήσεων.

Η αφαίρεση υλικού γίνεται με δύο τρόπους:

- Με κρουστική δράση εκτριβής κόκκων λειαντικού υλικού.
- Με περιστρεφόμενο εργαλείο.



Εικόνα 2-1: Κατεργασία με χρήση υπερήχων και τη βοήθεια της κρουστικής αποξεστικής δράσης κόκκων λειαντικού υλικού

Στη πρώτη περίπτωση το εργαλείο δονείται σε πολύ μικρή απόσταση (0,025-0,075 mm) από τη κατεργαζόμενη επιφάνεια. Το εύρος της δόνησης εξαρτάται από το μήκος του μετατροπέα και την αντοχή του υλικού και τυπικά είναι 0,025-0,09 mm. Μεταξύ του εργαλείου και της επιφάνειας του κομματιού ρέει ιλύς υδατικής βάσης με 50% κ.β. λειαντικούς κόκκους μεγέθους από 0,05-0,009 mm (No 240-800). Η δόνηση του εργαλείου εξαναγκάζει τους κόκκους να κινηθούν με μεγάλη ταχύτητα, που σε συνδυασμό με τη πολύ μικρή

διάρκεια επαφής του κόκκου με την επιφάνεια (10-100  $\mu\text{s}$ ), έχει σαν αποτέλεσμα την απόξεση της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Η ιλύς, εκτός από την αποξεστική της δράση παρέχει και ψύξη στο εργαλείο και στο τεμάχιο. Η ταχύτητα κοπής εξαρτάται από τη σκληρότητα του κατεργαζόμενου υλικού. Η μορφή της περιοχής κατεργασίας είναι το θηλυκό αντίστοιχο του άκρου του εργαλείου. Το σοβαρότερο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι για κάθε κατεργασία χρειάζεται ιδιαίτερο εργαλείο αντίστοιχης μορφής.

**Η δεύτερη περίπτωση**, δηλαδή η κατεργασία με περιστρεφόμενο εργαλείο εφαρμόζεται μόνο σε μη μεταλλικά, ψαθυρά υλικά, όπως γυαλί, αλούμινα, κεραμικό, χαλαζία, ζirkονία, ρουμπίνι, σάπφειρο, οξειδίο του Be και μερικά σύνθετα υλικά. Ο λόγος είναι ότι αν το κατεργαζόμενο υλικό είναι, έστω και σε κάποιο βαθμό όλκιμο, τα παραγόμενα γρέζια γρήγορα θα μπλοκάρουν το κοπτικό εργαλείο και η κοπή θα σταματήσει.

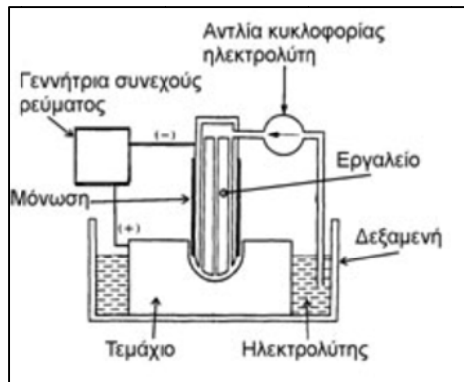
Το περιστρεφόμενο εργαλείο στη περιοχή επαφής του με το κομμάτι έχει επίστρωμα από διαμάντι. Μεταξύ εργαλείου και κομματιού δεν παρεμβάλλεται αποξεστική ιλύς ή αποξεστικό υλικό άλλης μορφής. Η κοπτική δράση γίνεται από το εργαλείο που, δονούμενο με πολύ υψηλή συχνότητα, έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια. Η δόνηση έχει εύρος 0,025-0,05mm. Για τη ψύξη χρησιμοποιείται συνήθως νερό.

Επιπρόσθετα, η μέθοδος αυτή, πέρα από τις μεγάλες δυνατότητες της, είναι κατά πάσα πιθανότητα, και η ασφαλέστερη από όλες τις μεθόδους μηχανουργικών κατεργασιών (συμβατικών ή μη) γιατί δεν χρησιμοποιεί ρεύμα υψηλής τάσης, φλόγα, κοπή, χημικά ή επικίνδυνες μηχανικές κινήσεις. Ακόμα και η επιδερμίδα των χεριών δεν μπορεί να τραυματιστεί αν έρθει σε επαφή με το εργαλείο ή την αποξεστική ιλύ, χάρη στη ελαστικότητα της.

### **2.3.2 Ηλεκτροχημικές**

#### **2.3.2.1 Ηλεκτροχημική κατεργασία (Electrochemical Machining, ECM)**

Στη μέθοδο αυτή, που, βασικά, είναι το αντίθετο της ηλεκτροεπιμετάλλωσης, το τεμάχιο είναι η άνοδος και το εργαλείο η κάθοδος ενός ηλεκτρολυτικού κελιού. Μεταξύ ανόδου και καθόδου εφαρμόζεται μια, συνήθως, χαμηλή συνεχής τάση και έτσι το κελί διαρρέεται από ένα ρεύμα. Κατά τη διαδικασία, το μέταλλο από το τεμάχιο διαλύεται ανοδικά. Μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου υπάρχει ένα διάκενο στο οποίο κυκλοφορεί, με βεβαιωμένη ροή, ο κατάλληλος ηλεκτρολύτης. Αυτός δρα σαν αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος και συγχρόνως απομακρύνει τα ιόντα του μετάλλου προτού αυτά επικαθίσουν στη κάθοδο (και έτσι την επιμεταλλώσουν), δηλαδή, στο εργαλείο.



Εικόνα 2-2: Ηλεκτροχημική κατεργασία

Ο ηλεκτρολύτης, ανάλογα με την εφαρμογή, διοχετεύεται είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά, δια μέσου του εργαλείου, στο οποίο έχουν γίνει, κατά τη κατασκευή του, οι κατάλληλες διόδους. Το σχήμα της περιοχής αφαίρεσης υλικού από το κατεργαζόμενο κομμάτι είναι το θηλυκό αντίστοιχο της άκρης του εργαλείου. Στην Εικόνα 2-2 αποδίδεται σχηματικά η διαδικασία της ηλεκτροχημικής κατεργασίας.

Το εργαλείο κατασκευάζεται από χαλκό, ορείχαλκο, κρατέρωμα, ανοξείδωτο χάλυβα, Monel, τιτάνιο ή αλουμίνιο. Ο ηλεκτρολύτης είναι, συνήθως, υδατικό διάλυμα ανόργανου άλατος (π.χ. NaCl), υψηλής αγωγιμότητας. Ιδανικά ο ηλεκτρολύτης πρέπει να είναι χημικά δραστικός για να αφαιρεί υλικό με ικανοποιητικό ρυθμό η δε διαβρωτική του δράση να είναι ανεκτή ώστε να μη προκαλεί φθορά στα τμήματα της εργαλειομηχανής με τα οποία έρχεται σε επαφή. Το υλικό του κομματιού πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγώγιμο. Η πίεση παροχέτευσης είναι 70-2800 kPa, η εφαρμοζόμενη συνεχής τάση είναι της τάξης των 5-25 V και η πυκνότητα ρεύματος 1,5-8 A/mm<sup>2</sup>. Η ικανότητα διείσδυσης του εργαλείου είναι ανάλογη με τη πυκνότητα ρεύματος, επειδή δε ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού (μετάλλου) είναι συνάρτηση μόνο του ρυθμού εναλλαγής ιόντων δεν επηρεάζεται από ιδιότητες του όπως αντοχή, σκληρότητα ή δυσθραυστότητα. Η πρόωση του εργαλείου είναι της τάξης των 0,25-20 mm/min.

Στις εργαλειομηχανές αυτές, στο κύκλωμα παροχής του ηλεκτρολύτη υπάρχει πάντοτε ένα σύστημα ψύξης για την εναλλαγή της θερμότητας που παράγεται στη περιοχή διάλυσης του μετάλλου και ένα ισχυρό σύστημα καθαρισμού για την απομάκρυνση των προϊόντων της κατεργασίας, συνήθως αδιάλυτων υδροξειδίων ή ένυδρων οξειδίων του μετάλλου του κομματιού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση αντικειμένων πολύπλοκων μορφών, φτιαγμένων από υλικά υψηλής αντοχής. Τυπικά, μ' αυτήν φτιάχνονται πτερύγια τουρμπινών, εξαρτήματα κινητήρων αεροσκαφών, ακροφύσια και μπεκ καυσίμων, περίπλοκες μήτρες σφυρηλάτησης, οπές

μικρής διαμέτρου, κλπ. Λόγω της φύσης της η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για το καθαρισμό κομματιών από μικροπροεξοχές (π.χ. γρέζια). Επίσης δεν εξασκούνται στο κομμάτι δυνάμεις κοπής από το εργαλείο, παρά μόνο υδροδυναμικές πιέσεις από τη ροή του ηλεκτρολύτη και δεν υπάρχουν θερμικά φορτία. Τέλος, κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας, δεν παρατηρείται φθορά του εργαλείου. Συνηθίζεται, στην αρχή της κατεργασίας, να διοχετεύεται για λίγα δευτερόλεπτα στο κελί, ρεύμα αντίστροφης πολικότητας, πράγμα που συμβάλλει στο καθαρισμό του εργαλείου από τυχόν επικαθίσεις ιόντων από προηγούμενη εργασία.

Από την άλλη μεριά δε μπορούν να παραχθούν οξείες ακμές γιατί αυτές, λόγω της τοπικής υψηλής συγκέντρωσης ρεύματος, στρογγυλεύονται και επίσης είναι πιθανό, ανάλογα και με τη μικρογραφική δομή του υλικού του κομματιού, να παρατηρηθεί προσβολή ορίων κόκκων ή ακόμα και περικρυσταλλική διάβρωση.

Τόσο η εργαλειομηχανή όσο και τα πολύ εξειδικευμένα εργαλεία της έχουν υψηλό κόστος, απαιτούν παράλληλες εγκαταστάσεις υποστήριξης, το προσωπικό πρέπει να είναι εξειδικευμένο και συνήθως, για κάθε κατεργασία, πρέπει να γίνει μια πιλοτική παραγωγή με σκοπό τον καθορισμό των τιμών των παραμέτρων της.

### **2.3.2.2 Ηλεκτροχημική λείανση (Electrochemical Grinding, ECG)**

Η μέθοδος αυτή, ονομαζόμενη και ηλεκτρολυτική λείανση, είναι συνδυασμός της ηλεκτροχημικής κατεργασίας και της συμβατικής λείανσης. Η εργαλειομηχανή μοιάζει με μια συμβατική λειαντική μηχανή, με τη διαφορά ότι το εργαλείο - ο λειαντικός τροχός - εδώ είναι μια περιστρεφόμενη κάθοδος, εφοδιασμένη με κόκκους λειαντικού υλικού.

Ο τροχός είναι από μεταλλικό συνδετικό υλικό και έχει κόκκους είτε από διαμάντι είτε από οξείδιο του αλουμινίου. Η περιφερειακή ταχύτητα του τροχού είναι 1200-2000 m/min. Το λειαντικό υλικό δρα σε μονωτικό μεταξύ του τροχού και του κομματιού και απομακρύνει με μηχανική δράση τα προϊόντα της ηλεκτρόλυσης από τη περιοχή κατεργασίας. Μεταξύ του κομματιού και του τροχού κυκλοφορεί ηλεκτρολύτης, συνήθως υδατικό διάλυμα  $\text{NaNO}_3$ , για την εξυπηρέτηση της ηλεκτροχημικής φάσης της κατεργασίας. Το μεγαλύτερο ποσοστό της αφαίρεσης υλικού γίνεται ηλεκτρολυτικά και μόνο ένα ~5% γίνεται από τη λειαντική δράση του τροχού. Κατά συνέπεια η φθορά του είναι πολύ μικρή.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται, γενικά, στις περιπτώσεις κατεργασίας υλικών υψηλής σκληρότητας (καρβίδια όπως WC, ειδικά κράματα όπως Hastelloy,

Inconel, Monel, κλπ.) όπου η χρήση συμβατικών μεθόδων λείανσης θα συνεπαγόταν τη ταχύτερη φθορά των τροχών.

### **2.3.2.3 Λείανση με ηλεκτροχημική διάβρωση (Electrochemical Discharge Grinding, ECDG)**

Η μέθοδος αυτή είναι συνδυασμός της ηλεκτροχημικής λείανσης και της ηλεκτροδιάβρωσης. Ο τροχός κατασκευάζεται είτε από γραφίτη είτε από ορείχαλκο και δεν περιέχει κόκκους λειαντικού υλικού. Μεταξύ του τροχού και του κομματιού κυκλοφορεί ηλεκτρολύτης υψηλής αγωγιμότητας (υδατικό διάλυμα ανόργανων αλάτων, π.χ.  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), η χημική δράση του οποίου προκαλεί αφαίρεση υλικού. Επίσης μεταξύ του κομματιού και του περιστρεφόμενου τροχού εφαρμόζεται ή εναλλασσόμενη τάση ή παλμοί συνεχούς ρεύματος. Οι δημιουργούμενοι σπινθήρες θραύουν τα προϊόντα της χημικής δράσης και αυτά πλέον απομακρύνονται με τη ροή του ηλεκτρολύτη. Η κατανάλωση ενέργειας είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι στην ηλεκτροδιάβρωση, όμως και ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού είναι σημαντικά υψηλότερος. Χρησιμοποιείται για τη κατεργασία αντικειμένων λεπτών μορφών, τυπικά, για χειρουργικά εργαλεία, βελόνες κλπ.

### **2.3.2.4 Διάτρηση με ροή ηλεκτρολύτη (Electrostream Drilling ESD)**

Η κατεργασία αυτή αναπτύχθηκε αρχικά από τη General Electric και τη Rolls Royce με πρωταρχικό σκοπό τη διάνοιξη οπών ψύξης μεγάλου βάθους και μικρής διαμέτρου, σε πτερύγια τουρμπινών και συμπιεστών μηχανών αεροσκαφών.

Το εργαλείο είναι γυάλινος σωλήνας και ο ηλεκτρολύτης υδατικό διάλυμα (15-20% κ.β.) οξέως ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ) σε θερμοκρασία 20-40 °C και πίεση 250-400 kPa. Η διαφορά από την απλή ηλεκτροχημική κατεργασία είναι ότι εδώ εφαρμόζεται πολύ υψηλότερη τάση και σημαντικά μικρότερη ένταση. Συνήθως το ρεύμα είναι πλήρως ανορθωμένο 600-900 V, 25 A. Το υλικό του τεμαχίου πρέπει να είναι αγώγιμο.

#### **α. Πλεονεκτήματα**

- Η σκληρότητα του υλικού δεν επηρεάζει την κατεργασία.
- Ο λόγος των γεωμετρικών στοιχείων της διανοιγόμενης οπής, δηλ. βάθος/διάμετρο μπορεί να είναι πολύ μεγάλος.
- Μπορούν να ανοιχτούν πολλές τρύπες ταυτοχρόνως.
- Δεν υπάρχουν συνέπειες μεταλλουργικής φύσης.
- Είναι δυνατή η κατεργασία προϊόντων κονιομεταλλουργίας.
- Η διάτρηση είναι καθαρή χωρίς γρέζια.

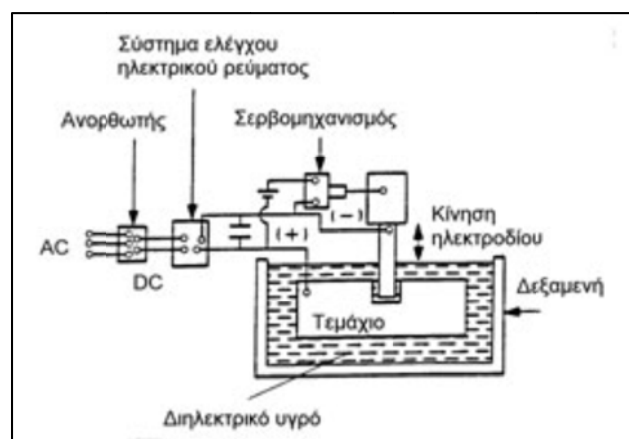
## β. Μειονεκτήματα.

- Το υλικό του κομματιού πρέπει να έχει αντοχή στη διάβρωση (ανοξειδωτος χάλυβας, κράματα Ni και Co, κλπ.).
- Η διαδικασία είναι σχετικά αργή ιδιαίτερα όταν ανοίγεται μια οπή τη φορά.
- Οι ηλεκτρολύτες μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα (αποθήκευση, χρήση, διάθεση αποβλήτων, τοξικοί ατμοί).
- Απαιτούνται ειδικά φίλτρα καθαρισμού (~0,5μm) όταν εφαρμόζεται επανακυκλοφορία του ηλεκτρολύτη.

### 2.3.3 Ηλεκτροθερμικές

#### 2.3.3.1 Ηλεκτροδιάβρωση (Electrical Discharge Machining, EDM)

Η αρχή της κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση βασίζεται στην αφαίρεση μετάλλου με τη βοήθεια ηλεκτρικού σπινθήρα. Γνωρίζουμε από τη πράξη, ότι όταν δύο ηλεκτρικά αγωγά και φορτισμένα σώματα έρθουν σε επαφή, δημιουργείται ένας σπινθήρας. Αν παρατηρήσουμε προσεκτικά το σημείο επαφής, θα δούμε ότι μια μικρή ποσότητα μετάλλου έχει φύγει και έχει δημιουργηθεί ένας κρατήρας. Αυτό θα συμβεί αν π.χ. γεφυρώσουμε τους πόλους μιας μπαταρίας αυτοκινήτου. Παρ' όλο που η αρχή αυτή ήταν γνωστή σχεδόν από την ανακάλυψη του ηλεκτρισμού, εν τούτοις, μέθοδος κατεργασίας βασισμένη σ' αυτήν, δεν αναπτύχθηκε παρά το 1940. Η ηλεκτροδιάβρωση είναι πια μια από τις πιο σημαντικές και πιο διαδεδομένες από τις μη συμβατικές μεθόδους κοπής.



Εικόνα 2-3: Διάταξη κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση

Η διάταξη της ηλεκτροδιάβρωσης αποτελείται από το εργαλείο (κάθοδος) και το τεμάχιο (άνοδος). Και τα δύο είναι συνδεδεμένα σε μια γεννήτρια παροχής συνεχούς ρεύματος και είναι τοποθετημένα μέσα σε ένα διηλεκτρικό υγρό. Όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου πάρει την αναγκαία τιμή, τότε μεταξύ τους δια μέσου του υγρού ξεσπάει ένας σπινθήρας. Το αποτέλεσμα είναι η αφαίρεση, με εξάτμιση ή λιώσιμο, μιας πολύ μικρής

ποσότητας μετάλλου από την επιφάνεια του τεμαχίου. Ο σπινθήρας παράγεται με συχνότητα 50 kHz-500 kHz, η εφαρμοζόμενη τάση είναι 50 V-300 V και η ένταση του ρεύματος 0,1 A-500 A.

Η μορφή της περιοχής αφαίρεσης υλικού από το τεμάχιο είναι το θηλυκό αντίστοιχο της άκρης του εργαλείου. Μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου υπάρχει πάντα ένα διάκενο, από 0,01-0,4 mm. Το μέγεθος του διακένου είναι μεγάλης σπουδαιότητας για τη διαδικασία και πρέπει να διατηρείται σταθερό σε όλη τη διάρκειά της. Η εργαλειομηχανή της ηλεκτροδιάβρωσης είναι σχεδόν αποκλειστικά NC ή CNC και η κίνηση του εργαλείου γίνεται με σερβομηχανισμό.

Το διηλεκτρικό υγρό δρα σε μονωτής μεταξύ ανόδου και καθόδου, έτσι ώστε ο σπινθήρας να ξεσπάει όταν η διαφορά δυναμικού έχει λάβει τη κατάλληλη τιμή που βέβαια είναι η τάση διάσπασης του υγρού. Επίσης, το διηλεκτρικό υγρό, με τη βεβαιωμένη κυκλοφορία του, απομακρύνει τα προϊόντα της κατεργασίας και βοηθάει στην απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας. Γι' αυτό, στο κύκλωμα του, παρεμβάλλεται φίλτρο και εναλλάκτης θερμότητας. Συνήθως, σε διηλεκτρικά υγρά χρησιμοποιούνται ορυκτέλαια (π.χ. λάδια μετασχηματιστών). Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και κηροζίνη καθώς και αποσταγμένο και απιονισμένο νερό.

Το υλικό του τεμαχίου πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγώγιμο. Το σημείο τήξης του και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του έχουν μεγάλη σημασία και επηρεάζουν άμεσα το ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Τυπικά, με κάθε σπινθήρα, απομακρύνεται όγκος υλικού της τάξης των  $10^{-6}$ - $10^{-11}$  mm<sup>3</sup>. Η σκληρότητα, η αντοχή και η δυσθραυστότητα του υλικού δεν επηρεάζουν το ρυθμό της κατεργασίας.

Το εργαλείο φτιάχνεται συνήθως από γραφίτη αλλά και από ορείχαλκο, χαλκό ή κράμα χαλκού - βολφραμίου. Ένα πολύ σημαντικό σημείο της διαδικασίας της ηλεκτροδιάβρωσης είναι η φθορά του εργαλείου που προκαλείται από τη δημιουργία των σπινθήρων. Έτσι λοιπόν, όσο πιο χαμηλό είναι το σημείο τήξης του υλικού του εργαλείου, τόσο πιο μεγάλος είναι ο ρυθμός της φθοράς του. Τα ηλεκτρόδια από γραφίτη έχουν τη μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά.

Η κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση εφαρμόζεται σε πολυάριθμες περιπτώσεις, όπως στη διαμόρφωση καλουπιών σφυρηλάτησης, στη διάνοιξη οπών και εγκοπών, στη παραγωγή πτερυγίων για τουρμπίνες, στη διαμόρφωση εσωτερικών κοιλοτήτων πολύπλοκων μορφών, κλπ. Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού κυμαίνεται από 2-400 mm<sup>3</sup>/min. Η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας εξαρτάται από τη συχνότητα των σπινθήρων και την ένταση του ρεύματος, δηλαδή από το ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Υψηλός ρυθμός αφαίρεσης υλικού δημιουργεί τραχιά επιφάνεια που, ακραία, μπορεί να πάρει την

εμφάνιση τηγμένου και επαναστερεοποιημένου υλικού. Έτσι οι κατεργασίες φινιρίσματος γίνονται με χαμηλούς ρυθμούς αφαίρεσης υλικού ή γίνεται τελική επεξεργασία της επιφάνειας με άλλη μέθοδο, π.χ. λείανση.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της κατεργασίας με ηλεκτροδιάβρωση, είναι τα εξής:

- Είναι δυνατή η παραγωγή πολύπλοκων κοιλοτήτων με λεπτά τοιχώματα γιατί, αφού το εργαλείο δεν έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο, δεν εξασκούνται δυνάμεις πάνω του.
- Είναι δυνατή η παραγωγή αντικειμένων με πολύπλοκη γεωμετρική μορφή.
- Είναι δυνατή η κατεργασία δυσκολοκατέργαστων υλικών (πολύ σκληρών, εύθραυστων, κλπ.).
- Οι κατεργασμένες επιφάνειες είναι καθαρές από υπολείμματα υλικού (γρέζια).

### **Επίδραση της ηλεκτροδιάβρωσης στο υλικό του τεμαχίου**

#### **A. Τοπολογικά.**

Η ηλεκτροδιάβρωση δημιουργεί στη κατεργασμένη επιφάνεια μια πολύ χαρακτηριστική μορφή που αποτελείται από κρατήρες που είναι όλοι του ίδιου μεγέθους. Δεν παρατηρείται κάποιος προσανατολισμός στις διάταξη των κρατήρων, όπως π.χ. στα ίχνη πρόωσης στις συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες.

Το μέγεθος (διάμετρος και βάθος) των κρατήρων εξαρτάται από την ενέργεια του σπινθήρα που βέβαια εξαρτάται από τις παραμέτρους της κατεργασίας (συχνότητα, ένταση ρεύματος, διαφορά δυναμικού). Γενικά, η τραχύτητα  $R_a$  της επιφάνειας κυμαίνεται από 0,2-12,5  $\mu\text{m}$ . Χαρακτηριστικό της ηλεκτροδιάβρωσης είναι ότι, όπως προκύπτει από τη τοπολογία της επιφάνειας, οι προεξοχές αποτελούν ένα μικρό ποσοστό της. Έτσι, αν μετά την κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση, γίνει επεξεργασία της επιφάνειας με λεπτή λείανση, τότε η τραχύτητα της βελτιώνεται πολύ γρήγορα στη αρχή και μετά, όταν οι προεξοχές εξομαλυνθούν, με πολύ αργότερο ρυθμό.

Η ηλεκτροδιάβρωση δημιουργεί στη κατεργασμένη επιφάνεια μια πολύ χαρακτηριστική μορφή που αποτελείται από κρατήρες που είναι όλοι του ίδιου μεγέθους. Δεν παρατηρείται κάποιος προσανατολισμός στις διάταξη των κρατήρων, όπως π.χ. στα ίχνη πρόωσης στις συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες. Το μέγεθος (διάμετρος και βάθος) των κρατήρων εξαρτάται από την ενέργεια του σπινθήρα που βέβαια εξαρτάται από τις παραμέτρους της κατεργασίας (συχνότητα, ένταση ρεύματος, διαφορά δυναμικού). Γενικά, η



τραχύτητα Ra της επιφάνειας κυμαίνεται από 0,2-12,5  $\mu\text{m}$ . Χαρακτηριστικό της ηλεκτροδιάβρωσης είναι ότι, όπως προκύπτει από τη τοπολογία της επιφάνειας, οι προεξοχές αποτελούν ένα μικρό ποσοστό της. Έτσι, αν μετά την κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση, γίνει επεξεργασία της επιφάνειας με λεπτή λείανση, τότε η τραχύτητα της βελτιώνεται πολύ γρήγορα στη αρχή και μετά, όταν οι προεξοχές εξομαλυνθούν, με πολύ αργότερο ρυθμό.

## **B. Μεταλλογραφικά - Φυσιολογία.**

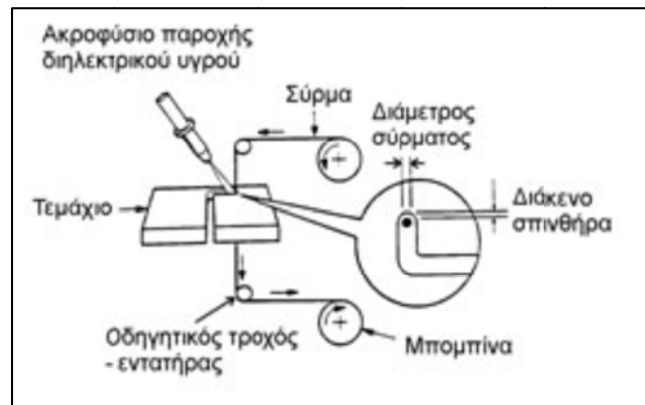
Όπως είδαμε, κατά τη δημιουργία του σπινθήρα, μέταλλο από την επιφάνεια του τεμαχίου λειώνει ή εξατμίζεται. Με τη ψυκτική δράση του κυκλοφορούντος διηλεκτρικού υγρού αλλά και με τη μετάδοση της θερμότητας προς το εσωτερικό του σώματος του τεμαχίου, η πήξη είναι ταχύτερη και έτσι το πάχος του επιφανειακού στρώματος που επηρεάζεται από την ηλεκτροδιάβρωση είναι πολύ λεπτό, της τάξης του 0,15 mm για ξεχονδρίσματα και 0,01 mm για φινιρίσματα. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι η μέθοδος μέτρησης του πάχους αυτού του επιφανειακού στρώματος είναι καθοριστική για το προσδιορισμό του και η επιλογή της θα εξαρτηθεί από την αναμενόμενη χρήση του τεμαχίου και επομένως από τη ιδιότητα εκείνη του υλικού που θα είναι πρωταρχικής σημασίας για τη συγκεκριμένη χρήση. Έτσι λοιπόν, το πάχος του επιφανειακού στρώματος μπορεί να προσδιοριστεί από μετρήσεις της σκληρότητας, υπολειπόμενων τάσεων, βάθους μεταλλογραφικών μεταβολών, κλπ.

Το επιφανειακό στρώμα που προκύπτει κατά τη κατεργασία με ηλεκτροδιάβρωση μπορεί να χωριστεί σε δύο υποστρώσεις, τη στρώση στερεοποίησης και τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Η στρώση στερεοποίησης έχει τη χαρακτηριστική μορφή υλικού που στερεοποιήθηκε πολύ γρήγορα, ενώ η θερμικά επηρεασμένη ζώνη έχει τη δομή ανοπτημένου ή επαναφερμένου υλικού. Προφανώς αυτά εξαρτώνται άμεσα από το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Σημειώνεται εδώ ότι η ηλεκτροδιάβρωση χρησιμοποιείται ευρύτατα για τη κατεργασία μητρών και καλουπιών από χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Σε τεμάχια από τέτοιο υλικό, η ζώνη στερεοποίησης, έχει τη μεγαλύτερη σκληρότητα, λόγω μαρτενσιτικής δομής, ενώ η θερμικά επηρεασμένη ζώνη, αποτελούμενη από επαναφερμένο μαρτενσίτη, έχει μικρότερη σκληρότητα. Αυξημένη περιεκτικότητα του υλικού σε άνθρακα, στην επιφανειακή στοιβάδα, θα έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία πολύ μαρτενσίτη και κατά συνέπεια αύξηση του κινδύνου εμφάνισης ρωγμών κατά τη χρήση. Βέβαια ένα μονοφασικό υλικό ή ένα σκληρυνόμενο με κατακρήμνιση θα έχει διαφορετική συμπεριφορά.

Μερικές φορές παρατηρείται στη επιφάνεια του τεμαχίου απόθεση μικροποσοτήτων από το υλικό του εργαλείου ή άνθρακα από το διηλεκτρικό υγρό. Η φυσιολογία της επιφάνειας που προκύπτει από την ηλεκτροδιάβρωση έχει άμεση επίδραση στις ιδιότητες του τεμαχίου και τη συμπεριφορά του κατά τη χρήση του. Τόσο στη στρώση στερεοποίησης, όσο και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη δημιουργείται πεδίο εφελκυστικών τάσεων που έχουν αρνητική επίδραση στην αντοχή του τεμαχίου στην κόπωση. Επίσης στη στρώση στερεοποίησης δημιουργούνται μικρορωγμές που μπορεί να λειτουργήσουν σα περιοχές εκκίνησης ρωγμών που θα καταλήξουν στην αστοχία του κομματιού. Έτσι σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αναγκαία η μετεπεξεργασία του κομματιού για την αφαίρεση τόσο της στρώσης στερεοποίησης όσο και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Αυτό γίνεται συνήθως ή με λείανση ή ηλεκτροχημικά. Υπάρχουν όμως εφαρμογές στις οποίες μια τέτοια φυσιολογία της επιφάνειας, όπως αυτή που προκύπτει από την ηλεκτροδιάβρωση, είναι ευνοϊκή όπως π.χ. στη περίπτωση μητρών όπου η αυξημένη επιφανειακή σκληρότητα σε συνδυασμό με την ικανότητα κατακράτησης στην επιφάνεια λιπαντικού, συμβάλλει στην επιμήκυνση της ζωής τους.

### 2.3.3.2 Ηλεκτροδιάβρωση με σύρμα κοπής (Wire EDM ή Traveling-Wire EDM ή Electrical Discharge Wire Cutting, EDWC)



Εικόνα 2-4: Διάταξη κοπής με ηλεκτροδιάβρωση

Μια παραλλαγή της ηλεκτροδιάβρωσης που περιγράφηκε προηγουμένως, είναι η ηλεκτροδιάβρωση με σύρμα. Η κατεργασία αυτή είναι αντίστοιχη της κοπής με πριονοκορδέλα ή της κοπής μαρμάρων, γρανιτών, κλπ. με σύρμα. Στη διαδικασία αυτή, ένα σύρμα κινείται κατά μήκος μιας διαδρομής, κόβοντας το τεμάχιο με σπινθήρες που εδώ επενεργούν όπως τα δόντια της πριονοκορδέλας ή οι κοπτικοί κόκκοι του σύρματος κοπής ορυκτών.

Με το τρόπο αυτό μπορούν να κοπούν τεμάχια πάχους μέχρι 300 mm, διαφόρων μορφών. Το σύρμα φτιάχνεται από ορείχαλκο, χαλκό, βολφράμιο

και τυπικά έχει διάμετρο 0,25 mm, οπότε οι κοπές που γίνονται έχουν πολύ μικρό πλάτος. Το υλικό του σύρματος πρέπει να έχει καλή αντοχή σε εφελκυσμό, δυσθραυστότητα και πολύ καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Κατά τη κατεργασία το σύρμα ξετυλίγεται και τυλίγεται σε μπομπίνες. Στη διαδρομή του προβλέπονται οδηγητικοί τροχοί - εντατήρες που αποτρέπουν τη ταλάντωση ή τη χαλάρωση του σύρματος στη περιοχή της κοπής, όπου και προσάγεται συνεχώς με ακροφύσια το διηλεκτρικό υγρό (εδώ σχεδόν πάντοτε απιονισμένο νερό), που απομακρύνει τα προϊόντα της κοπής και ψύχει το σύρμα και το κομμάτι.

Επειδή το κόστος του σύρματος είναι χαμηλό, χρησιμοποιείται, συνήθως, μόνο μια φορά. Κατά τη κατεργασία, κινείται με σταθερή ταχύτητα 0,15-9 m/min. Μεταξύ του σύρματος και του κομματιού διατηρείται ένα σταθερό διάκενο, όπως και στην απλή ηλεκτροδιάβρωση. Η ταχύτητα κοπής (που εδώ είναι το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής της κοπής στη μονάδα του χρόνου) αντιστοιχεί σε γραμμική ταχύτητα κοπής της τάξης των 5 mm/min.

### **2.3.3.3 Λείανση με ηλεκτροδιάβρωση (Electrical Discharge Grinding, EDG)**

Στο τρόπο αυτό λείανσης, ο λειαντικός τροχός φτιάχνεται από γραφίτη ή ορείχαλκο και δεν περιέχει κόκκους λειαντικού υλικού. Το υλικό αφαιρείται από την επιφάνεια του κομματιού χάρη στη δράση επαναλαμβανόμενων σπινθήρων μεταξύ του περιστρεφόμενου τροχού και του κομματιού.

### **2.3.3.4 Μηχανουργική κατεργασία με χρήση δέσμης ηλεκτρονίων (Electron Beam Machining, EBM)**

Στη θερμική αυτή μέθοδο κατεργασίας γίνεται αφαίρεση υλικού με χρήση δέσμης ηλεκτρονίων υψηλής ταχύτητας. Η δέσμη κτυπάει την επιφάνεια του κομματιού και προκαλεί ταχεία τήξη και εξάτμιση υλικού. Όταν η δέσμη χρησιμοποιείται για διαμπερή διάτρηση (που, σαν κατεργασία, καλύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό των εφαρμογών αυτής της μεθόδου), τότε το κατεργαζόμενο κομμάτι πρέπει να στηρίζεται σε μια βάση.

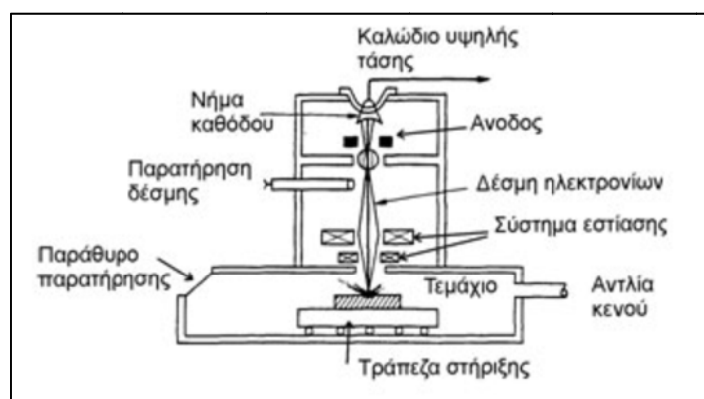
Η διαδικασία μπορεί να περιγραφεί ως εξής :

1. Η εστιασμένη δέσμη των ηλεκτρονίων, λειώνει και εξατμίζει, στο σημείο προσβολής, το υλικό του τεμαχίου. Η δέσμη εισχωρεί στο εσωτερικό του κομματιού και συνεχίζει να το εξατμίζει.
2. Ο παραγόμενος ατμός διαφεύγει και δημιουργεί έτσι ένα τριχοειδή αγωγό, τα τοιχώματα του οποίου καλύπτονται από λειωμένο υλικό.
3. Όταν η δέσμη διαπεράσει το υλικό, τότε προσβάλλει το υλικό της πλάκας στήριξης και το εξατμίζει.

4. Η πίεση των δημιουργούμενων ατμών αυξάνεται ταχύτατα, μέχρις ότου εκτινάξουν το λειωμένο υλικό που είχε συσσωρευτεί στα τοιχώματα της οπής.

Με τη δέσμη ηλεκτρονίων μπορεί να γίνει κατεργασία μεγάλης ποικιλίας υλικών, οι ιδιότητες των οποίων (σκληρότητα, ολκιμότητα, ηλεκτρική - θερμική αγωγιμότητα, σημείο τήξης) συνήθως, δεν επιβάλλουν περιορισμούς. Στη πράξη πάντως, η συνηθέστερη και σημαντικότερη εφαρμογή αυτής της μεθόδου κατεργασίας, είναι η διάνοιξη μικρών οπών (0,1-1,0 mm) υψηλής ακριβείας, σε μέταλλα.

Στην Εικόνα 2-5. φαίνεται η γενική διάταξη μιας συσκευής κατεργασίας με δέσμη ηλεκτρονίων.



Εικόνα 2-5: Γενική διάταξη συσκευής κατεργασίας με δέσμη ηλεκτρονίων

Η δέσμη ηλεκτρονίων παράγεται από ένα κανόνι ηλεκτρονίων (όπως και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο), που επιταχύνει ηλεκτρόνια, παραγόμενα από ένα νήμα βολφραμίου (κάθοδος), που θερμαίνεται από ρεύμα που διαρρέει. Μεταξύ του νήματος και μιας ανόδου εφαρμόζεται τάση  $\sim 120$  kV που επιταχύνει τα ηλεκτρόνια μέχρι το 60-80% της ταχύτητας του φωτός. Η άνοδος φέρει οπή δια μέσου της οποίας περνάει η δέσμη και στη συνέχεια, μέσω ηλεκτρομαγνητικών φακών, εστιάζεται, εξασφαλίζεται ότι η εγκάρσια διατομή της είναι κυκλική και μετά από κατάλληλη στόχευση προσβάλλει το επιθυμητό σημείο της επιφάνειας του κομματιού. Το ρεύμα της δέσμης ρυθμίζεται από 1-80 mA και η ισχύς του παλμού μπορεί να φτάσει και τα 12 kW. Για εφαρμογές διάτρησης, αρκεί ένας παλμός ανά οπή. Η πυκνότητα ισχύος της δέσμης είναι πολύ υψηλή, πάνω από  $10^6$  W/mm<sup>2</sup>.

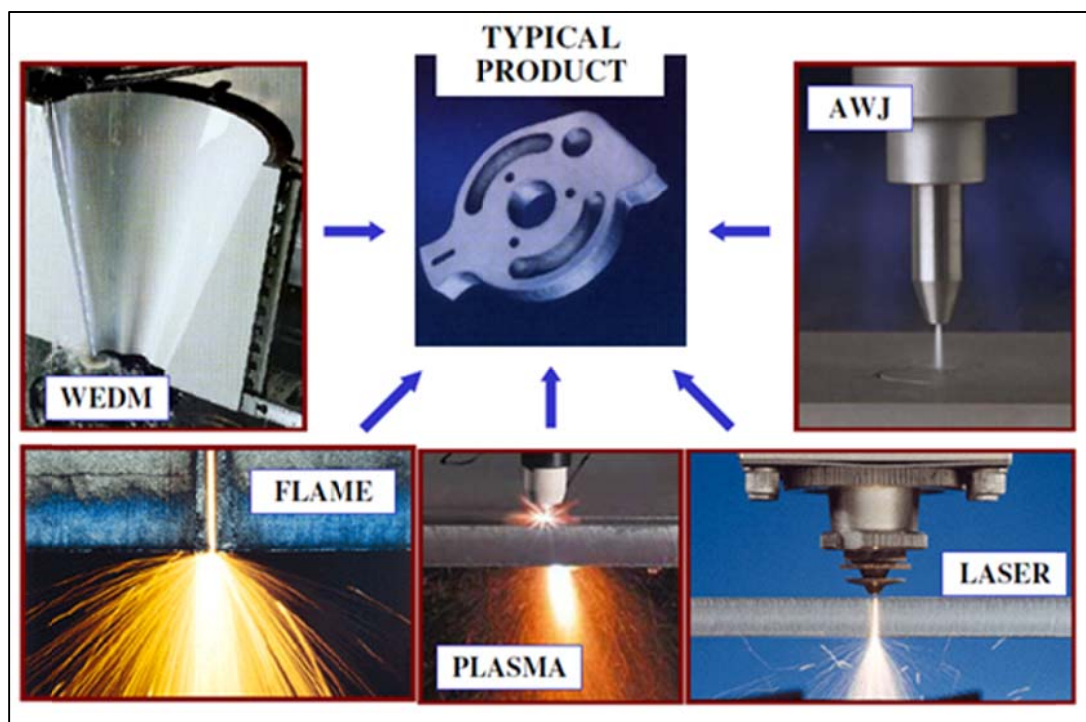
Όπως και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, έτσι και εδώ, το νήμα παραγωγής ηλεκτρονίων, τα συστήματα εστίασης της δέσμης και το κομμάτι πρέπει να είναι σε θάλαμο κενού (πίεσης, συνήθως, 1Pa) και αυτό γιατί, αλλιώς, αφ' ενός το νήμα θα καεί αμέσως και αφ' ετέρου η δέσμη ηλεκτρονίων, προσκρούοντας στα μόρια του αέρα, θα εκτραπεί και θα χάσει γρήγορα το μεγαλύτερο μέρος της κινητικής της ενέργειας. Δύο από τις πιο συνηθισμένες εφαρμογές αυτής

της μεθόδου κατεργασίας, είναι η διάνοιξη οπών ψύξης στην κεφαλή του θαλάμου καύσης κινητήρων αεροσκαφών και η διάνοιξη οπών σε περιστρεφόμενη κεφαλή παραγωγής νημάτων υαλοβάμβακα. Το σημαντικότερο πρόβλημα αυτής της μεθόδου είναι η παραγωγή βλαβερών ακτίνων X, από την αλληλεπίδραση της δέσμης των ηλεκτρονίων με την επιφάνεια του κομματιού.

### 2.3.3.5 Μηχανουργική κατεργασία με χρήση δέσμης ακτίνων laser (Laser Beam Machining, LBM).

Σ' αυτή τη μέθοδο, η κατεργασία γίνεται με τη βοήθεια μιας δέσμης μονοχρωματικού φωτός που εστιάζεται στο στόχο, που είναι η επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού. Η ανάλυσή της παρατίθεται στο επόμενο κεφάλαιο., αφού αναλυθεί πρώτα η διαδικασία παραγωγής του laser.

Στην Εικόνα 2-6 παρουσιάζει τη χρήση συνδυασμού διαφόρων μη συμβατικών κατεργασιών, για την παραγωγή του εικονιζόμενου προϊόντος [3]



Εικόνα 2-6: Συνδυασμός μη συμβατικών κατεργασιών [4]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εισαγωγή στη λειτουργία των laser

### 3.1 Εισαγωγή- Ορισμός

Σίγουρα ο προηγούμενος αιώνας μας άφησε ένα πλήθος τεχνολογικών και επιστημονικών επιτευγμάτων και τέθηκαν οι βάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη των ήδη εφαρμοζόμενων ανακαλύψεων. Μια τέτοια ανακάλυψη είναι και το **LASER**, δηλαδή: **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**, και στα ελληνικά: **Ενίσχυση Φωτός Μέσω Εξαναγκασμένης Εκπομπής Ακτινοβολίας**.

Το laser είναι μια συσκευή που εκπέμπει φως (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) μέσω μιας διαδικασίας οπτικής ενίσχυσης, η οποία βασίζεται στην εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων. Στην εξαναγκασμένη αποδιέγερση ένα φωτόνιο πέφτει στο διηγεμένο άτομο και εξαναγκάζει το ηλεκτρόνιο να επιστρέψει στη θεμελιώδη του κατάσταση εκπέμποντας ένα φωτόνιο ίδιο με το φωτόνιο που προκάλεσε την αποδιέγερση. Τα δύο αυτά φωτόνια μπορούν να αναγκάσουν άλλα δύο διηγεμένα άτομα να εκπέμψουν άλλα δύο φωτόνια κ.ο.κ. Έτσι από ένα φωτόνιο μπορούμε να πάρουμε χιλιάδες ίδια. Έχω δηλαδή **ενίσχυση**. Όταν λέμε ότι τα εξαναγκασμένα φωτόνια είναι ίδια δεν εννοούμε μόνο ότι έχουν την ίδια ενέργεια ην αλλά και την ίδια διεύθυνση και φάση. Μπορώ λοιπόν να έχω μια φωτεινή πηγή που να μου δίνει μια δέσμη παράλληλη μιας μόνο συχνότητας (μονοχρωματική) και σταθερής φάσης (σύμφωνη). Λόγω ακριβώς αυτών των ιδιοτήτων τα laser χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές εφαρμογές.

Όταν η ακτινοβολία βρίσκεται στο μήκος κύματος των μικροκυμάτων η συσκευή ονομάζεται **MASER**. Ο όρος **LASER** αναφέρεται τόσο στην ακτινοβολία όσο και στην συσκευή που την παράγει. Η σημασία της συσκευής αυτής είναι τεράστια τόσο λόγω της ευρύτατης συμβολής της σε πολλούς κλάδους της επιστημονικής έρευνας όσο και λόγω των ποικίλων επιστημονικών και τεχνικών εφαρμογών της.

Αποτελεί πραγματικά πρωτοφανές μέσο επιστημονικής έρευνας, μέσω του οποίου αφενός κατορθώθηκε η πληρέστερη και ακριβέστερη διερεύνηση φαινομένων μέχρι τόσο μεγάλο βαθμό ώστε τα αποτελέσματα να θεωρούνται πλέον αδιαμφισβήτητα, και αφετέρου ανακαλύφθηκαν νέα σπουδαιότατα φαινόμενα, αμοιβαίας αλληλεπίδρασης φωτός και ύλης.

Εξάλλου οι εφαρμογές του laser είναι ευρύτατες και συνεχώς επεκτείνονται. Στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος παραγωγής της ακτινοβολίας laser, καθώς και η συσκευή από την οποία παράγεται.

### 3.2 Ιστορική αναδρομή

Το 1954 ο **Charles Townes** στις ΗΠΑ και, ξεχωριστά, οι **Basov** και **Prokhorov** στην ΕΣΣΔ, πρότειναν μια πρακτική μέθοδο παραγωγής laser. Αυτή ήταν με τη χρησιμοποίηση αέριας αμμωνίας και την παραγωγή συντονισμένης ακτινοβολίας στην περιοχή των μικροκυμάτων, δημιουργία δηλαδή του **MASER**. Για αυτή τους την ανακάλυψη τιμήθηκαν και με το βραβείο Nobel Φυσικής το 1964.

Στα εργαστήρια της Bell στις ΗΠΑ, το 1958, οι **Charles Townes** και **Arthur Shawlow**, δημοσίευσαν στο *Physical Review*, το περιοδικό της American Physical Society, ένα άρθρο που εισήγαγε ένα νέο επιστημονικό πεδίο, στο οποίο περιγράφονταν οι απαραίτητες συνθήκες και υπολογισμοί για να προκύψει ορατό, πλέον, laser. Η αλήθεια είναι ότι δεν είχαν ουδέποτε διανοηθεί τη μεγάλη επίδραση που θα είχε η ανακάλυψη τους από τις τηλεπικοινωνίες μέχρι τη φαρμακευτική βιομηχανία. Αυτοί απλώς επιδίωκαν να σχεδιάσουν μια κατάλληλη συσκευή με την βοήθεια της οποίας θα μελετούσαν καλύτερα τις δομές των μορίων.

Η συσκευή των Shawlow και Townes φαίνεται στην Εικόνα 3-1:

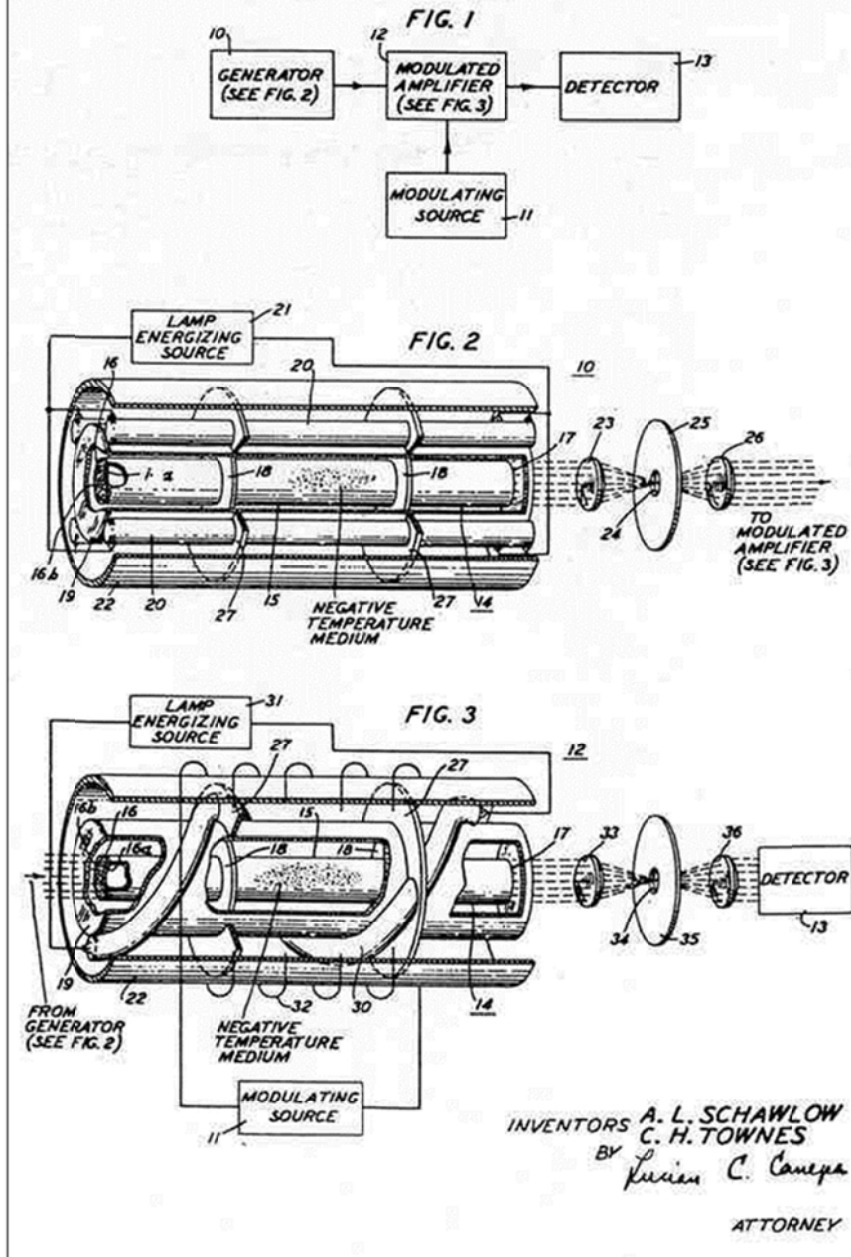
March 22, 1960

A. L. SCHAWLOW ET AL

2,929,922

MASERS AND MASER COMMUNICATIONS SYSTEM

Filed July 30, 1958



Εικόνα 3-1: Η συσκευή των Shawlow και Townes

Τελικά το 1960 το πρώτο **πραγματικό LASER** παρουσιάστηκε από τον Αμερικάνο φυσικό **T. Maiman**, με τη χρήση του τεχνητού κρυστάλλου του ρουβινίου, ως φορέα των ιόντων Cr από τα οποία εκπέμπεται η ακτινοβολία.





Εικόνα 3-2: Το πρώτο laser

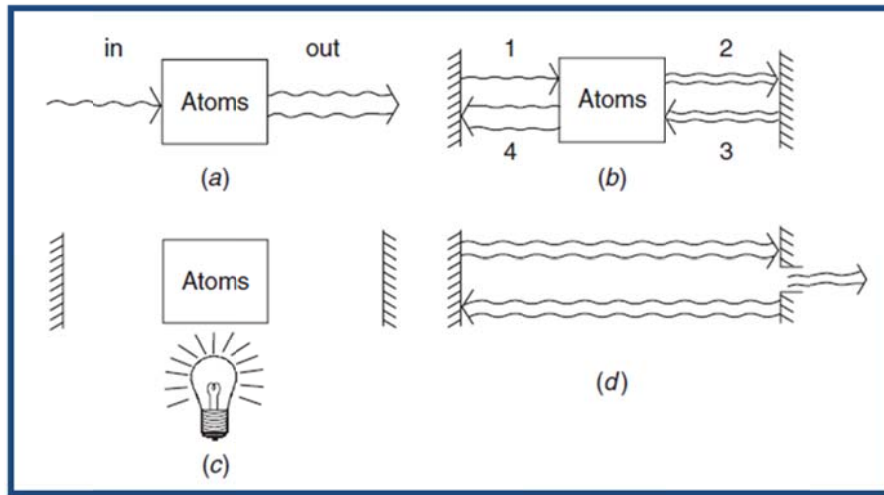
Πιο νωρίς, το ίδιο έτος, ο Αμερικάνος **A. Javan**, πέτυχε laser με μίγμα των ευγενών αερίων **He** και **Ne**, στο οποίο μίγμα, το στοιχείο που φωτοβολεί είναι το **Ne**. Την κατασκευή των δύο αυτών πρώτων τύπων laser, τα οποία ακόμη θεωρούνται από τα σπουδαιότερα, με στερεά ή αέρια υλικά, για την περιοχή του ορατού, επακολούθησε ταχύτατα, πλήθος άλλων με διάφορα υλικά, κρυσταλλικά, άμορφα, ημιαγωγούς, υγρά ή αέρια, ενώ η σχετική έρευνα συνεχίζεται με εντατικούς ρυθμούς είτε προς περαιτέρω βελτίωση των γνωστών τύπων, είτε για την πραγματοποίηση νέων.

### 3.3 Η παραγωγή του laser

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη laser, άλλα όλα έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: όλα περιέχουν υλικό που έχει την ικανότητα να ενισχύσει την ακτινοβολία. Το υλικό αυτό ονομάζεται **μέσο ενίσχυσης (ενεργό μέσο)**, διότι η ακτινοβολία αποκτά ενέργεια όταν διέρχεται μέσα από το υλικό. Η φυσική αρχή που είναι υπεύθυνη για το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Εξαναγκασμένη Εκπομπή και ανακαλύφθηκε από τον Albert Einstein το 1916.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναλύσουμε τις ιδιότητες του laser, θα κάνουμε μια εισαγωγή στη θεωρία των κοιλοτήτων laser και θα παρουσιάσουμε μια απλοποιημένη θεώρηση της λειτουργίας του laser.

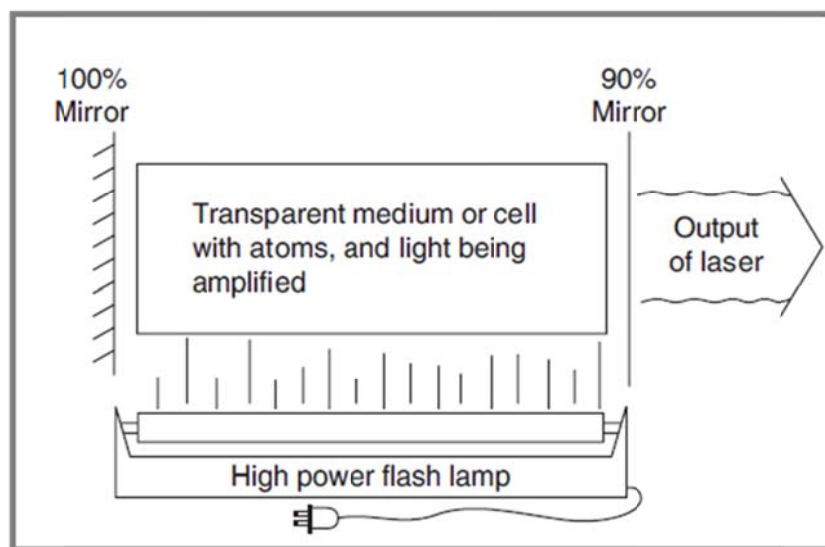
Στην Εικόνα 3-2 απεικονίζονται τα 4 βασικά στοιχεία του laser. Αρχικά, μια ομάδα ατόμων ενισχύει ένα φωτεινό σήμα όταν διέρχεται μέσα από αυτό, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3-2 (a).



**Εικόνα 3-3:** Βασικά στοιχεία του laser

Το μέσο ενίσχυσης είναι συνήθως εγκλωβισμένο σε μια κοιλότητα υψηλής ανακλαστικότητας που συγκρατεί το ενισχυμένο φως και το κατευθύνει εντός του μέσου για επαναλαμβανόμενες ενισχύσεις. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-2.(b). Μια παροχή ενέργειας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-2.(c) πρέπει να χρησιμοποιηθεί ώστε να αναπληρωθεί η ενέργεια του ενισχυτή που μετατρέπεται σε φωτεινή ενέργεια. Η ενέργεια αυτή μπορεί να προέλθει από μια λυχνία έκλαμψης (flash lamp) ή κάποια άλλη πηγή laser. Επίσης πρέπει να υπάρξει ένας τρόπος, μια συγκεκριμένη διαμόρφωση, ώστε να εξαχθεί σε μορφή ακτίνας τουλάχιστον ένα μέρος του φωτός που βρίσκεται μέσα στην κοιλότητα, ίσως όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3-2.(d).

Μια σχηματική αναπαράσταση που περιλαμβάνει όλα αυτά τα στοιχεία φαίνεται στην Εικόνα 3-4.



**Εικόνα 3-4:** Ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής laser, που απεικονίζει τα στοιχεία που είναι υπεύθυνα για την είσοδο της ενέργειας, την ενίσχυση και την έξοδο.

Είναι σαφές ότι ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα laser πρέπει να βρίσκεται σε ισορροπία όσον αφορά τα κέρδη και τις απώλειες. Αναμένεται ένα σύστημα laser να παρουσιάζει περισσότερες εστίες απώλειας παρά κέρδους ενέργειας. Τα συστήματα laser υπόκεινται στους νόμους της φυσικής και σε οποιοδήποτε στάδιο λειτουργίας, από την έγχυση της ενέργειας στο μέσο ενίσχυσης ως την εξαγωγή του φωτός από την κοιλότητα, έχουμε απώλειες ενέργειας και αύξηση της εντροπίας. Η επιτυχία των laser ήρθε όταν οι φυσικοί κατάφεραν να χειριστούν τα άτομα αποτελεσματικά ως «θερμοδυναμικές μηχανές».

Μια από τις προκλήσεις στην κατανόηση της συμπεριφοράς των ατόμων μέσα στην κοιλότητα προκύπτει από το σχεδιασμό της ίδιας της κοιλότητας. Η ανάδραση αυτή δείχνει ότι μια μικρή ροή εισόδου μπορεί να ενισχυθεί με άμεσο τρόπο από τα άτομα, αλλά όχι επ' άπειρον. Μια απλή ενίσχυση λαμβάνει χώρα έως ότου το φωτεινό πεδίο στην κοιλότητα είναι αρκετά ισχυρό ώστε να επηρεάζει τη συμπεριφορά των ατόμων. Στη συνέχεια η ισχύς του φωτός που δρα στα ενισχυμένα άτομα πρέπει να ληφθεί υπόψη στον προσδιορισμό της ισχύος του ίδιου του φωτός. Όλο αυτό φαίνεται σαν «φαύλος κύκλος» και κατά κάποια έννοια είναι, καθώς οι συμπεριφορές του φωτός και των ατόμων είναι τόσο άμεσα συνδεδεμένες που δεν μπορούν να προσδιοριστούν ανεξάρτητα η μία της άλλης. Μεγάλη ανάδραση σημαίνει επίσης ότι πολύ μικρές διαταραχές μπορούν γρήγορα να ενισχυθούν. Από την ανάλυση αυτή καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα laser είναι μη προβλέψιμες και ασταθείς συσκευές. Στην πραγματικότητα τα laser μπορούν να αποκτήσουν τρομερά χαοτική συμπεριφορά και για αυτό αποτελούν αντικείμενο βασικής έρευνας.

Για το σκοπό μας όμως, τα laser παρουσιάζουν ενδιαφέρον κατά τη λειτουργία μόνιμης κατάστασης, με καθορισμένη ισχύ και συχνότητα εξόδου, καθώς και συγκεκριμένη χωρική δομή. Η αλληλεπίδραση του φωτός με τα άτομα είναι σημαντική για τον καθορισμό αυτών των ιδιοτήτων.

### **3.4 Οι ιδιότητες των laser**

Το εκπεμπόμενο laser παρουσιάζει σημαντικές μοναδικές ιδιότητες, όπως η μεγάλη χωρική και χρονική συνοχή, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω.

Οι ιδιότητες της φωτεινής πηγής του laser είναι οι εξής:

- Μήκος κύματος

Το laser είναι διαθέσιμο σε όλα τα χρώματα από το κόκκινο ως το ιώδες, ακόμα και πέρα από το ορατό φάσμα. Σε ένα μεγάλο εύρος τα διαθέσιμα laser είναι συντονίσιμα. Αυτό σημαίνει ότι ορισμένα laser (π.χ. laser χρωστικής) , έχουν την ιδιότητα να εκπέμπουν φως σε κάποιο επιλεγμένο μήκος κύματος,

μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος μηκών κύματος. Το μεγαλύτερο μήκος κύματος μπορεί να επιλεγεί στο μακρινό υπέρυθρο, στην περιοχή των 100-500  $\mu\text{m}$ . Οι συσκευές που είναι ικανές να παράξουν συνεχές φως σε μεγαλύτερα μήκη κύματος ονομάζονται maser. Έχουν επίσης αναφερθεί συνεχείς εξαναγκασμένες εκπομπές και στην περιοχή του μακρινού υπεριώδους φάσματος.

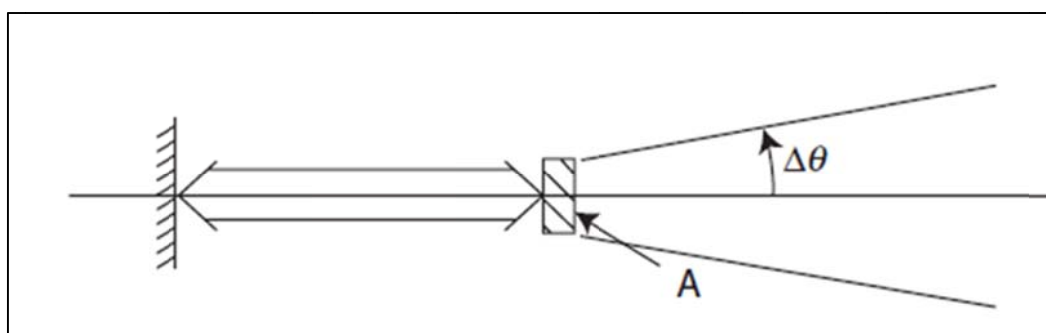
- Ενέργεια των φωτονίων

Η ενέργεια του φωτονίου μιας πηγής laser δεν είναι διαφορετική από την ενέργεια ενός φωτονίου μιας «κοινής» πηγής του ίδιου μήκους κύματος. Ένα πράσινο-κίτρινο φωτόνιο, περίπου στο μέσο του οπτικού φάσματος, έχει ενέργεια περίπου 2,5 eV. Από την υπέρυθη περιοχή ως την περιοχή των ακτίνων X, η ενέργεια των φωτονίων ποικίλει από 0,01 eV ως 100 eV. Σε θερμοκρασία δωματίου η θερμική μονάδα ενέργειας αντιστοιχεί σε 0,025 eV, δηλαδή δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη από την τυπική ενέργεια ενός φωτονίου στο ορατό φάσμα. Κατά συνέπεια η θερμική διέγερση παίζει πολύ μικρό ρόλο στη λειτουργία όλων σχεδόν των laser.

- Κατευθυντικότητα

Η έξοδος ενός laser αποτελείται από σχεδόν ιδανικά επίπεδο μέτωπο κύματος. Μόνο η διάθλαση θέτει ένα κατώτερο όριο στη γωνιακή διάχυση μιας ακτίνας laser. Το μήκος κύματος  $\lambda$  και το εμβαδόν  $A$  του ανοίγματος της εξόδου του laser προσδιορίζουν την τάξη μεγέθους της στερεάς γωνίας της ακτίνας ( $\Delta\Omega$ ) και τη μέγιστη γωνία απόκλισης ( $\Delta\theta$ ), μέσω της σχέσης:

$$\Delta\Omega \approx \frac{\lambda^2}{A} \approx (\Delta\theta)^2 \quad (3.1)$$



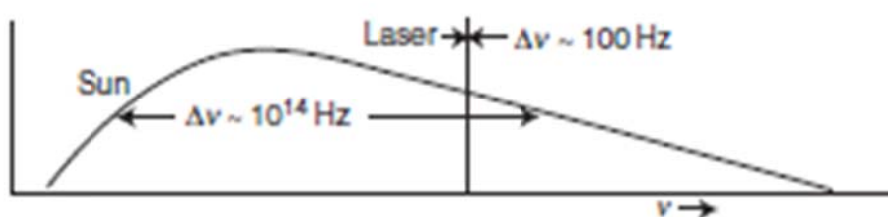
**Εικόνα 3-5:** Σχηματική απεικόνιση κοιλότητας laser που παρουσιάζει τη γωνιακή απόκλιση της ακτίνας στο κάτοπτρο εξόδου

Η σχέση αυτή δίνει μια πολύ μικρή γωνιακή διάχυση, όταν το μήκος κύματος είναι στο ορατό φάσμα, δηλαδή περίπου στα 500 nm και το  $A$  είναι η

μακροσκοπική διατομή ( $5\text{mm}^2$ ). Στο παράδειγμα αυτό υπολογίζουμε  $\Delta\Omega=10^{-8}$  sr ή  $\Delta\theta=1/10$  mrad.

- Μονοχρωματικότητα

Είναι γνωστό ότι το laser παράγει πολύ καθαρά χρώματα. Εάν τα laser μπορούσαν να παράξουν μόνο ένα μήκος κύματος, θα ήταν πλήρως μονοχρωματικά. Αυτό δεν είναι εφικτό, τόσο λόγω της αρχής λειτουργίας του laser, όσο και για πρακτικούς λόγους. Θα συμβολίσουμε με  $\Delta\lambda$  το εύρος των μηκών κύματος που περικλείονται σε μια ακτίνα laser με κύριο μήκος κύματος  $\lambda$ . Παρόμοια, το σχετικό εύρος συχνοτήτων συμβολίζεται με  $\Delta\nu$ . Στην περιοχή του ορατού φωτός, ισχύει:  $\nu \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ . Για τα laser, μια πολύ χαμηλή τιμή του  $\Delta\nu$  είναι το 1 Hz, ενώ ένα εύρος συχνοτήτων περίπου 100 Hz είναι φασματοσκοπικά πρακτικό σε μερικές περιπτώσεις. Για  $\Delta\nu \approx 100 \text{ Hz}$  η φασματική καθαρότητα της ακτίνας του laser είναι αρκετά εντυπωσιακή:  $\Delta\nu \approx 100 / (5 \cdot 10^{14}) = 2 \cdot 10^{-13}$ . Η τιμή αυτή υπερβαίνει τη φασματική καθαρότητα των μηχανικών και ηλεκτρικών συντονιστών κατά πολλές τάξεις μεγέθους.



**Εικόνα 3-6:** Εύρος φάσματος εκπομπής ηλιακού φωτός και ενός αντιπροσωπευτικού σχεδόν μονοχρωματικού laser



**Εικόνα 3-7:** Κόκκινο (635 nm), πράσινο (532 nm), και μπλε-ιώδες (445 nm) laser [5]

- Χρόνος συνοχής

Η ύπαρξη ενός πεπερασμένου εύρους συχνοτήτων  $\Delta\nu$  σημαίνει ότι οι διαφορετικές συχνότητες που υπάρχουν σε μια ακτίνα laser μπορεί να μην έχουν την ίδια φάση. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε δύο ταλαντώσεις που διαφέρουν κατά  $\Delta\nu$  να μην έχουν την ίδια φάση σε ένα πλήρη κύκλο είναι προφανώς  $1/\Delta\nu$ . Ύστερα από αυτό το χρονικό διάστημα οι διαφορετικές συνιστώσες της συχνότητας αρχίζουν να αλληλεπιδρούν καταστροφικά, και η ακτίνα χάνει τη «συνοχή» της. Άρα, ο χρόνος  $\Delta\tau=1/\Delta\nu$  ονομάζεται **χρόνος συνοχής της ακτίνας**. Αυτός είναι ένας γενικός ορισμός που δεν περιορίζεται στο laser, αλλά οι εξαιρετικά μικρές τιμές εύρους συχνοτήτων  $\Delta\nu$  που επικρατούν στις φωτεινές ακτίνες laser, κάνουν τους **χρόνους συνοχής για τις ακτίνες laser εξαιρετικά μεγάλους**.

- Μήκος συνοχής

Η ταχύτητα του φωτός είναι τόσο μεγάλη, που μια φωτεινή ακτίνα μπορεί να ταξιδέψει σε πολύ μεγάλη απόσταση ακόμα και μέσα σε πολύ μικρό χρόνο συνοχής. Για παράδειγμα, μέσα σε  $\Delta\tau=1\mu\text{s}$  το φως ταξιδεύει  $\Delta z= (3\cdot 10^8 \text{ m/s})\cdot(1\mu\text{s})=300\text{m}$ . Η απόσταση  $\Delta z=c\cdot\Delta\tau$  ονομάζεται μήκος συνοχής της ακτίνας. Μόνο τμήματα της ίδιας ακτίνας που χωρίζονται με λιγότερο από  $\Delta z$  είναι ικανά να διεισδύσουν επικοινωνητικά το ένα εντός του άλλου.

- Φασματική φωτεινότητα

Μια ακτίνα laser από μια πεπερασμένη πηγή μπορεί να χαρακτηριστεί από την απόκλιση της ακτίνας  $\Delta\Omega$ , το μέγεθος της πηγής (συνήθως εμβαδόν επιφάνειας  $A$ ), το εύρος συχνοτήτων  $\Delta\nu$  και τη φασματική πυκνότητα ισχύος  $P_\nu$  (watts ανά Hz του εύρους συχνοτήτων). Από αυτές τις παραμέτρους είναι χρήσιμο να προσδιοριστεί η φασματική φωτεινότητα  $\beta_\nu$  της πηγής, η οποία ορίζεται ως η *ροή ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας, μονάδα εύρους συχνοτήτων και στερακτινίου*, δηλαδή  $\beta_\nu = P_\nu / A \cdot \Delta\Omega \cdot \Delta\nu$ . Παρατηρείστε ότι  $P_\nu/A\cdot\Delta\nu$  είναι η φασματική ένταση, άρα το  $\beta_\nu$  μπορεί επίσης να εκφραστεί ως η φασματική ένταση ανά στερακτίνο.

Αρκετές διαφορετικές εκτιμήσεις μπορούν να γίνουν για την ακτινοβολία του laser, ανάλογα με το είδος του laser που εξετάζουμε. Θεωρούμε ένα laser He-Ne. Ένα τυπικό επίπεδο ισχύος είναι το 1mW με εύρος συχνοτήτων περίπου  $10^4$  Hz. Από την Εξίσωση 3.1 βλέπουμε ότι το γινόμενο του εμβαδού της διατομής της ακτίνας με τη στερεά γωνία δίνει  $\lambda^2$ , το οποίο για το laser He-Ne είναι  $\lambda^2 \approx (6328\cdot 10^{-10} \text{ m})^2 \approx 4\cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ . Άρα προκύπτει:

$$\beta_\nu \approx 2.5\cdot 10^5 \text{ W} / \text{m}^2 - \text{sr} - \text{Hz} \text{ (laser He-Ne)}$$

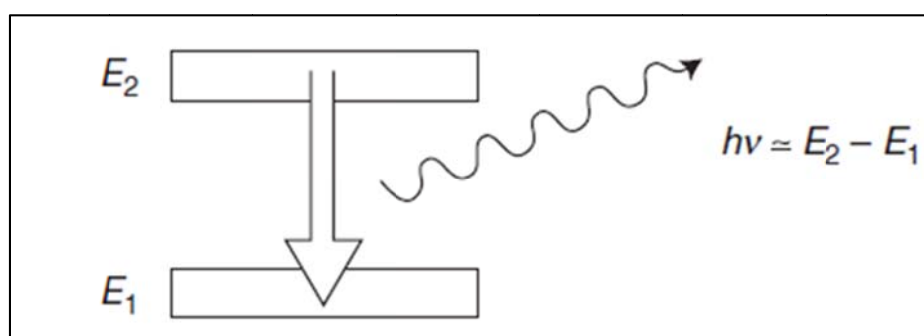


Οι τελευταίες εξελίξεις έχουν οδηγήσει σε ισχύ laser της τάξης των terawatts ( $10^{12}\text{W}$ ) ή ακόμα και petawatts ( $10^{15}\text{W}$ ), έτσι το  $\beta_v$  είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο.

Το laser αποτελείται από ένα μέσο ενίσχυσης ή ενεργό μέσο, ένα μηχανισμό πρόσδοσης ενέργειας και μία οπτική ανάδραση.

- Ενεργό μέσο

Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενεργά μέσα ενός laser ποικίλουν τόσο που είναι δύσκολη ακόμα και η αναφορά τους. Αέρια, υγρά και στερεά μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Το ενεργό μέσο είναι πάντως κάποιο υλικό με ιδιότητες τέτοιες, ώστε να ενισχύεται το φως, καθώς διέρχεται από αυτό. Το φως συγκεκριμένου μήκους κύματος που διέρχεται από το ενεργό μέσο ενισχύεται (αυξάνεται η ισχύς του). Για να μπορεί ένα ενεργό μέσο να ενισχύσει το φως, πρέπει να του παρέχεται με κάποιο τρόπο ενέργεια. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **άντληση**. Η ενέργεια παρέχεται συνήθως με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος ή ως φωτεινή ακτινοβολία διαφορετικού μήκους κύματος. Η ενέργεια για την άντληση παρέχεται από έναν εξωτερικό λαμπτήρα έκλαμψης ή από κάποιο άλλο laser. Η ενέργεια των φωτονίων εξαρτάται κυρίως από τη μετάβαση μεταξύ της αρχικής και της τελικής ενεργειακής στάθμης, παρά από την κατάσταση της ύλης. Κοινά παραδείγματα laser είναι τα laser He-Ne , ρουβινίου,  $\text{CO}_2$  και τα laser χρωστικής, αλλά μπορούν να βρεθούν και εξαιρέσεις όπως τα laser διηγευμένου διατομικού μορίου (excimer).

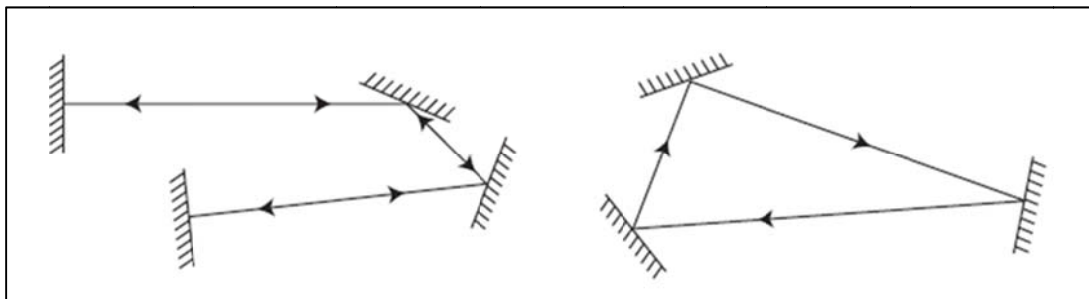


Εικόνα 3-8: Εκπομπή φωτονίου που συνοδεύεται από κβαντισμένη μετάβαση από τη στάθμη 2 στη στάθμη 1

- Είδη κοιλοτήτων laser

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι laser λαμβάνουν ανάδραση από μια οπτική κοιλοότητα- ένα ζεύγος καθρεπτών που τοποθετείται στα άκρα του ενεργού μέσου. Το φως αντανακλάται στους καθρέπτες, περνώντας κάθε φορά από το ενεργό μέσο, με αποτέλεσμα να ενισχύεται κάθε φορά. Συνήθως ο ένας από

τους δύο καθρέπτες, ο δικωνικός συζεύκτης εξόδου, είναι μερικώς διαφανής. Ένα μέρος του φωτός διαφεύγει μέσω του καθρέπτη. Ανάλογα με το σχεδιασμό του καθρέπτη (αν είναι επίπεδος ή κοίλος), το φως που εξέρχεται από το laser μπορεί να εξέλθει σε μορφή δέσμης. Αυτός ο τύπος συσκευής ονομάζεται ενισχυτής laser σε αναλογία με τον ηλεκτρονικό ενισχυτή, ο οποίος δέχεται ηλεκτρικό σήμα ως ανάδραση που τον αναγκάζει να παράξει σήμα. Όλες οι κοιλότητες του laser μοιράζονται δύο βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία αλληλοσυμπληρώνονται. Πρώτον, είναι κυρίως γραμμικές συσκευές με έναν σχετικά επιμήκη οπτικό άξονα και δεύτερον οι δύο παράλληλες στον άξονα πλευρές μπορούν να είναι ανοικτές. Δεν υπάρχει μονοσήμαντη επιλογή όσον αφορά στο σχήμα, π.χ. στην περίπτωση των δακτυλιοειδών laser, ο επιμήκης άξονας κάμπτεται και σχηματίζει δακτύλιο.



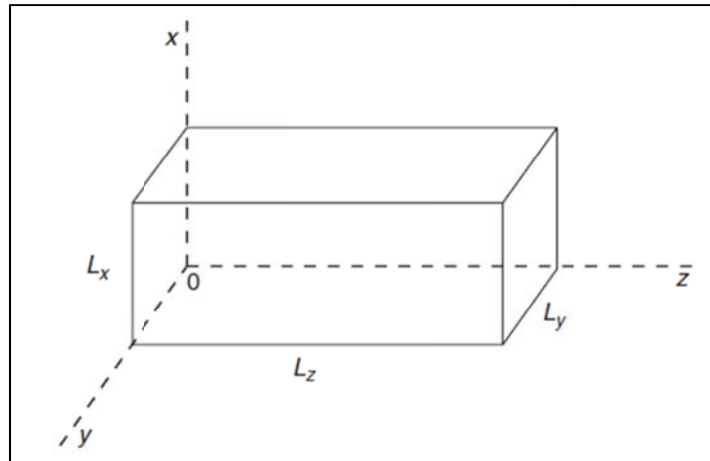
**Εικόνα 3-9:** Δύο διαμορφώσεις καθρεπτών που δημιουργούν κοιλότητες laser. (α) διαμόρφωση σταθερού κύματος, (β) διαμόρφωση μεταφερόμενου κύματος, αντίστοιχα.

Παρόλο που μπορεί να φαίνεται παράλογο, δεν είναι πάντα το καλύτερο να σχεδιαστεί μια κοιλότητα με τις μικρότερες απώλειες. Για παράδειγμα, στα laser πολύ μεγάλης ισχύος, γίνεται εσκεμμένα χρήση καθρεπτών που αναγκάζουν το laser να αποκλίνει έξω από την κοιλότητα, αντί να το συγκεντρώνουν.

### 3.5 Θεωρία των κοιλοτήτων laser

Ο σχεδιασμός των κοιλοτήτων είναι εξαιρετικά σημαντικός για την τεχνολογία των laser. Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιάσουμε τη θεωρία των κοιλοτήτων σε μια απλοποιημένη μορφή. Η κοιλότητα αναφέρεται και ως ενισχυτής. Περιγράφεται επίσης το μεγάλο πλεονέκτημα των ανοικτών, σε σύγκριση με τις κλειστές κοιλότητες, για την οπτική ακτινοβολία. Θα θεωρήσουμε την περίπτωση μιας ορθογωνικής κενής κοιλότητας που περιέχει ακτινοβολία αλλά όχι ύλη. Η υπόθεση αυτή είναι προφανώς μια προσέγγιση στην περίπτωση που η κοιλότητα αποτελεί μέρος ενός laser που βρίσκεται σε λειτουργία. Η προσέγγιση αυτή όμως χρησιμοποιείται συχνά στη θεωρία των laser, διότι είναι αρκετά ακριβής καθώς τα ενεργά άτομα ή τα μόρια είναι πολύ αραιά διεσπαρμένα μέσα στην κοιλότητα.



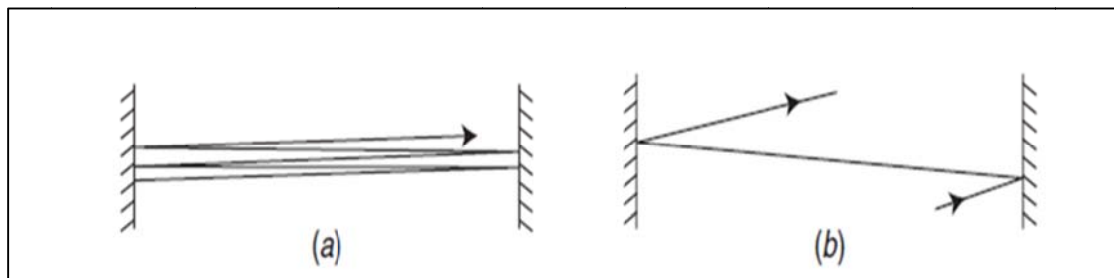


**Εικόνα 3-10:** Ορθογωνική κοιλότητα με μήκη πλευρών  $L_x, L_y, L_z$ .

Το ηλεκτρικό πεδίο εξασθενεί στις δύο άκρες της κοιλότητας. Αυτό θα συμβεί αν ταιριάξουμε έναν ακέραιο αριθμό μισού μήκους κύματος στην κοιλότητα, κατά μήκος κάθε άξονα. Αυτό σημαίνει ότι, για παράδειγμα, το  $\lambda$  κατά μήκος του  $z$  άξονα προσδιορίζεται από τη σχέση,  $L = n(\lambda/2)$  όπου  $n=1,2,\dots$  είναι θετικός ακέραιος και  $L$  είναι το μήκος της κοιλότητας.

Αν οι τρεις διαστάσεις της κοιλότητας είναι ισοδύναμες, ο αριθμός των διαθέσιμων καταστάσεων αυξάνεται εξαιρετικά γρήγορα ως συνάρτηση της συχνότητας. Για παράδειγμα, μια κυβική τρισδιάστατη ανακλαστική κοιλότητα πλευράς 1cm έχει περίπου 400 συχνότητες συντονισμού μέσα στην χρήσιμη περιοχή κέρδους των laser He-Ne. Τότε το φαινόμενο του laser μπορεί να επιτευχθεί σε όλο αυτό το εύρος, εξαφανίζοντας έτσι το μονοχρωματικό χαρακτήρα του laser, τον οποίο τονίσαμε στην προηγούμενη ενότητα.

Έτσι παρατηρήθηκε ότι η μονοδιάστατη κοιλότητα ήταν καταλληλότερη από την τρισδιάστατη κοιλότητα. Η μονοδιάστατη κοιλότητα μπορούσε να επιτευχθεί με έναν ανοιχτό συντονιστή (resonator), που αποτελείται από δύο παράλληλους καθρέφτες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-10.



**Εικόνα 3-11:** Διάγραμμα που απεικονίζει το πλεονέκτημα των μονοδιάστατων κοιλοτήτων. Η σταθερή λειτουργία σχετίζεται μόνο με τις ακτίνες που αντανακλώνται πολλές φορές.

Στην πραγματικότητα τα laser δεν σχεδιάζονται ποτέ με επίπεδους καθρέπτες. Οι επιφάνειες των καθρεπτών είναι συνήθως σφαιρικές.

### 3.6 Εκπομπή και απορρόφηση φωτός στην κβαντική θεωρία

Η μοντέρνα ερμηνεία της εκπομπής και της απορρόφησης προτάθηκε το 1905 από τον Einstein στη θεωρία του για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Ο Einstein υπέθεσε ότι η διαφορά ενέργειας ενός ηλεκτρονίου πριν και μετά την εκπομπή του φωτονίου, ισούται με την ενέργεια  $h\nu$  του φωτονίου που απορροφήθηκε στη διαδικασία.

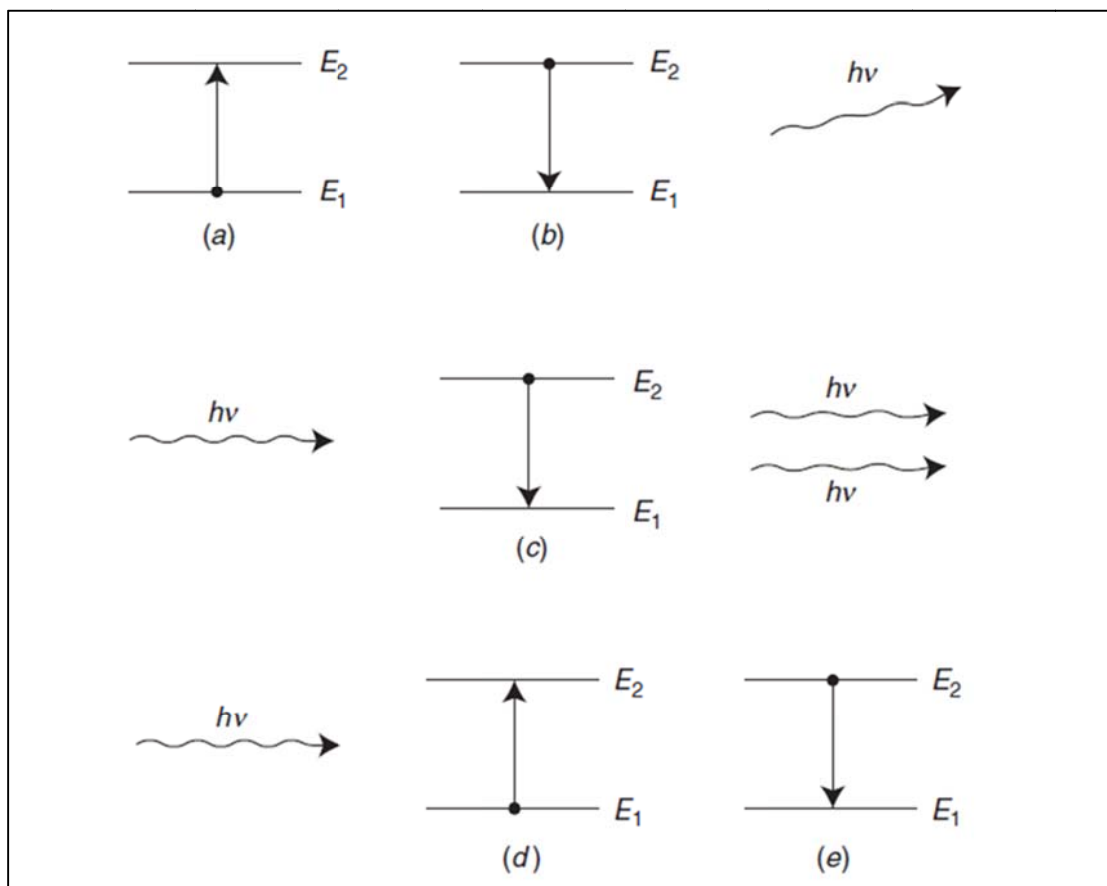
Το ποσό της ενέργειας που αφορά στη μετάβαση εξαρτάται από το κβαντισμένο σύστημα. Οι κβαντισμένες μεταβάσεις των ατόμων αφορούν κυρίως ενέργειες στο εύρος των 1-6eV, όταν ένα ηλεκτρόνιο εξωτερικής στοιβάδας κάνει τη μετάβαση. Αυτή είναι μια συνηθισμένη περίπτωση, και έτσι τα άτομα συνήθως απορροφούν ή εκπέμπουν φωτόνια στην περιοχή ή κοντά στην περιοχή του ορατού φάσματος. Οι μεταβάσεις των ατόμων των εσωτερικών στοιβάδων, απαιτούν συνήθως περισσότερη ενέργεια και συνδέονται με την εκπομπή ακτίνων X. Από την άλλη μεριά, οι κβαντισμένες μεταβάσεις ατόμων που η ενέργειά τους είναι κοντά στην ενέργεια ιονισμού, περιλαμβάνουν μόνο ένα μικρό ποσό ενέργειας, που αντιστοιχεί σε φωτόνια στην υπέρυθη περιοχή ή στην περιοχή των μικροκυμάτων.

Πολλοί κρύσταλλοι είναι διαφανείς στην οπτική περιοχή, πράγμα το οποίο είναι ένα δείγμα ότι δεν απορροφούν ή εκπέμπουν οπτικά φωτόνια, διότι δεν έχουν κβαντισμένα επίπεδα ενέργειας που να επιτρέπουν μεταβάσεις ηλεκτρονίων στο οπτικό φάσμα. Όμως, οι χρωματιστοί κρύσταλλοι, όπως το ρουβίνιο, έχουν ακαθαρσίες που απορροφούν ή εκπέμπουν οπτικά φωτόνια. Οι ακαθαρσίες αυτές είναι συχνά ιονισμένα άτομα, που έχουν τόσο διακριτά επίπεδα ενέργειας όσο και εύρος επιπέδων, που επιτρέπουν τις αποδιεγέρσεις στο οπτικό φάσμα (το ρουβίνιο είναι καλός απορροφητής των πράσινων φωτονίων και έτσι φαίνεται κόκκινο).

### 3.7 Η θεωρία του Einstein για την αλληλεπίδραση φωτός και ύλης

Τα άτομα ενός laser υφίστανται επαναλαμβανόμενες κβαντικές αλληλεπιδράσεις και έτσι δρουν ως μικροσκοπικοί μεταλλάκτες. Δηλαδή, κάθε άτομο δέχεται ενέργεια και μεταβαίνει σε μια τροχιά υψηλότερης στάθμης, ως αποτέλεσμα της πρόσδοσης ενέργειας, την οποία μετατρέπει σε μια άλλη μορφή, για παράδειγμα σε φωτεινή ενέργεια (φωτόνια), όταν μεταβαίνει σε μια τροχιά χαμηλότερης στάθμης. Ταυτόχρονα, κάθε άτομο δέχεται τα φωτόνια που έχουν εκπεμφθεί νωρίτερα και έχουν ανακλαστεί από τους καθρέπτες. Αυτά τα **προθύστερα φωτόνια**, που υπάρχουν ήδη κατά μήκος του άξονα της κοιλότητας, είναι **η πηγή της εξαναγκασμένης εκπομπής των επόμενων φωτονίων**.

Στην Εικόνα 3-12 φαίνονται κάποιοι τρόποι, με τους οποίους συμβαίνει η μετατροπή ενέργειας. Για λόγους απλότητας, επικεντρωνόμαστε σε μεταβάσεις μεταξύ δύο επιπέδων, 1 και 2, ενός ατόμου.



**Εικόνα 3-12:** Διαδικασίες ενεργειακής μετάβασης

- (a) Απορρόφηση μιας ποσότητας ενέργειας  $\Delta E = E_2 - E_1$ . Το άτομο μεταβαίνει από μια εσωτερική στοιβάδα σε μια εξωτερική.
- (b) Τυχαία εκπομπή ενός φωτονίου ενέργειας  $h\nu = E_2 - E_1$ . Το άτομο μεταβαίνει από το επίπεδο 2 στο επίπεδο 1. Η διαδικασία συμβαίνει αυθόρμητα, χωρίς καμία εξωτερική επίδραση.
- (c) Εξαναγκασμένη εκπομπή: Το άτομο αποδιεγείρεται από την ενεργειακή στάθμη 2 στη χαμηλότερη στάθμη 1 και το εκπεμφθέν φωτόνιο ενέργειας  $h\nu = E_2 - E_1$  είναι ακριβές αντίγραφο του υπάρχοντος φωτονίου. **Η διαδικασία προκαλείται ή εξαναγκάζεται από το προσπίπτον φωτόνιο.**
- (d) Απορρόφηση φωτονίου ενέργειας  $h\nu = E_2 - E_1$ . Το άτομο διεγείρεται από την ενεργειακή κατάσταση 1 στην υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση 2. Όπως στην περίπτωση (c), η διαδικασία προκαλείται από το προσπίπτον φωτόνιο.

(e) Μη ακτινοβολούσα αποδιέγερση: Το άτομο αποδιεγείρεται από την ενεργειακή στάθμη 2 στη χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη 1, αλλά δεν εκπέμπεται κανένα φωτόνιο και έτσι η ενεργειακή διαφορά  $E_2 - E_1$  εμφανίζεται με κάποια άλλη μορφή (π.χ. αυξημένη ενέργεια ταλάντωσης ή περιστροφής στην περίπτωση των μορίων ή αναδιάταξη των ηλεκτρονίων στην περίπτωση των ατόμων).

Όλες αυτές οι διεργασίες συμβαίνουν στο μέσο ενίσχυσης του laser. Τα laser συνήθως κατατάσσονται σύμφωνα με τη διαδικασία (a), η οποία είναι η πηγή ενέργειας που καθορίζει και την έξοδο της ακτίνας laser.

Η εικόνα που περιγράφηκε είναι αρκετά απλοποιημένη. Θεωρείστε ότι το φαινόμενο του laser συμβαίνει στη μετάβαση μεταξύ των ενεργειακών επιπέδων 1 και 2. Στην πιο ευνοϊκή περίπτωση, το χαμηλότερο επίπεδο (επίπεδο 1) είναι άδειο. Για να διατηρηθεί αυτή η κατάσταση, πρέπει να υπάρχει ένας μηχανισμός που να μεταφέρει τα αποδιεγειρόμενα ηλεκτρόνια από το επίπεδο 1 σε ένα άλλο χαμηλότερο επίπεδο, έστω επίπεδο 0. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει επιζήμια απορρόφηση των φωτονίων του laser λόγω μεταβάσεων από τη στάθμη 1 στη στάθμη 2. Στην πράξη ο αριθμός των ηλεκτρονίων στο επίπεδο 1 δεν μπορεί να είναι ακριβώς 0, αλλά για λόγους απλότητας θα θεωρήσουμε ότι ο ρυθμός αποδιέγερσης από το χαμηλό επίπεδο 1 είναι τόσο μεγάλος ώστε ο αριθμός των ατόμων που παραμένουν σε αυτό το επίπεδο είναι αμελητέος σε σύγκριση με τον αριθμό των ατόμων στη στάθμη 2. Αυτή είναι μια σωστή υπόθεση για πολλά είδη laser. Υπό αυτή την προσέγγιση, η λειτουργία του laser μπορεί να περιγραφεί με βάση δύο «πληθυσμούς»: τον αριθμό  $n$  των ατόμων στο ανώτερο επίπεδο 2 και τον αριθμό  $q$  των φωτονίων στην κοιλότητα του laser.

Ο αριθμός των φωτονίων στην κοιλότητα μεταβάλλεται για δύο κυρίως λόγους:

- Φωτόνια του laser συνεχώς προστίθενται λόγω της εξαναγκασμένης εκπομπής
- Φωτόνια του laser συνεχώς χάνονται λόγω της διαπερατότητας του καθρέπτη, τη διάχυση ή την απορρόφηση από τους καθρέπτες κλπ.

Έτσι μπορούμε να γράψουμε μια εξίσωση για το ρυθμό μεταβολής του αριθμού των φωτονίων, ενσωματώνοντας τα κέρδη και τις απώλειες, που αναφέραμε ως ακολούθως:

$$\frac{dq}{dt} = anq - bq \quad (3.2)$$

Δηλαδή, ο ρυθμός με τον οποίο ο αριθμός των φωτονίων μεταβάλλεται είναι το άθροισμα δύο διαφορετικών ρυθμών: του ρυθμού αύξησης (ενίσχυση ή κέρδος) λόγω της εξαναγκασμένης εκπομπής, και του ρυθμού μείωσης (απώλεια) λόγω της μερικής ανακλαστικότητας των καθρεπτών.

Όπως υποδεικνύεται από την Εξίσωση 3.2, η ενίσχυση των φωτονίων δεν είναι μόνο ανάλογη του αριθμού  $n$  των ατόμων στη στάθμη 2, αλλά και του αριθμού  $q$  των φωτονίων που βρίσκονται ήδη στην κοιλότητα. Η απόδοση της διαδικασίας εξαναγκασμένης εκπομπής εξαρτάται από το είδος των ατόμων, αλλά και από άλλους παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί περιγράφονται με το μέγεθος της ενίσχυσης ή το συντελεστή κέρδους  $a$ . Ο ρυθμός απώλειας φωτονίων είναι απλά ανάλογος του αριθμού των υπαρχόντων φωτονίων.

Μπορεί επίσης να γραφεί μια αντίστοιχη εξίσωση για το  $n$ . Τόσο η εξαναγκασμένη όσο και η αυθόρμητη εκπομπή προκαλούν μείωση στο  $n$  και η διέγερση τείνει να αυξήσει το  $n$  με ένα ρυθμό που ορίζεται ως  $p$ . Έτσι, ισχύει:

$$\frac{dn}{dt} = -anq - fn + p \quad (3.3)$$

Παρατηρούμε ότι ο πρώτος όρος εμφανίζεται και στις δύο εξισώσεις, αλλά με διαφορετικό πρόσημο. Αυτό αντικατοπτρίζει τον κεντρικό ρόλο της εξαναγκασμένης εκπομπής και δείχνει ότι η μείωση του  $n$  (διεγερμένα άτομα) λόγω της εξαναγκασμένης εκπομπής, αντιστοιχεί ακριβώς στην αύξηση των φωτονίων  $q$ .

Οι παραπάνω εξισώσεις περιγράφουν τη λειτουργία του laser. Δείχνουν πώς ο αριθμός των ατόμων και των φωτονίων της κοιλότητας σχετίζονται μεταξύ τους. Δεν αναφέρονται στο τι συμβαίνει σε ένα φωτόνιο όταν εγκαταλείψει την κοιλότητα, ή σε ένα ηλεκτρόνιο όταν μεταπηδήσει σε μια άλλη ενεργειακή στάθμη.

Πρέπει να αναφερθεί ότι οι δύο αυτές εξισώσεις δεν μπορούν να επιλυθούν η μια ανεξάρτητα από την άλλη. Είναι δηλαδή συζευγμένες εξισώσεις. Η σύνδεση οφείλεται φυσικά στην εξαναγκασμένη εκπομπή: Τα άτομα στο μέσο ενίσχυσης μπορούν να αυξήσουν τον αριθμό των φωτονίων μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής, αλλά λόγω της ίδιας διαδικασίας η παρουσία των φωτονίων θα μειώσει τον αριθμό των ατόμων στην ανώτερη στοιβάδα του laser.

Σημαντική είναι η περίπτωση της μόνιμης κατάστασης. Στη μόνιμη κατάσταση τόσο το  $dq/dt$  όσο και το  $dn/dt$  είναι ίσα με το μηδέν. Τότε καταλήγουμε στην εξίσωση

$$n = \frac{b}{a} \equiv n_i \quad (3.4)$$

που δίνει ένα κατώφλι απαιτούμενου αριθμού ατόμων στις ανώτερες ενεργειακές στάθμες. Δηλαδή, αν  $n < b/a$ , τότε  $dq/dt < 0$  και ο αριθμός των φωτονίων στην κοιλότητα μειώνεται, σταματώντας τη λειτουργία του laser.

Επίσης λόγω της μόνιμης κατάστασης ( $dn/dt = 0$ ) ισχύει και  $n = \frac{b}{a} \equiv n_i$  και

$$q = \frac{p}{b} - \frac{f}{a} \quad (3.5)$$

Η εξίσωση αυτή καθορίζει ένα όριο για το ρυθμό πρόσδοσης, καθώς ο αριθμός των φωτονίων δεν μπορεί να είναι αρνητικός. Κατά συνέπεια, η ελάχιστη τιμή ή το κατώφλι της  $p$  όσον αφορά στη μόνιμη κατάσταση είναι [6]:

$$p_i = \frac{fb}{a} = fn_i \quad (3.6)$$

### 3.8 Τρόποι λειτουργίας του laser

Τα laser μπορούν να χωρισθούν σε συνεχή ή διακοπτόμενα, ανάλογα με το αν η ισχύς εξόδου είναι σταθερή σε σχέση με το χρόνο ή αν η έξοδος παίρνει τη μορφή παλμικού φωτός σε κάποια χρονική κλίμακα. Φυσικά και ένα laser που η κανονική του λειτουργία είναι η συνεχής, μπορεί να «ανοίγει» και να «σβήνει» σκόπιμα, με κάποιο συγκεκριμένο ρυθμό, ώστε να παραχθεί παλμικό laser.

#### 3.8.1 Laser συνεχούς εκπομπής (Continuous wave lasers -CW)

Μερικές εφαρμογές laser πραγματοποιούνται με ακτίνα σταθερής ισχύος εξόδου ως προς το χρόνο. Τα laser αυτά ονομάζονται συνεχούς εκπομπής και λειτουργούν με μία ακτίνα σταθερής ισχύος. Η ισχύς των συστημάτων υψηλής ισχύος είναι ρυθμιζόμενη. Σε laser αερίου χαμηλής ισχύος όπως το laser He-Ne, το επίπεδο ισχύος είναι καθορισμένο από τον σχεδιασμό του. Η απόδοσή του συνήθως μειώνεται μετά από μακρόχρονη χρήση.

#### 3.8.2 Laser ενός παλμού (Single pulse lasers)

Συνήθως έχουν διάρκεια παλμού από μερικές εκατοντάδες  $\mu\text{sec}$  έως μερικά  $\text{msec}$ . Ο τρόπος λειτουργίας τους μερικές φορές παραπέμπει σ' ένα μακρύ παλμό ή ένα κανονικό παλμό. Το παλμικό laser χρησιμοποιείται κυρίως στην αποβολή υλικού, καθώς ένας πολύ μικρός όγκος υλικού στην επιφάνεια του τεμαχίου πρέπει να θερμανθεί σε πολύ μικρό χρόνο. Αντιθέτως, αν η ενέργεια παρεχόταν βαθμιαία με laser συνεχούς εκπομπής, η ενέργεια θα

απορροφούνται από όλο τον όγκο του τεμαχίου και δε θα επιτυχανόταν υψηλή θερμοκρασία στο συγκεκριμένο σημείο που μας ενδιαφέρει για την αποβολή υλικού.

### **3.8.3 Laser ενός παλμού με χρονοκαθυστέρηση (Single pulsed Q-Switched lasers)**

Σε ορισμένες εφαρμογές, ενδιαφέρει κυρίως η ισχύς αιχμής του παλμού και όχι η ενέργεια του παλμού. Για δεδομένη ενέργεια παλμού, πρέπει να δημιουργηθεί όσο το δυνατόν παλμός μικρότερης διάρκειας με τεχνικές χρονοκαθυστέρησης. Για την επίτευξη της χρονοκαθυστέρησης, εισάγουμε απώλειες στο συντονιστή, οι οποίες υπερβαίνουν το κέρδος του μέσου. Αυτό περιγράφεται ως μείωση του παράγοντα ποιότητας της κοιλότητας. Τότε, αφού η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στο μέσο έχει πλησιάσει το μέγιστο δυνατό επίπεδο, ο μηχανισμός απωλειών εξάγεται γρήγορα από την κοιλότητα, επιτρέποντας στο laser να παραλάβει την ενέργεια από το ενεργό μέσο. Κατόπιν, κάτω από ιδανικές συνθήκες, η εκπομπή εκδηλώνεται με απλούς παλμούς των  $10^{-8}$  second. Αυτοί οι παλμοί θα έχουν υψηλές αιχμές ενέργειας σε τιμές από 106 έως 109 W.

### **3.8.4 Laser σάρωσης (Scanning lasers)**

Ονομάζονται και επαναληπτικά παλμικά laser. Λειτουργούν είτε με σταθερό είτε με μεταβλητό ρυθμό παλμού, ο οποίος μπορεί να είναι από μερικούς παλμούς ανά sec έως και 20000 παλμούς/sec. Η διεύθυνση ενός CW laser μπορεί να σαρωθεί ταχύτατα με την χρήση οπτικών συστημάτων σάρωσης για να παραχθεί το ισοδύναμο μιας επαναλαμβανόμενης παλμικής εξόδου στο δεδομένο σημείο.

### **3.8.5 Laser κλειδωμένης εκπομπής (Mode locked lasers)**

Λειτουργούν σαν αποτέλεσμα αντανάκλασεων της οπτικής κοιλότητας που μπορούν να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά της ακτίνας εξόδου. Όταν συγχρονιστούν οι φάσεις των διαφορετικών συχνοτήτων, θα παραχθεί μία ακτίνα. Το αποτέλεσμα είναι μια έξοδος laser η οποία παρατηρείται ως κανονικοποιημένος παλμός. Τα lasers που λειτουργούν με την μέθοδο αυτή συνήθως παράγουν έναν «συρμό» κανονικοποιημένων παλμών. Καθένας από αυτούς έχει διάρκεια από  $10^{-15}$  έως  $10^{-12}$  sec. Ένα laser κλειδωμένης εκπομπής μπορεί να δώσει εξαιρετικά υψηλότερες αιχμές ισχύος από αυτές που θα έδινε αν το ίδιο laser λειτουργούσε με ένα παλμό με χρονοκαθυστέρηση. [7]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Κατεργασίες αποβολής υλικού με laser

### 4.1 Επιλογή κατεργασίας και πλεονεκτήματα της τεχνολογίας laser

Όταν θέλουμε να προσδιορίζουμε την κατάλληλη μέθοδο για την κατεργασία ενός κομματιού, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω κριτήρια:

**1. Η γεωμετρία.** Χρειάζεται να γνωρίζουμε από ποιο σύστημα κατεργασίας (εργαλειομηχανή- εργαλείο) μπορεί να προκύψει μια συγκεκριμένη μορφή (π.χ. οπή δηλαδή εσωτερικός κύλινδρος, γίνεται με τρυπάνι, στη φρέζα, με εσωτερική τόννευση, είτε με ακτίνα laser κ.λ.π.). Επίσης, οι διαστάσεις μπορούν να είναι περιοριστικός παράγοντας για την επιλογή μεθόδου κατεργασίας (π.χ. οπή με διάμετρο της τάξης μεγέθους εκατοστών του χιλιοστού δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν συμβατικά).

**2. Οι φυσικές ιδιότητες του υλικού.** Η σκληρότητα, η αντοχή, η θερμική αγωγιμότητα κ.λ.π. πιθανόν να περιορίζουν τις εναλλακτικές λύσεις κατεργασιών που προέκυψαν από το προηγούμενο κριτήριο, π.χ. είναι αδύνατη η διάτρηση σκληρού υλικού με τρυπάνι, φρέζα ή τόρνο.

**3. Η ποιότητα τελικού προϊόντος.** Η τεχνική προδιαγραφή ενός κομματιού περιλαμβάνει περιορισμούς σχετικά με τις διαστάσεις (ανοχές) και την ποιότητα επιφάνειας. Η επίτευξη των προδιαγραφών αυτών, καθώς και άλλων, ίσως αυτονόητων χαρακτηριστικών, όπως έλλειψη ρωγμών και παραμορφώσεων, πρέπει να είναι μέσα στις δυνατότητες της μεθόδου κατεργασίας που πρόκειται να επιλεγεί. (π.χ. μικρές ανοχές σε οπή δεν επιτυγχάνονται στο απλό δράπανο αλλά στο boring).

**4. Ο όγκος παραγωγής.** Ο αριθμός των κομματιών που πρόκειται να παραχθούν στη μονάδα του χρόνου (σε μια μέρα, είτε μια εβδομάδα) είναι καθοριστικός για την επιλογή κατάλληλης μεθόδου κατεργασίας.

Μέσα λοιπόν από μια τέτοια ανάλυση μπορεί να οδηγηθούμε στην επιλογή μεθόδου κατεργασίας με laser, επειδή συχνά όλες οι άλλες μέθοδοι αποκλείονται. Για την τελική επιλογή πρέπει να γνωρίζουμε καλά τη συμπεριφορά του κάθε υλικού στην κατεργασία με laser. Στην πράξη βέβαια είναι συχνά αναπόφευκτες ορισμένες δοκιμαστικές κατεργασίες, για να διαπιστωθεί εάν η κατεργασία είναι καν δυνατή και, εάν ναι, κάτω από ποιες συνθήκες.

Οι κατεργασίες κοπής με ακτίνες laser ανήκουν στις θερμικές διαδικασίες. Η αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου εξαρτάται από τις θερμικές ιδιότητες και σε ένα βαθμό από τις οπτικές, παρά από τις μηχανικές ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού. Τα υλικά που είναι κατάλληλα για επεξεργασία με



laser είναι όσα παρουσιάζουν αρκετά υψηλό βαθμό ευθραυστότητας, σκληρότητας και ευνοϊκές θερμικές ιδιότητες, όπως χαμηλή θερμική διάχυση και αγωγιμότητα. Καθώς η οποιαδήποτε μεταφορά θερμότητας μεταξύ του laser και του υλικού γίνεται μέσω ακτινοβολίας, δεν παράγονται δυνάμεις κοπής από το laser και έτσι δεν υπάρχει μηχανική καταστροφή του υλικού, φθορά του κοπτικού εργαλείου και ταλάντωση στη μηχανή. Επιπλέον ο ρυθμός αποβολής υλικού στις κατεργασίες με laser δεν υπόκειται σε περιορισμούς που έχουν να κάνουν με τη μέγιστη δύναμη στο εργαλείο ή το σχηματισμό ψευδοκόψης. Η κοπή με ακτίνες laser είναι μια ευέλικτη διαδικασία. Όταν συνδυάζεται με πολυδιάστατο σύστημα κίνησης του εργαζόμενου τεμαχίου ή ρομποτικό σύστημα, οι ακτίνες laser μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάτρηση, κοπή, αυλάκωση, συγκόλληση και διάφορες θερμικές διεργασίες σε μία μόνο μηχανή.

Η τεχνολογία κοπής με laser κατά συνέπεια παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Υψηλή ακρίβεια: είναι η μοναδική τεχνολογία που επιτρέπει κοπή ή χάραξη πολύπλοκων σχημάτων
- Εξαιρετική ποιότητα κοπής
- Μικρό πλάτος ίχνους κοπής (kerf)
- Μεγάλη ταχύτητα κοπής
- Πολύ μικρή ζώνη θερμικού φορτίου σε σύγκριση με άλλες τεχνικές θερμικής κοπής
- Πολύ μικρή εφαρμογή θερμότητας, και αυτή πολύ κοντά στο ίχνος κοπής, με αποτέλεσμα μικρότερη παραμόρφωση του κομμένου υλικού
- Κοπή πολλών διαφορετικών τύπων υλικών
- Κοπή και χάραξη με το ίδιο εργαλείο
- Δυνατότητα κοπής σύνθετων γεωμετρικών σχημάτων, μικρών οπών και φρεζαριστών κοπών
- Καμία επαφή ανάμεσα στο υλικό και το εργαλείο διαμόρφωσής του, επομένως εφαρμογή μηδενικών δυνάμεων στο αντικείμενο που δουλεύουμε
- Εύκολος και άμεσος έλεγχος της ισχύος του laser σε πλατύ φάσμα (1-100%) που κάνει δυνατή την μείωση της ισχύος όταν κόβουμε απότομες και πολύ μικρές γωνίες

- Το επίστρωμα οξειδίων στην επιφάνεια κοπής, όταν κόβουμε με ακτίνα laser, είναι πολύ λεπτό και εύκολα αφαιρούμενο
- Κοπή με laser με άζωτο υψηλής πίεσης κάνει δυνατή την κοπή ελεύθερη οξειδώσεων

Τα laser χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα στη διάνοιξη οπών μικρών διαμέτρων (0,018 mm), όπου επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια στις αποστάσεις μεταξύ των αξόνων τους, αλλά κυρίως μεγάλη επαναληψιμότητα και μικροί χρόνοι κατεργασίας.

Η χάραξη με laser χρησιμοποιείται και αυτή σε μεγάλη κλίμακα στη βιομηχανία για τη γραφή πάνω στα ίδια προϊόντα ή και στις συσκευασίες τους τιμών, γραμμοκωδικών κ.λ.π. Η χάραξη με laser είναι διαδεδομένη σήμερα σχεδόν σε όλους τους κλάδους της βιομηχανίας και είναι δυνατή σε όλα τα υλικά. [8]

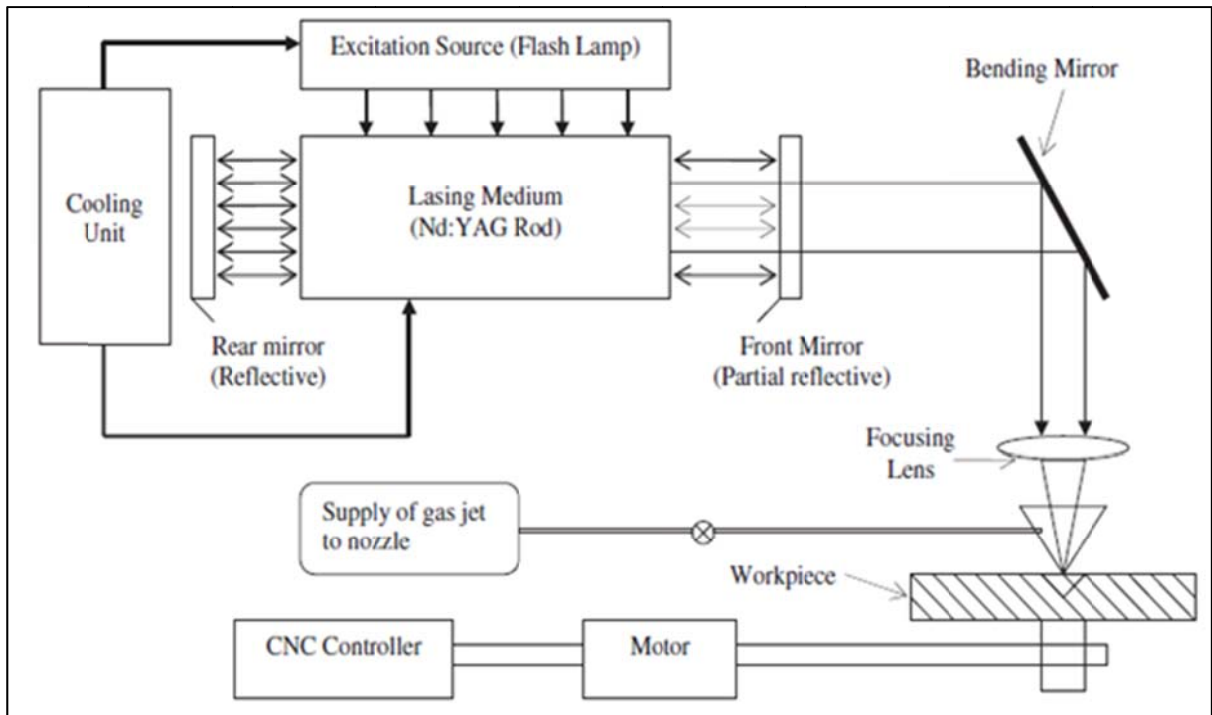
## 4.2 Η αρχή των κατεργασιών με ακτίνες laser

Ο μηχανισμός της αποβολής υλικού κατά τις κατεργασίες με ακτίνες laser περιλαμβάνει διαφορετικά στάδια, όπως:

- η τήξη,
- η εξάτμιση και
- η χημική αποδόμηση (σπάσιμο των χημικών δεσμών που προκαλεί αποδόμηση του υλικού).

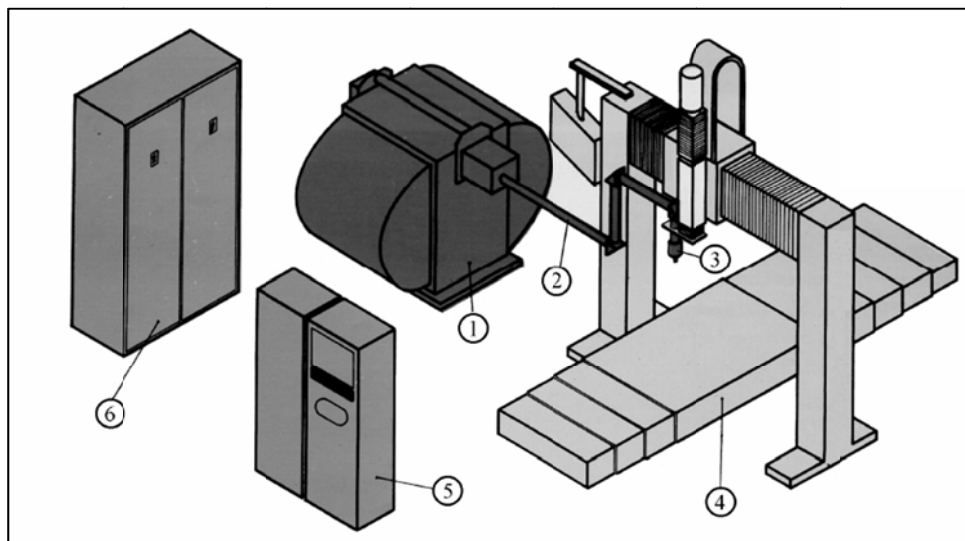
Όταν μια δέσμη υψηλής ενεργειακής πυκνότητας συγκεντρώνεται σε μια επιφάνεια εργασίας, απορροφάται η θερμική ενέργεια από τον όγκο του δοκιμίου εργασίας, το οποίο θερμαίνεται και στη συνέχεια τήκεται, εξατμίζεται ή αλλάζει η χημική του κατάσταση. Ο όγκος αυτός μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα με μια δέσμη βοηθητικού αερίου υψηλής πίεσης (η οποία επιταχύνει το υλικό και το απομακρύνει από τη ζώνη επεξεργασίας).

Μια διάταξη κατεργασιών με ακτίνες laser φαίνεται στην Εικόνα 4-1.



Εικόνα 4-1: Σύστημα κοπής με ακτίνες laser

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα σύστημα κοπής με ακτίνες laser αποτελείται από τρεις βασικές συνιστώσες, δηλαδή το ενεργό μέσο (μέσο ενίσχυσης), πηγή διέγερσης που προκαλεί τη μετάβαση του ενεργού μέσου σε κατάσταση ενίσχυσης και το σύστημα οπτικής διανομής και ανάδρασης. Οι πρόσθετες διατάξεις για την ψύξη των κατόπτρων, την οδήγηση των ακτίνων και το χειρισμό του στόχου (τεμάχιο κατεργασίας) είναι επίσης σημαντικές και απαραίτητες. Το ενεργό μέσο μπορεί να είναι στερεό (π.χ. νεοδύμιο με προσμίξεις υτρίου-αλουμινίου γρανάτη, Nd:YAG), υγρό (χρωστικής) ή αέριο (π.χ. CO<sub>2</sub>, He, Ne).



Εικόνα 4-2: (1) laser, (2) οδήγηση δέσμης, (3) κεφαλή κοπής, (4) τραπέζι κοπής με συντεταγμένες, (5) μονάδα ελέγχου, (6) σύστημα παροχής ενέργειας [9]

Η αλληλεπίδραση του laser και του υλικού αποτελείται από μια σειρά φυσικών διεργασιών, κάθε μια από τις οποίες χαρακτηρίζεται από μια χρονική σταθερά. Η ενέργεια του laser μεταφέρεται πρώτα στα ηλεκτρόνια, κυρίως στην περίπτωση των μετάλλων. Τα ηλεκτρόνια μεταφέρουν στη συνέχεια την ενέργεια στο πλέγμα και στη συνέχεια η ενέργεια μεταφέρεται περαιτέρω μέσω των ατομικών συγκρούσεων.

Το πρώτο βήμα, η απορρόφηση ενός φωτονίου από ένα ηλεκτρόνιο, απαιτεί περίπου  $10^{-15}$  s (1 femtosecond). Ο χρόνος χαλάρωσης ενός ηλεκτρονίου υψηλής ενέργειας, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να μεταφερθεί η ενέργεια στο πλέγμα είναι περίπου  $10^{-12}$  s (1 picosecond). Ο απαιτούμενος χρόνος για τη διάχυση της θερμότητας μέσω αγωγής σε μια απόσταση ίση με το οπτικό βάθος διείσδυσης είναι επίσης της τάξης του 1 picosecond.

Μπορούμε να αναγνωρίσουμε τρεις διαφορετικές διαδικασίες βάσει αυτών των χαρακτηριστικών χρόνων.

- Αποβολή υλικού τάξης femtosecond

Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει μεταφορά ενέργειας στο πλέγμα κατά τη διάρκεια του παλμού, όλη η ενέργεια αποθηκεύεται σε ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα. Αν η ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την ειδική θερμότητα ατμοποίησης, θα προκληθεί βίαιη ατμοποίηση μετά τον παλμό. Το βάθος αποβολής ανά παλμό δίνεται από τους Chichkov et al. ως:

$$z_a \approx a^{-1} \ln \left( \frac{F_a}{F_{th}} \right) \quad (4.1)$$

όπου  $F_a$  είναι η απορροφούμενη και  $F_{th}$  είναι το κατώφλι πυκνότητας ενέργειας.

Εδώ το κατώφλι πυκνότητας ενέργειας είναι η ενέργεια που απαιτείται για να ατμοποιηθεί ο ακτινοβολούμενος όγκος του υλικού ( $F_{th} \approx \rho L a^{-1}$ ), όπου το  $L$  αντιπροσωπεύει την απαιτούμενη θερμότητα για την ατμοποίηση. Με  $a^{-1}=10$  nm ένα κατώφλι πυκνότητας ενέργειας για αποβολή μετάλλων με υπερβραχείς παλμούς είναι  $0.1 \text{ J/cm}^2$ . Από την εξίσωση 4.1 είναι σαφές ότι στο κατώφλι πυκνότητας ενέργειας δεν υπάρχει αποβολή υλικού. Η πυκνότητα ενέργειας πρέπει να είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από το κατώφλι, για να είναι ικανή να απομακρύνει το ακτινοβολούμενο στρώμα πάχους  $a^{-1}$ . Η διαδικασία αποβολής πρέπει να θεωρηθεί ως μια απευθείας διαδικασία μετάβασης από στερεό σε ατμό σε ένα λεπτό στρώμα. Η ενέργεια μεταφέρεται από τα ηλεκτρόνια στο πλέγμα (μετά τον παλμό laser) σε ένα picosecond. Η μεταφορά αυτή μετατρέπει το στρώμα σε ένα πυκνό ατμό ή πλάσμα, που διαστέλλεται με μεγάλη ταχύτητα. Δεν υπάρχει χρόνος για τη μεταφορά θερμότητας στο πλέγμα κατά τη διάρκεια αυτών των διεργασιών. Το αποτέλεσμα είναι μια

πολύ ακριβής και καθαρή κοπή με laser. Το αποτέλεσμα αυτό έχει προκύψει πειραματικά, αλλά δεν έχει ακόμα εδραιωθεί στη βιομηχανία.

- Αποβολή υλικού τάξης picosecond

Με παλμούς διάρκειας picosecond, η διάρκεια του παλμού είναι της ίδιας τάξης με το χρόνο που απαιτείται για τη μεταφορά της ενέργειας από τα ηλεκτρόνια στο πλέγμα. Η θερμοκρασία του πλέγματος στο τέλος της διεργασίας είναι σχεδόν ίση με τη θερμοκρασία στο τέλος της αποβολής υλικού με παλμούς διάρκειας femtosecond. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει επίσης σημαντική ατμοποίηση και το βάθος αποβολής ανά παλμό μπορεί να εκφραστεί πάλι από την Εξίσωση 4.1. Παρόλο που η μετάδοση θερμότητας μέσα στο πλέγμα μπορεί να αμεληθεί, υπάρχει σημαντική ροή θερμότητας από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κατά τη διάρκεια του παλμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ζώνης τήγματος μέσα στο υλικό. Στην επιφάνεια υπάρχει απευθείας μετάβαση από στερεό σε ατμό ή πλάσμα, αλλά βαθύτερα στο υλικό επικρατεί η υγρή φάση. ***Η κατάσταση αυτή μειώνει την ακρίβεια της κοπής σε σχέση με την κοπή μετάλλων με παλμούς τάξης femtosecond.***

Η υπολογιστική προσομοίωση με βάση τη μοριακή δυναμική έχει χρησιμοποιηθεί για μια ακριβή μελέτη της διαδικασίας ατμοποίησης. Όταν η πυκνότητα ισχύος είναι  $10^9 - 10^{10} \text{ W/cm}^2$  το μέταλλο ατμοποιείται μοριακά. Τα μόρια αποτελούνται από συστάδες ατόμων. Η μελέτη είναι χρήσιμη μόνο για τη μελέτη κοπής μετάλλων με βραχείς παλμούς διάρκειας picosecond ή διάρκειας femtosecond, καθώς δε λαμβάνεται υπόψη η θερμική αγωγιμότητα. Η απορρόφηση της ενέργειας του laser από το πλέγμα παράγει κρουστικά κύματα, που οδηγούν στη δημιουργία μικρών κενών, που στη συνέχεια συμβάλλουν στη δημιουργία μεγαλύτερων ομάδων. Στη συνέχεια η επιφανειακή περιοχή «εκρήγνυται» και εκτινάσσονται τμήματα του υλικού. Στη στερεά φάση προκύπτουν επίπεδα ολίσθησης λόγω των εφελκυστικών δυνάμεων στο εκτινασσόμενο υλικό. Η ταχύτητα του εκτινασσόμενου υλικού είναι 6 km/s.

- Αποβολή υλικού τάξης nanosecond

Στις θερμικές κατεργασίες αλληλεπίδρασης laser και υλικού, οι παλμοί διάρκειας nanosecond θεωρούνται παλμοί μεγάλης διάρκειας. Η απορροφούμενη ενέργεια του laser θερμαίνει πρώτα το εργαζόμενο τεμάχιο μέχρι το σημείο τήξης και στη συνέχεια μέχρι τη θερμοκρασία ατμοποίησης. Κατά την αλληλεπίδραση η κύρια απώλεια θερμότητας προκύπτει λόγω της αγωγής θερμότητας μέσα στο στερεό. Το κατώφλι πυκνότητας ενέργειας μπορεί να εκτιμηθεί με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζεται για τους βραχείς

παλμούς. Το πάχος του στρώματος  $a^{-1}$ , το βάθος απορρόφησης στην εξίσωση 4.1, πρέπει τώρα να αντικατασταθεί από το βάθος θερμικής διάχυσης  $\sqrt{at}$ , που είναι περίπου 0,5  $\mu\text{m}$  για παλμούς 20 ns σε μέταλλα. Η συνθήκη αυτή καταλήγει σε ένα τυπικό κατώφλι πυκνότητας ενέργειας 4  $\text{J}/\text{cm}^2$  για ισχυρή ατμοποίηση. [10]

### 4.3 Οι κυριότερες κατεργασίες αποβολής υλικού με ακτίνες laser

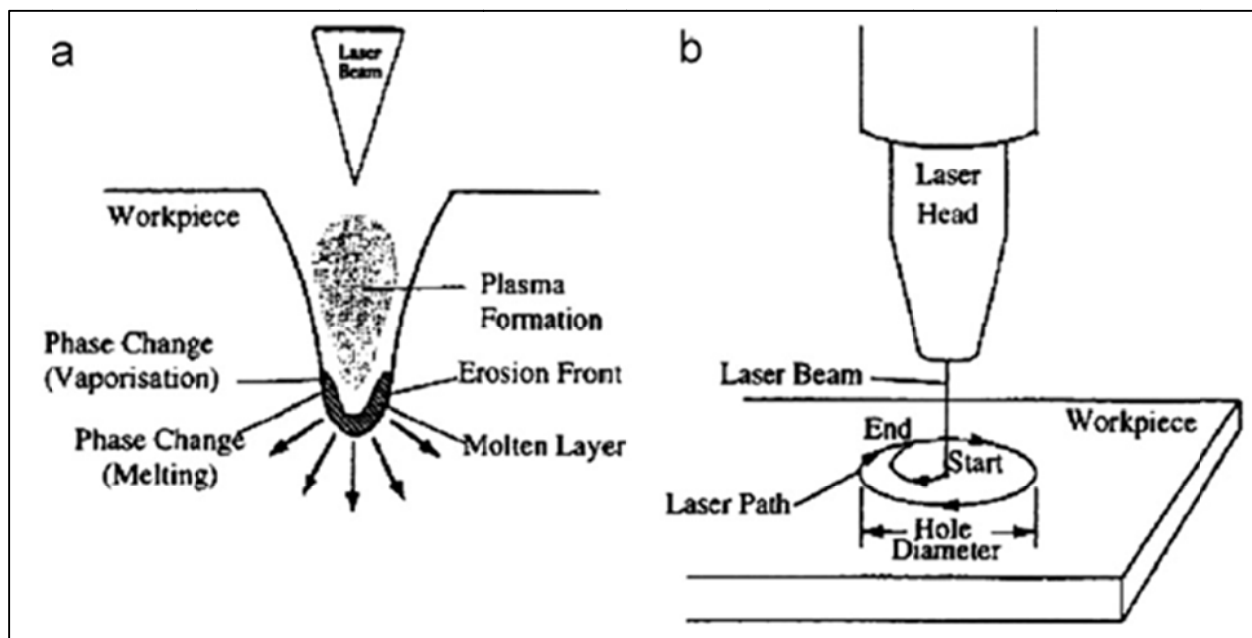
Οι κυριότερες κατεργασίες αποβολής υλικού με ακτίνες laser είναι η διάτρηση (μονοδιάστατη), η κοπή (διδιάστατη), η αυλάκωση, η τόννευση και το φρεζάρισμα (τρισδιάστατα) και η μικροκατεργασία τεμαχίων διαφόρων υλικών.

#### 4.3.1 Διάτρηση

Η διάτρηση με ακτίνες laser έχει γίνει οικονομικά αποδεκτή για τη διάνοιξη πολύ μεγάλου πλήθους οπών πολύ κοντά η μία στην άλλη.

Υπάρχουν δύο είδη διάτρησης με ακτίνες laser: διάτρηση τύπου δραπεάνου και κρουστική διάτρηση.

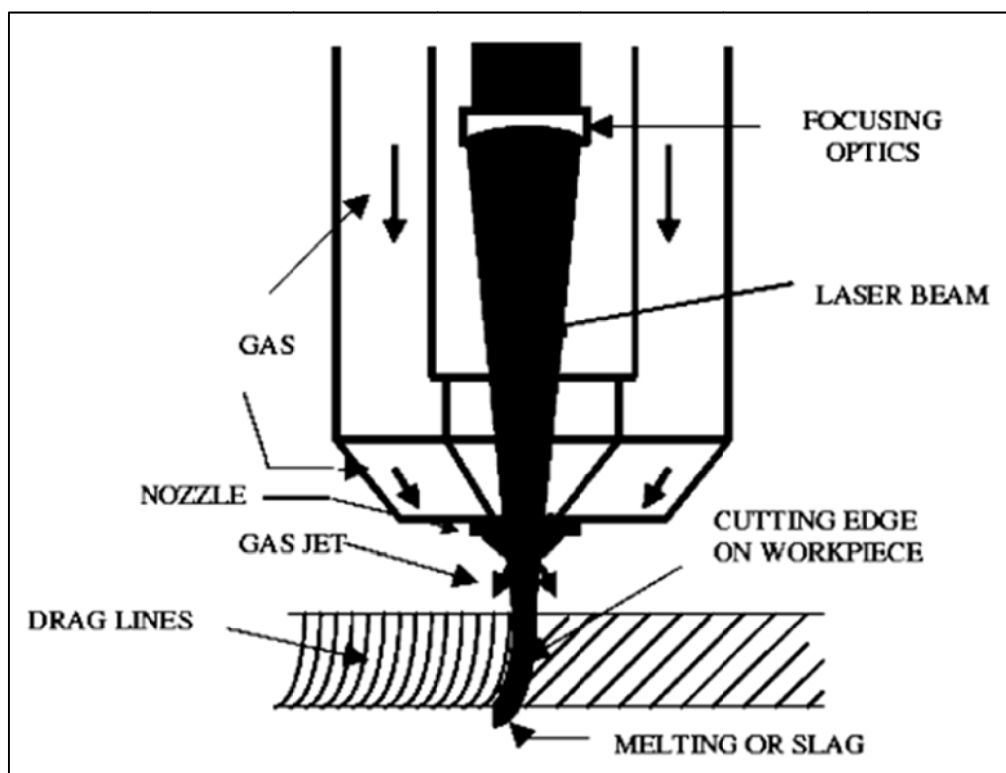
Η διάτρηση τύπου δραπεάνου περιλαμβάνει την κοπή στην περιφέρεια της οπής, που πρόκειται να παραχθεί ενώ η κρουστική διάτρηση γίνεται απευθείας στο σημείο του τεμαχίου, χωρίς σχετική κίνηση του laser ή του τεμαχίου.



Εικόνα 4-3: (α) κρουστική διάτρηση, (β) διάτρηση τύπου δραπεάνου

### 4.3.2 Κοπή και Αυλάκωση

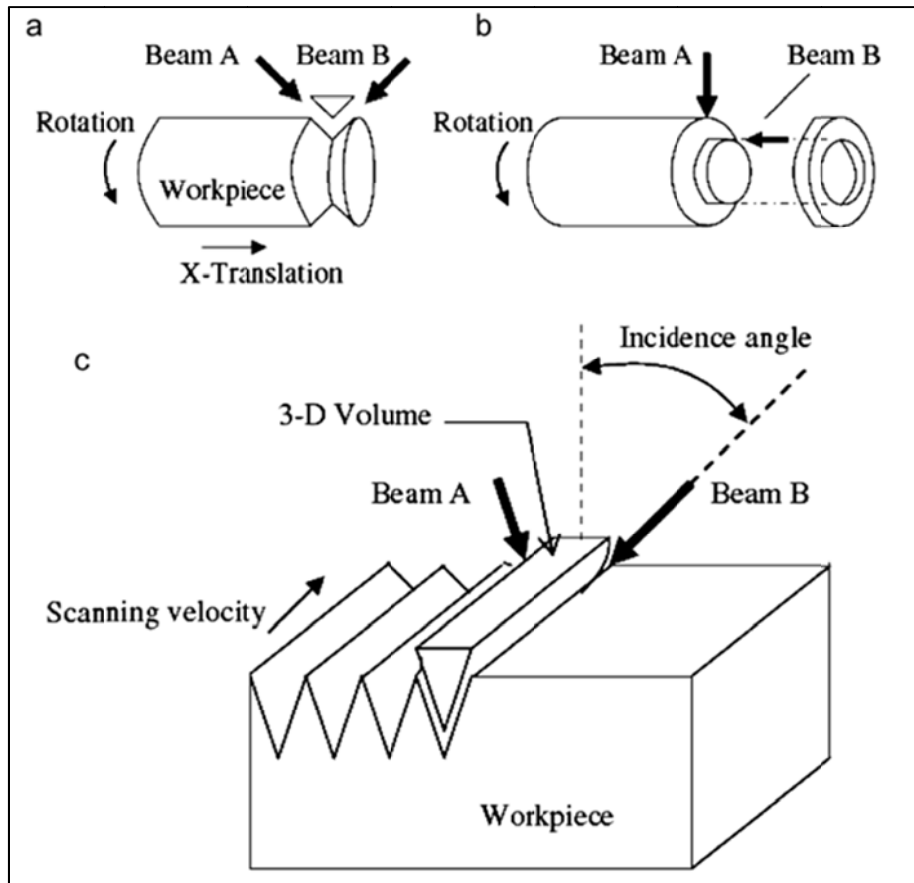
Οι διαδικασίες κοπής και αυλακώματος με laser έχουν διάφορες εφαρμογές, όπως η σήμανση μετάλλων, κεραμικών και πλαστικών. Η κοπή με ακτίνες laser είναι καλύτερη από οποιαδήποτε συμβατική ή μη συμβατική μέθοδο κοπής, λόγω της ευελιξίας της μεθόδου, της απουσίας φθοράς στο εργαλείο και λόγω της μεγάλης χρησιμοποίησης του υλικού, της υψηλής ακρίβειας και της ποιότητας των άκρων.



Εικόνα 4-4: Κοπή με laser

### 4.3.3 Τόρνευση και Φρεζάρισμα

Η τόρνευση και το φρεζάρισμα με laser είναι τρισδιάστατες λειτουργίες και απαιτούν ταυτόχρονα δύο ακτίνες laser, για να επιτευχθεί το επιθυμητό προφίλ στο εργαζόμενο τεμάχιο.



**Εικόνα 4-5:** Τρισδιάστατη κατεργασία (α) τόνρευση με laser (ελικοειδής αποβολή υλικού), (β) τόνρευση με laser (δακτυλιοειδής αποβολή υλικού), (γ) φρεζάρισμα με laser

Οι ακτίνες μπορούν να εστιάσουν στις κατάλληλες γωνίες με τη βοήθεια οπτικών ινών.

Το φρεζάρισμα με laser, επιτρέπει την παραγωγή σύνθετων σχημάτων χωρίς ακριβά καλούπια. Το φρεζάρισμα με laser είναι πιο κατάλληλο για την κατεργασία τεμαχίων από τη μία μόνο πλευρά. Η πλήρης κατεργασία ενός τεμαχίου είναι εφικτή, αλλά υπάρχει *δυσκολία στην ακριβή επανατοποθέτηση του τεμαχίου*.

Έχουν προταθεί από τους ερευνητές διάφοροι μηχανισμοί αποβολής υλικού για το φρεζάρισμα. Οι Tsai et al. έχουν προτείνει το φρεζάρισμα με laser των κεραμικών υλικών να γίνεται με την τεχνική της θραύσης (fracture technique), κατά την οποία μια εστιασμένη δέσμη laser χρησιμοποιείται για τη χάραξη των αυλακιών στο τεμάχιο γύρω από τη ζώνη κατεργασίας και μια μη συγκεντρωμένη δέσμη για τη θέρμανση της ζώνης κατεργασίας. Η θερμότητα προκαλεί τάσεις εφελκυσμού και οι συγκέντρωση των τάσεων αυξάνεται στο άκρο του αυλακιού με αποτέλεσμα τη θραύση στην κατεύθυνση των αυλακιών.

Οι Pham et al. μελέτησαν την εφαρμογή του φρεζαρίσματος με laser στην ταχεία κατεργασία τμημάτων μικρών διαστάσεων από υλικά χαμηλής



κατεργασιμότητας και πρότειναν την αποβολή υλικού κατά στρώματα, μέσω χημικής αποδόμησης.

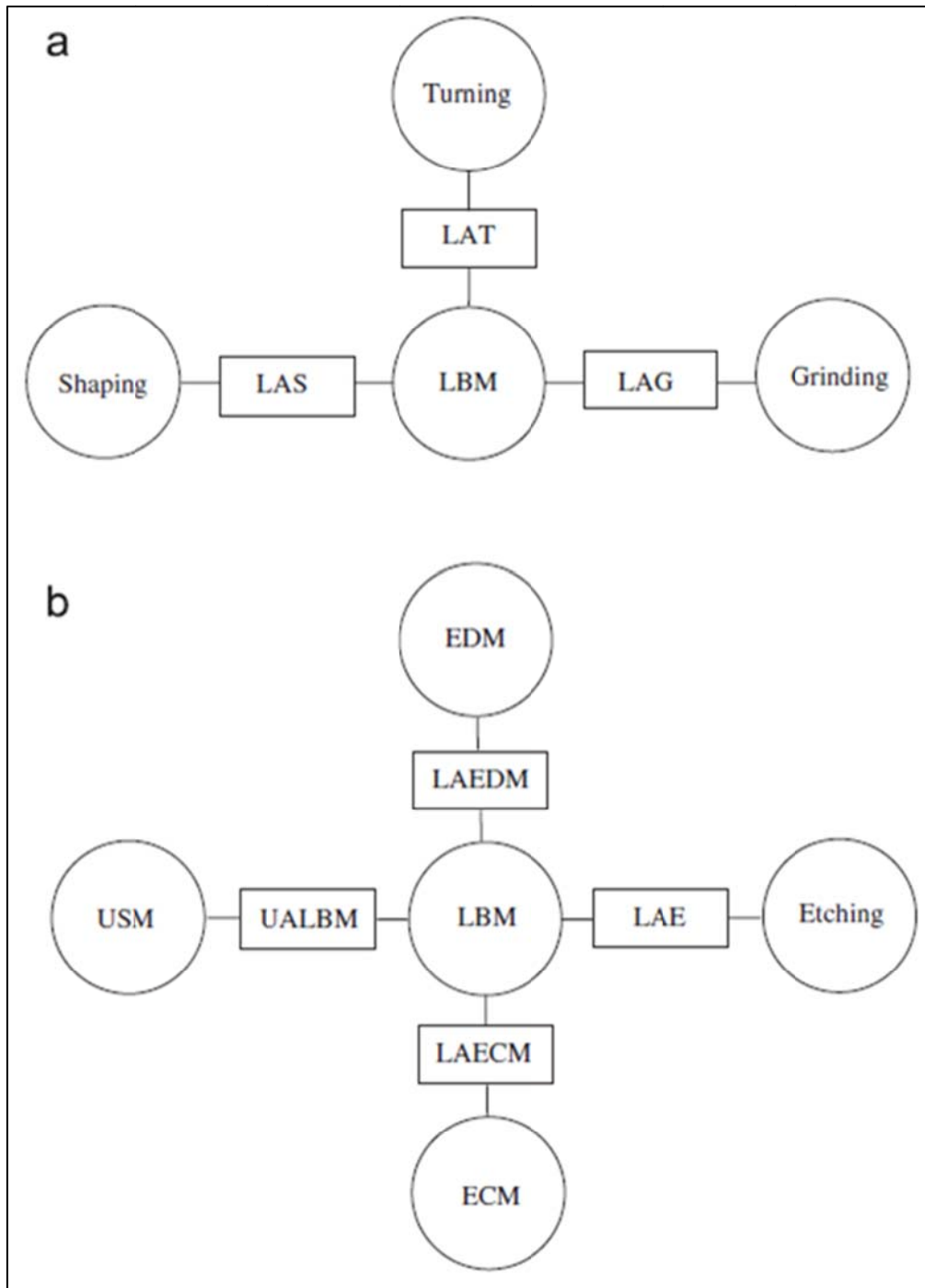
Οι Qi et al. μελέτησαν το φρεζάρισμα κεραμικών αλουμίνας και βρήκαν ότι η ποιότητα φρεζαρίσματος είναι ανώτερη στο φρεζάρισμα σε νερό, αλλά έχει χαμηλότερη απόδοση σε σχέση με το φρεζάρισμα σε αέρα.

#### **4.3.4 Μικροκατεργασία**

Η μικροκατεργασία αναφέρεται στην κατεργασία τεμαχίων με διαστάσεις μικρότερες από 1mm. Σε μικροκατεργασίες χρησιμοποιούνται laser με βραχείς παλμούς (η διάρκεια των παλμών ποικίλλει από microsecond ως femtosecond) και πολύ υψηλές συχνότητες (της τάξης των kHz). Τα παλμικά laser Nd:YAG και τα laser διηγεμένου διατομικού μορίου (excimer laser) χρησιμοποιούνται συνήθως για μικροκατεργασίες με laser στην ιατρική και την ηλεκτρονική βιομηχανία.

#### **4.4 Υβριδικές κατεργασίες με χρήση ακτίνων laser**

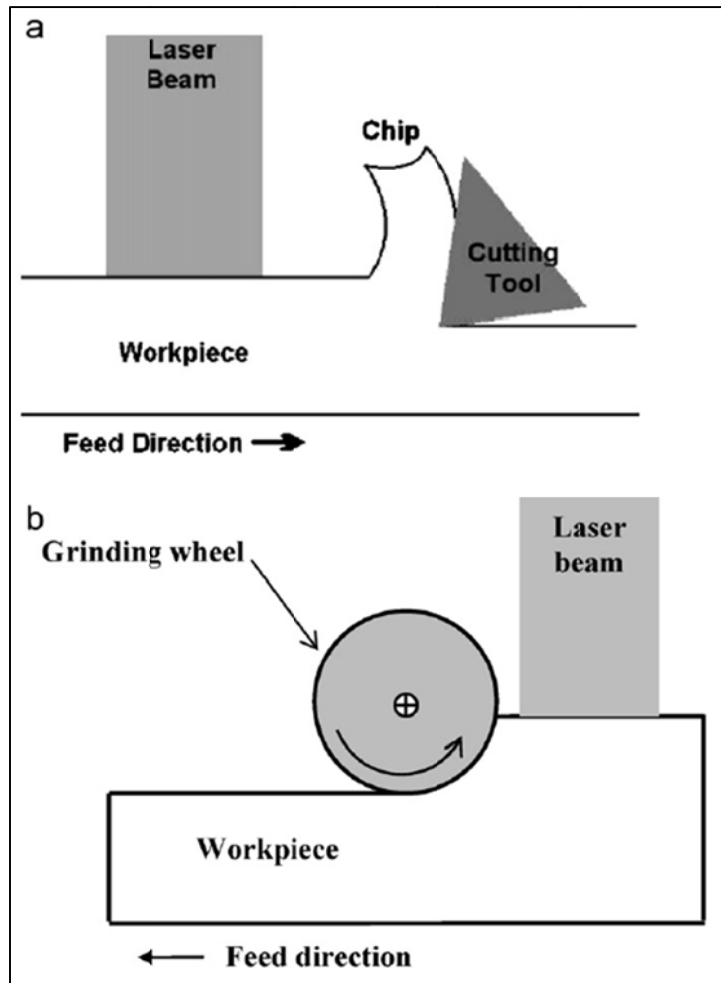
Στον τομέα της κατεργασίας προηγμένων υλικών, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι κατεργασίες, που αποτελούν συνδυασμό δύο ή περισσότερων διαφορετικών διαδικασιών. Οι συνδυαστικές αυτές κατεργασίες χρησιμοποιούνται για να εκμεταλλευτούν τα πιθανά πλεονεκτήματα και να ελαττώσουν τα μειονεκτήματα της κάθε μιας διαδικασίας. Συνήθως το αποτέλεσμα μιας υβριδικής μεθόδου κατεργασίας είναι καλύτερο από το αποτέλεσμα της υπέρθεσης των επιμέρους κατεργασιών, για τις ίδιες συνθήκες. Οι περισσότερες υβριδικές κατεργασίες προκύπτουν από το συνδυασμό συμβατικών και μη συμβατικών κατεργασιών. Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες ώστε να συνδυαστούν οι κατεργασίες κοπής με laser (LBM) με άλλου είδους κατεργασίες και μερικές από αυτές αποδείχτηκαν πολύ αποτελεσματικές. Τυπικές υβριδικές κατεργασίες LBM που έχουν αναπτυχθεί βιομηχανικά , φαίνονται στην Εικόνα 4-6.



**Εικόνα 4-6:** Συμβατικές κατεργασίες και κατεργασίες με laser LAT: τόννευση με τη βοήθεια laser (laser-assisted turning), LAS: διαμόρφωση με τη βοήθεια laser (laser assisted shaping), LAG: λείανση με τη βοήθεια laser (laser assisted grinding) , LAEDM: laser assisted EDM, LAECM: laser assisted ECM ,UALBM: ultrasonic-assisted LBM, LAE: laser assisted etching

Η πηγή θερμότητας του laser (θερμική ενέργεια) χρησιμοποιείται για να μαλακώσει το υλικό του τεμαχίου και στη συνέχεια να υποστεί τις συμβατικές κατεργασίες της τόννευσης, λείανσης ή διαμόρφωσης.

Οι υβριδικές κατεργασίες που περιλαμβάνουν συμβατικές και μη συμβατικές διεργασίες με laser φαίνονται στην Εικόνα 4-7.



Εικόνα 4-7: (α) Τόρνευση με τη βοήθεια laser , (β) Λείανση με τη βοήθεια laser

Στην τόρνευση με χρήση laser, η θερμότητα της δέσμης συγκεντρώνεται στο ακατέργαστο υλικό του τεμαχίου ακριβώς μπροστά από το κοπτικό εργαλείο. Η προσθήκη θερμότητας μαλακώνει το επιφανειακό στρώμα των υλικών που κατεργάζονται δύσκολα, έτσι ώστε να μειώνεται η ψαθυρότητα και το υλικό να παραμορφώνεται πλαστικά κατά τη διάρκεια της κοπής. Η διαδικασία αυτή οδηγεί σε **υψηλούς ρυθμούς αποβολής υλικού**, με ταυτόχρονη **διατήρηση της ποιότητας της επιφάνειας** του τεμαχίου και της **ακρίβειας των διαστάσεων**. Μειώνεται επίσης σημαντικά η φθορά του κοπτικού εργαλείου και το κόστος της κατεργασίας, καθώς μειώνεται ο αριθμός των ωρών κατεργασίας και των εργατοωρών ανά τεμάχιο.

- ❖ Οι Lei et al. βρήκαν ότι η τόρνευση με χρήση laser (LAT) μειώνει σημαντικά την επιφανειακή τραχύτητα και τη φθορά του κοπτικού εργαλείου σε σύγκριση με τη συμβατική κατεργασία τόρνευσης.
- ❖ Οι Wang et al. κατάληξαν στο συμπέρασμα ότι η τόρνευση με χρήση laser της σύνθεσης αλουμινίου/κεραμικού μειώνει τη δύναμη κοπής και τη

φθορά του εργαλείου κατά 30-50% και 20-30% αντίστοιχα και παρέχει καλύτερη ποιότητα επιφανείας από τη συμβατική τόννευση.

- ❖ Οι Chang και Kuo βρήκαν επίσης ότι στο πλάνισμα κεραμικών με αλουμίνιο με χρήση laser, η δύναμη κοπής μειώνεται κατά 20-22%, και επίσης με καλύτερη ποιότητα επιφάνειας.

Η *υβριδοποίηση των κατεργασιών κοπής με laser με άλλες μη συμβατικές κατεργασίες* έχει διάφορα πλεονεκτήματα σχετικά με την ποιότητα της κατεργασίας. Οι κατεργασίες με laser υπερήχων (UALBM), η ηλεκτροχημική κατεργασία με χρήση laser (LAECM), κατεργασίες ηλεκτροδιάβρωσης με τη βοήθεια laser (LAEDM) και η χαρακτηριστική με χρήση laser (LAE) αποτελούν παραδείγματα υβριδικών κατεργασιών με laser.

- ❖ Οι Zheng και Huang βρήκαν ότι η αναλογία βάθος προς διάμετρο και τα περιγράμματα των μικροοπών βελτιώθηκαν με τη χρήση παλμών υπερήχων στη διάτρηση με laser, σε σύγκριση με τη διάτρηση με laser χωρίς τη βοήθεια υπερήχων.

Στην ηλεκτροχημική κατεργασία με laser (LAECM), η ακτινοβολία του laser επιταχύνει την ηλεκτρόλυση και συγκεκριμενοποιεί την περιοχή κατεργασίας σε εύρος μερικών μικρών, πράγμα το οποίο αυξάνει την ακρίβεια και την παραγωγικότητα. Συγκεκριμένα:

- ❖ Οι De Silva et al. βρήκαν ότι στην ηλεκτροχημική κατεργασία με laser (LAECM) κράματος αλουμινίου και ανοξειδωτού χάλυβα, ο ρυθμός αποβολής υλικού αυξάνεται κατά 54% και 33% αντίστοιχα, σε σύγκριση με την απλή ηλεκτροχημική διεργασία. Ισχυρίζονται επίσης ότι η LAECM βελτιώνει την ακρίβεια της γεωμετρίας κατά 38%.
- ❖ Οι Li και Achara βρήκαν ότι οι κατεργασίες με laser που βοηθούνται με χημικό τρόπο (π.χ. κατεργασία laser μέσα σε διάλυμα άλατος) μειώνουν σημαντικά τη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και αυξάνουν ταυτόχρονα το ρυθμό αποβολής υλικού, σε σύγκριση με τις κατεργασίες laser που γίνονται σε περιβάλλον αέρα.

Ύστερα από αυτή τη ανάλυση, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η κύρια δυνατότητα των κατεργασιών με laser είναι η δυνατότητά τους να κατεργάζονται σχεδόν όλους τους τύπους υλικών σε σύγκριση με άλλες προηγμένες μεθόδους κατεργασίας, όπως οι EDM, ECM και USM. Είναι κατάλληλες για την κοπή μικρών και λεπτών φύλλων με υψηλούς ρυθμούς κοπής και μπορεί να εφαρμοσθεί στην κατεργασία μινιατούρων. Παρόλο που δεν ανήκει στις κατεργασίες επαφής και παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία, η θερμική φύση της κατεργασίας απαιτεί προσεκτικό έλεγχο της δέσμης

laser, ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητα θερμικά φαινόμενα. Μεταξύ των διαφόρων παραλλαγών, ευρέως χρησιμοποιούνται η κοπή και η διάτρηση με laser, ενώ οι τρισδιάστατες κατεργασίες με laser δεν είναι ακόμα πλήρως αναπτυγμένες και απαιτείται περαιτέρω έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση, πριν τεθούν σε εμπορική λειτουργία. Σε αντίθεση με άλλες πηγές θερμότητας, οι μη συμβατικές πηγές θερμότητας με laser, μπορούν να χρησιμοποιηθούν βοηθητικά στις συμβατικές κατεργασίες ή σε δύσκολα κατεργάσιμα υλικά. Οι υβριδικές κατεργασίες με laser έχουν αποδειχτεί καλύτερες σε σύγκριση με τις απλές συμβατικές κατεργασίες σε ποικίλες εφαρμογές.

#### **4.5 Βασικές περιοχές έρευνας στις κατεργασίες με laser: state-of-the-art**

Η έρευνα που έχει διεξαχθεί στην περιοχή των κατεργασιών με laser μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη και συγκεκριμένα:

- στις πειραματικές μελέτες,
- στις μελέτες μοντελοποίησης και
- στις μελέτες βελτιστοποίησης.

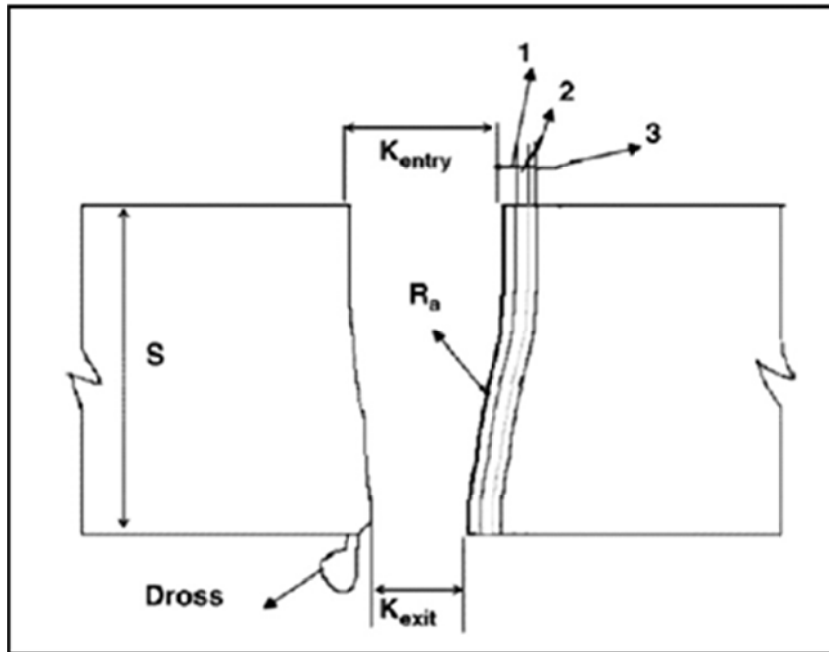
##### **4.5.1 Πειραματικές μελέτες**

Οι πειραματικές μελέτες πάνω στις κατεργασίες με laser, δείχνουν την επίδραση των παραμέτρων εισόδου της διεργασίας, όπως η ισχύς του laser, ο τύπος και η πίεση του βοηθητικού αερίου, το πάχος και η σύσταση του κατεργαζόμενου υλικού και ο τρόπος λειτουργίας (συνεχής ή διακοπτόμενη – παλμική- λειτουργία) στην απόδοση της διεργασίας.

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά (ή απόδοση της διεργασίας) που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι:

- ο *ρυθμός αποβολής υλικού (MRR)*,
- η *κατεργασμένη γεωμετρία* (πλάτος ίχνους κοπής, διάμετρος οπής, κωνικότητα),
- η *ποιότητα της επιφάνειας* (τραχύτητα επιφάνειας, μορφολογία επιφάνειας),
- τα *μεταλλουργικά χαρακτηριστικά* (αναμορφωμένη στρώση, θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη HAZ, ακαθαρσίες σκουριάς) και
- οι *μηχανικές ιδιότητες* (σκληρότητα, αντοχή, κλπ.).

Τα κύρια ποιοτικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη κοπή με laser φύλλων φαίνονται στην Εικόνα 4-8.



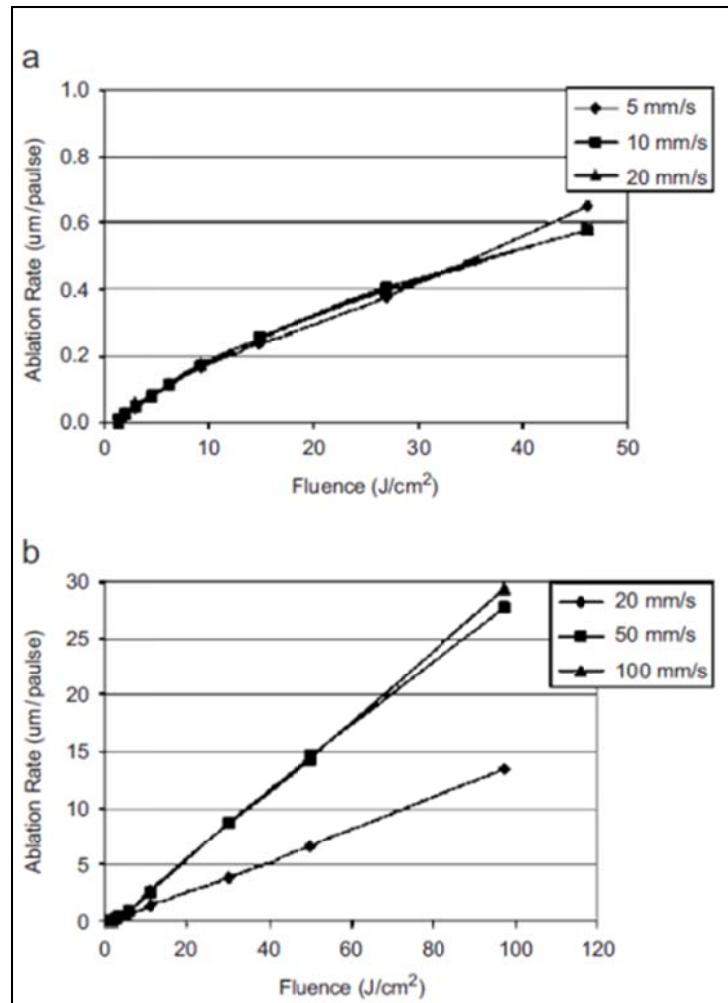
**Εικόνα 4-8:** Σχηματική απεικόνιση διαφόρων χαρακτηριστικών ποιότητας κοπής.  $K_{entry}$ : πλάτος ίχνους κοπής στην πλευρά εισόδου,  $K_{exit}$ : πλάτος ίχνους κοπής στην πλευρά εξόδου,  $R_a$ : επιφανειακή τραχύτητα,  $S$ : πάχος υλικού, 1: οξειδωμένο στρώμα, 2: αναμορφωμένη στρώση και 3: θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη (HAZ).

#### 4.5.2 Ρυθμός αποβολής υλικού (MRR)

- ❖ Ο Voisey et al. έχει μελετήσει τα φαινόμενα εκτίναξης τήγματος στα μέταλλα (αλουμίνιο, νικέλιο, τιτάνιο, μαλακός χάλυβας, βολφράμιο, χαλκός και ψευδάργυρος), διεξάγοντας πειράματα διάτρησης με Nd:YAG laser σε διαφορετικές πυκνότητες ισχύος. Βρέθηκε ότι ο ρυθμός αποβολής υλικού αρχικά αυξάνεται και μετά από μια κρίσιμη τιμή μειώνεται, όταν αυξάνεται η πυκνότητα ισχύος, για όλα τα μέταλλα που τέθηκαν υπό δοκιμή. Η κρίσιμη τιμή βρέθηκε ότι εξαρτάται από το είδος του μετάλλου.
- ❖ Κάποιοι ερευνητές χρησιμοποίησαν την ταχύτητα κατεργασίας ή το χρόνο κατεργασίας για να εκφράσουν το MRR. Η ταχύτητα κοπής συνεχούς κύματος (CW) και παλμικής ακτίνας laser Nd:YAG συγκρίθηκε για την κοπή γυμνών και επικαλυμμένων μεταλλικών πλακών (0.8–2.0 mm πάχος) πλαισίου θαλάμου χρησιμοποιώντας οξυγόνο ως βοηθητικό αέριο. Η ταχύτητα κοπής που επιτεύχθηκε ήταν μεγαλύτερη στην περίπτωση του laser συνεχούς κύματος (CW) γυμνού μετάλλου και λεπτής πλάκας και η μέγιστη καταγραμμένη ταχύτητα ήταν 5 m/min με τη βέλτιστη πίεση οξυγόνου στα 3 bar.
- ❖ Πειραματικές μελέτες για κοπή φύλλων ανοξείδωτου χάλυβα (έως 2 cm πάχος) από μεγάλη απόσταση (1 m) χωρίς τη χρήση βοηθητικού αερίου έχουν διεξαχθεί σε παλμική λειτουργία θεωρώντας τη συχνότητα

παλμών (100–200 Hz), την αιχμή ισχύος (2–5 kW) και τη ταχύτητα κοπής (0.05–0.5 m/min) σαν μεταβλητές της διεργασίας. Η μελέτη αποκαλύπτει ότι χαμηλές συχνότητες παλμών και υψηλές αιχμές ισχύος ευνοούν τις **υψηλότερες ταχύτητες κοπής**.

- ❖ Η πειραματική μελέτη μικροκατεργασιών δίσκων ζαφειριού (381 mm) και σιλικόνης (533 mm) δείχνουν ότι το MRR αυξάνεται με αύξηση της πυκνότητας ισχύος της δέσμης, ανεξάρτητα από την ταχύτητα κατεργασίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-9.



**Εικόνα 4-9:** Οι ρυθμοί αφαίρεσης υλικού μικροκατεργασίας με laser συναρτῆσει της πυκνότητας ισχύος laser για (α) δίσκο ζαφειριού και (β) δίσκο πυριτίου, για διαφορετικές ταχύτητες κοπής.

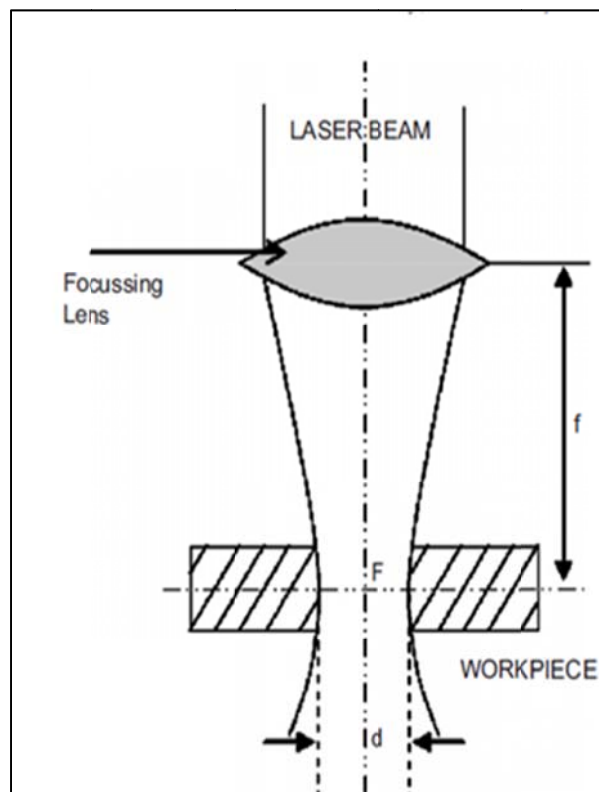
- ❖ Το MRR των κεραμικών μούλιτη (αλουμίνας) κατά τη διάρκεια της κοπής με laser αυξήθηκε με **σωστή επιλογή της ἔκκεντρης γωνίας του ακροφυσίου** (βέλτιστη τιμή 45°) και της **απόστασης μεταξύ του σημείου εκτόξευσης της δέσμης αερίου και του μετώπου της δέσμης του laser** (βέλτιστη τιμή 3 mm) .
- ❖ Πειραματικές μελέτες από τον Lau et al. δείχνουν ότι ο **πεπιεσμένος αέρας αφαιρεί περισσότερο υλικό σε σύγκριση με το αδρανές αργό**

αέριο κατά τη διάρκεια της κοπής με laser σύνθετων υλικών με ανθρακονήματα.

- ❖ Η επίδραση της ισχύος παλμού (kW) στο βάθος κοπής ή το MRR κατά τη διάρκεια της κοπής με παλμικό Nd: YAG laser δείχνει *αυξητική επίδραση για όλα τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας, τα σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα και τα κεραμικά σύνθετα υλικά.*
- ❖ Το MRR κατά τη διάρκεια της κατεργασίας laser του *σκυροδέματος* παρουσιάζει *αυξητική τάση τόσο λόγω της ισχύος του laser όσο και της ταχύτητας σάρωσης.*

### 4.5.3 Κατεργασμένη γεωμετρία

Δύο σημαντικοί παράμετροι του LBM, οι οποίοι καθορίζουν την ποιότητα της κατεργασίας είναι το πλάτος κοπής/διάμετρος οπής και η διαμόρφωση της κωνικότητας. Εξαιτίας της συγκλίνουσας-αποκλίνουσας μορφής του laser (Εικόνα 4-10), πάντα υπάρχει κωνικότητα στα κατεργασμένα με laser εξαρτήματα, αλλά μπορεί να ελαχιστοποιηθεί εντός αποδεκτού εύρους.



Εικόνα 4-10: Σχηματική αναπαράσταση του προφίλ της δέσμης

f: εστιακή απόσταση φακού

F: εστιακό σημείο

d: διάμετρος spot του εστιακού r



Μικρότερο πλάτος ίχνους κοπής ή διάμετρος οπής μειώνει την αναλογία.

- ❖ Ο Chen εξέτασε το πλάτος ίχνους κοπής για τρία διαφορετικά βοηθητικά αέρια: οξυγόνο, άζωτο και αργό σε υψηλή πίεση (έως και 10 bar) και διαπίστωσε ότι το πλάτος ίχνους κοπής αυξάνεται με την αύξηση της ισχύος του laser και μείωση της ταχύτητας κοπής κατά τη διάρκεια της κοπής με laser CO<sub>2</sub> λαμαρίνας μαλακού χάλυβα πάχους 3mm. Επίσης παρατήρησε ότι το οξυγόνο ή ο αέρας προκαλεί μεγαλύτερο πλάτος ίχνους κοπής, ενώ η χρήση αδρανούς αερίου οδηγεί σε μικρότερο πλάτος ίχνους κοπής.
- ❖ Οι Ghany et al. έχουν παρατηρήσει την ίδια απόκλιση του πλάτους κοπής με την ταχύτητα κοπής, την ισχύ και τον τύπο του αερίου και της πίεσης όπως τα ανωτέρω κατά τη διάρκεια της πειραματικής μελέτης της κοπής με laser Nd: YAG φύλλου από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα πάχους 1,2mm. Έχει επίσης βρεθεί ότι με αυξανόμενη συχνότητα το πλάτος ίχνους κοπής μειώνεται.

Η ίδια επίδραση της ισχύος του laser και της ταχύτητας κοπής στο πλάτος ίχνους κοπής κατά τη διάρκεια της κοπής φύλλων από χαλυβοκράματα διαφορετικού πάχους με laser CO<sub>2</sub>, διαπιστώθηκε και από άλλους ερευνητές. Οι αναφορές δείχνουν την ίδια μεταβολή του πλάτους ίχνους κοπής με την ισχύ του laser και την ταχύτητα κοπής κατά τη διάρκεια της κοπής με laser CO<sub>2</sub> διαφόρων σύνθετων υλικών με ίνες.

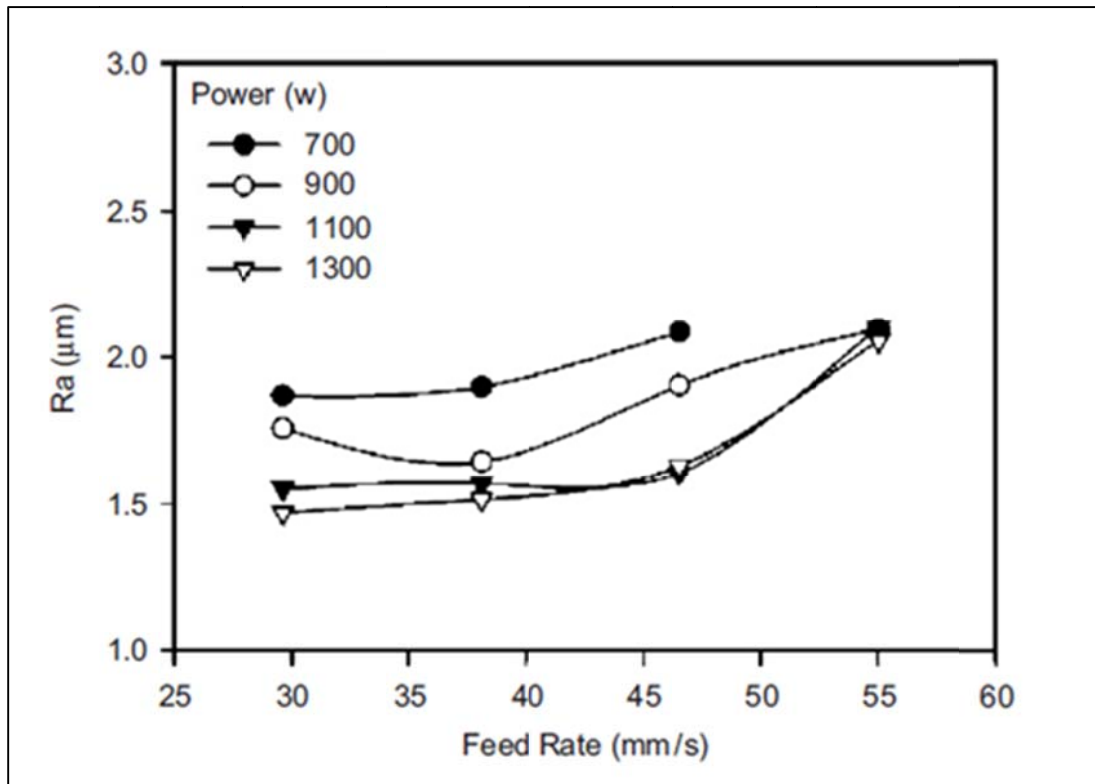
- ❖ Ο Karatas et al. διαπίστωσε ότι το πλάτος ίχνους κοπής μειώνεται στο ελάχιστο όταν η ρύθμιση εστίασης παραμείνει στην επιφάνεια του τεμαχίου για λεπτά φύλλα (1,5 mm) και στο εσωτερικό του τεμαχίου για παχύτερα φύλλα (3,5 mm) κατά τη διάρκεια της θερμής έλασης και αποσκωριωμένης (HSLA) κοπής σιδήρου και χάλυβα χρησιμοποιώντας CO<sub>2</sub> laser.
- ❖ Η κοπή με laser φύλλων χάλυβα με μεταλλική επικάλυψη (πάχους 1mm) δείχνει ότι ένας συγκεκριμένος συνδυασμός laser-φακού-μετάλλου δίνει ίδιο πλάτος ίχνους κοπής, ανεξάρτητα από τροποποιήσεις των παραμέτρων της διαδικασίας.
- ❖ Ο Thawari et al. έχει διεξάγει πείραμα κοπής με Nd: YAG laser σε πάχους 1mm φύλλο υπερκράματος με βάση το νικέλιο και διαπίστωσε ότι για την αύξηση της επικάλυψης του spot (που είναι συνάρτηση της συχνότητας παλμών και της ταχύτητα κοπής), το πάχος κοπής αυξάνεται. Επίσης παρατήρησε ότι η μικρότερη διάρκεια παλμού αποδίδει χαμηλότερη κωνικότητα σε σύγκριση με μεγαλύτερη διάρκεια παλμού.

- ❖ Ο Bandyopadhyay et al. έχει διερευνήσει την επίδραση του τύπου του υλικού και του πάχους σχετικά με την κωνικότητα της οπής κατά τη διάρκεια της διάτρησης με Nd: YAG laser κράματος τιτανίου και φύλλων κράματος νικελίου διαφορετικού πάχους. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η διάμετρος είσοδου της οπής και η γωνία κωνικότητας είναι διαφορετικά για διαφορετικά υλικά και αυξάνεται με την μείωση του πάχους. Η γωνία κωνικότητας μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας των παλμών, ενώ η ισχύς των παλμών δεν εμφανίζει σημαντική επίδραση στην κωνικότητα της οπής. Η διάτρηση με Nd: YAG laser σύνθετων υλικών με υαλονήματα (πάχους 7 mm), δείχνει ότι ο καθορισμός της θέσης του εστιακού επιπέδου στην επιφάνεια του τεμαχίου για ελάχιστη κωνικότητα οπής εξαρτάται από το πάχος του υλικού.
- ❖ Η διάτρηση με CO<sub>2</sub> και Nd: YAG laser φύλλων από πολυεστέρα και ενισχυμένων με υαλονήματα εποξικών ελασμάτων αποδίδουν μεγαλύτερη διάμετρο οπής σε αυξημένη ισχύ laser.

#### 4.5.4 Επιφανειακή τραχύτητα

Η επιφανειακή τραχύτητα είναι μια αποτελεσματική παράμετρος που εκφράζει την ποιότητα των κατεργασμένων επιφανειών.

- ❖ Η τιμή της επιφανειακής τραχύτητας μειώνεται, όταν αυξάνεται η ταχύτητα κοπής και η συχνότητα, και όταν μειώνεται η ισχύς του laser και η πίεση του αερίου. Επίσης το άζωτο δίνει καλύτερο φινίρισμα επιφάνειας από το οξυγόνο.
- ❖ Η τιμή της επιφανειακής τραχύτητας φαίνεται να μειώνεται με αύξηση της πίεσης στις περιπτώσεις αζώτου και αργού, αλλά ο αέρα αποδίδει κακή ποιότητα επιφάνειας πέραν της πίεσης των 6 bar. Επίσης, το φινίρισμα επιφάνειας είναι καλύτερο σε υψηλότερες ταχύτητες.
- ❖ Η ενέργεια του laser και η ταχύτητα κοπής έχει μια σημαντική επίδραση στην επιφανειακή τραχύτητα, καθώς και στη συχνότητα σχηματισμού ραβδώσεων (περιοδικές γραμμές που εμφανίζονται στην επιφάνεια κοπής) (Εικόνα 4-11).



Εικόνα 4-11: Μεταβολή της επιφανειακής τραχύτητας (surface roughness) συναρτήσει της ισχύος του laser και του ρυθμού τροφοδότησης.

Έχει αποδειχτεί ότι στο βέλτιστο ρυθμό τροφοδότησης, η επιφανειακή τραχύτητα είναι ελάχιστη και η ισχύς του laser έχει μικρή επίδραση στην επιφανειακή τραχύτητα, αλλά καμία επίδραση στη συχνότητα σχηματισμού ραβδώσεων. Το φινίρισμα επιφάνειας βελτιώνεται με την αύξηση της επικάλυψης του spot.

- ❖ Πρόσφατα, οι Li et al. πρότειναν τις συγκεκριμένες συνθήκες για κοπή χωρίς σχηματισμό ραβδώσεων με laser λαμαρίνας μαλακού χάλυβα πάχους 2 mm.
- ❖ Η μικροκατεργασία κεραμικού NdFeB (μαγνητικό υλικό) πάχους 0,5 mm με τη χρήση παλμικού Nd:YAG laser δίνει καλύτερο φινίρισμα επιφάνειας με νερό σε σύγκριση με αέρα .
- ❖ Οι πειραματικές έρευνες σε παλμική κοπή με Nd: YAG laser φύλλου πάχους 2,15 mm κεραμικού νιτριδίου του πυριτίου χρησιμοποιώντας τον αέρα ως βοηθητικό αέριο, δείχνει ότι η βέλτιστη τιμή της επιφανειακής τραχύτητας πέφτει στο μέσο του εύρους των παραμέτρων λειτουργίας συχνότητας παλμού (6 έως 8,5 Hz), έντασης ρεύματος λυχνίας (22-27 A) και ταχύτητα κοπής (17 έως 22 mm /s).

- ❖ Η κοπή με laser κεραμικών υποστρωμάτων από αλουμίνα πάχους (1-10 mm) μέσω των ελεγχόμενων θραύσεων με χρήση δύο συγχρονισμένων ακτίνων laser Nd: YAG (για τη χάραξη της ρωγμής), και μη συγκεντρωμένου CO<sub>2</sub> (για να προκαλέσει θερμικές καταπονήσεις) δείχνουν ότι το φινίρισμα επιφανείας που λαμβάνεται σε ισχύ laser 60W (και για τα δύο Nd: YAG και CO<sub>2</sub>) και 1 mm /s ταχύτητα κοπής ήταν πολύ καλύτερο από τη συμβατική κοπή με laser.
- ❖ Η επιφανειακή τραχύτητα κεραμικών πλακιδίων μεγάλου πάχους κατά τη διάρκεια της κοπής με laser CO<sub>2</sub> επηρεάζεται κυρίως από το λόγο της ισχύος προς την ταχύτητα κοπής, τη σύσταση του υλικού και το πάχος, τον τύπο του αερίου και την πίεση του.
- ❖ Η χρήση του αζώτου ως βοηθητικό αέριο και οι χαμηλότερες πυκνότητες ισχύος μειώνουν την επιφανειακή τραχύτητα.
- ❖ Η παλμική λειτουργία σε κοπή με CO<sub>2</sub> laser παρέχει καλύτερο φινίρισμα επιφάνειας από τη λειτουργία συνεχούς κύματος CW.

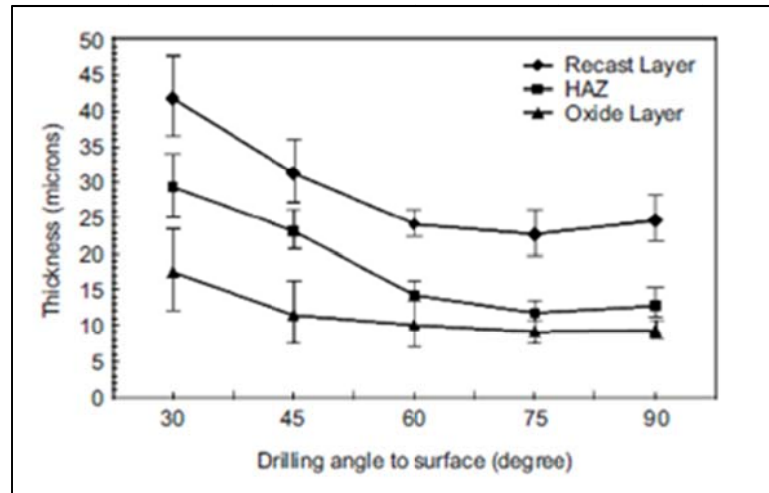
#### 4.5.5 Μεταλλουργικά χαρακτηριστικά

Η μεταβολή των μεταλλουργικών χαρακτηριστικών τεμαχίων κατεργασμένων με laser κυρίως εξαρτάται από την HAZ. Για αυτό απαιτείται να περιοριστεί η HAZ κατά την LBM ελέγχοντας τους διαφόρους παράγοντες.

- ❖ Μειώνοντας την ισχύ και αυξάνοντας το ρυθμό τροφοδότησης οδηγούμαστε γενικά σε μείωση της HAZ.
- ❖ Οι Wang et al. επίσης βρήκαν την ίδια επίδραση ισχύος και ταχύτητας κοπής στη HAZ κατά τη διάρκεια κοπής επικαλυμμένων φύλλων χάλυβα με CO<sub>2</sub> laser. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η αυξημένη πίεση του οξυγόνου αυξάνει την HAZ.
- ❖ Παλμική κοπή με laser φύλλων τιτανίου και κραμάτων τιτανίου, δείχνει ότι η **ελάχιστη HAZ** μπορεί να προκύψει με *μέτρια ισχύ παλμού, υψηλή συχνότητα παλμών, υψηλή ταχύτητα κοπής και σε υψηλή πίεση του βοηθητικού αερίου αργού*, ενώ η χρήση του οξυγόνου ως βοηθητικού αερίου δίνει **μέγιστη HAZ** σε σύγκριση με το άζωτο και το αργό. Η μελέτη της μικροδομής του κράματος αλουμινίου κατεργασμένου με CO<sub>2</sub> laser δείχνει ότι η HAZ αυξάνεται όσο αυξάνεται το βάθος της διάτρησης.
- ❖ Μικρό πάχος υλικών και ισχύος παλμού δίνει μικρότερη HAZ ενώ η συχνότητα των παλμών δεν έχει σημαντική επίδραση στην HAZ για κοπή με laser φύλλων υπερκράματος νικελίου μεγάλου πάχους.
- ❖ Οι Zhang et al. μελέτησαν ότι η παλμική κοπή με laser που χρησιμοποιεί laser μικρού μήκους κύματος με χαμηλό εύρος παλμού

δίνει μικρότερη HAZ σε σύγκριση με laser υψηλού μήκους κύματος με υψηλό εύρος παλμού.

- ❖ Η επίδραση της γωνίας δέσμης κατά τη διάρκεια της διάτρησης με Nd: YAG laser TBC υπερκραμάτων νικελίου δείχνει ότι η αύξηση της γωνίας δέσμης σε σχέση με την επιφάνεια μειώνει το πάχος της HAZ, της αναμορφωμένης και της οξειδωμένης στρώσης έως και σε 60° και μετά παραμένει σχεδόν σταθερή (Εικόνα 4-12).



**Εικόνα 4-12:** Μέσο πάχος της αναμορφωμένης στρώσης, HAZ και οξειδωμένης στρώσης για διαφορετικές γωνίες διάτρησης.

- ❖ Η παλμική κοπή με Nd: YAG laser κεραμικών φύλλων δείχνει ότι η HAZ αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειας των παλμών και του ρυθμού τροφοδότησης αλλά μειώνεται πολύ λίγο, όταν αυξάνει η συχνότητα παλμών.
- ❖ Η ποιότητα κοπής του κεραμικού μολίτη (αλουμίνας) σύνθετου υλικού πάχους 4mm αξιολογήθηκε κατά τη διάρκεια της πειραματικής έρευνας σε παλμικές κοπές με Nd: YAG laser και διαπιστώθηκε ότι η συχνότητα παλμών και η ταχύτητα κοπής έχουν σημαντική επίπτωση στην περιοχή HAZ ενώ η πίεση του βοηθητικού αερίου δεν έχει καμία ουσιαστική επίδραση. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η ταχύτητα κοπής είναι συνάρτηση της ισχύος και της πίεσης του αερίου.
- ❖ Η HAZ στην κοπή με laser σύνθετων υλικών με ανθρακονήματα βρέθηκε συγκρίσιμη με EDM.

Επειδή τα περισσότερα υλικά που αποβάλλονται κατά τη διάρκεια LBM προέρχονται από την εκτίναξη τήγματος, το τήγμα που δεν αφαιρείται από την κοιλότητα στερεοποιείται ξανά και προκύπτει μία αναμορφωμένη στρώση στα πλαϊνά τοιχώματα και τη βάση της κοιλότητας. Αυτή η ζώνη αναμόρφωσης

παρουσιάζει εξ' ολοκλήρου διαφορετικές ιδιότητες σε σύγκριση με το αρχικό υλικό. Επομένως, **στόχος είναι πάντα η αφαίρεση ή ελαχιστοποίηση της στρώσης αναμόρφωσης**. Πολλοί ερευνητές έχουν διαπιστώσει την επίδραση των παραμέτρων στην στρώση αναμόρφωσης και έχουν προσπαθήσει να την ελαχιστοποιήσουν.

- ❖ Η παρατήρηση στρώσης αναμόρφωσης σε παχύ τιτάνιο και κράματα βάσης από νικέλιο κατά τη διάρκεια διάτρησης με laser, εμφανίζει πυκνότερα στρώματα στο σημείο εισόδου της οπής. Επίσης, οι επιδράσεις των παραμέτρων δείχνουν ότι αυξάνοντας την παλμική συχνότητα και την παλμική ισχύ, η στρώση αναμόρφωσης μειώνεται ενώ αυξάνεται ανάλογα με την πυκνότητα των υλικών.
- ❖ Η επίδραση της γωνίας δέσμης σε αναμορφωμένη στρώση βρέθηκε ίδια με αυτή του HAZ. Χρησιμοποιήθηκε ειδικά σχεδιασμένο ακροφύσιο στην κοπή πυκνών κεραμικών πλακετών με laser, στη βέλτιστη γωνία και απόσταση από την επιφάνεια εργασίας, προκειμένου να αφαιρεθεί ολοκληρωτικά η αναμορφωμένη στρώση. [11]

#### 4.5.6 Μηχανικές ιδιότητες

Οι ερευνητές έχουν επίσης μελετήσει τις μηχανικές ιδιότητες τεμαχίων επεξεργασμένων με laser, διαπιστώνοντας ότι οι θερμικές βλάβες και ο σχηματισμός ρωγμών επηρεάζουν την αντοχή των υλικών.

- ❖ Οι Zhang et al. διαπίστωσαν ότι η μέση τιμή αντοχής σε κάμψη μειωνόταν στο 40% αυτής που είχε αρχικά το υλικό κατόπιν κοπής με laser.
- ❖ Επίσης, η μικροκατεργασία με laser σε δίσκους σιλικόνης έδειξε ότι το όριο θραύσης μετά την κοπή με laser εμφανίζεται μειωμένο.
- ❖ Η σκληρότητα φύλλων κραμάτων τιτανίου στην θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, αυξήθηκε κατά 10% μετά την κοπή με laser και ο σχηματισμός ρωγμών ήταν μεγαλύτερος με τη χρήση οξυγόνου ή αζώτου ως βοηθητικού αερίου σε σύγκριση με τη χρήση αδρανούς αερίου αργού.
- ❖ Οι Cosp et al. ανακάλυψαν βέλτιστες συνθήκες κοπής για χρήση laser σε ψευδοπορσελάνη προκειμένου να αποφύγουν τον σχηματισμό ρωγμών.

#### 4.5.7 Σχόλια

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που αναλύονται παραπάνω δείχνουν ότι η επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας στην απόδοση της διεργασίας δεν παρουσιάζουν σταθερό μοτίβο στα διαφορετικά εύρη λειτουργίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται μία περισσότερο επιστημονική, πειραματική μελέτη σε

διαφορετικά εύρη παραμέτρων λειτουργίας προκειμένου να μπορούμε να προβλέψουμε τη συμπεριφορά κατά την επεξεργασία. Σε πολλά πειραματικά αποτελέσματα που έχουν αναλυθεί έως τώρα, το βέλτιστο εύρος παραμέτρων λειτουργίας βρέθηκε σύμφωνα με την εναλλαγή ενός συντελεστή κατά ένα διάστημα, αλλά δεν μελετήθηκε η ταυτόχρονη επίδραση της εναλλαγής περισσότερων από μίας παραμέτρων ταυτόχρονα με περιεκτικό τρόπο.

Εδώ μπορούμε να συμπεράνουμε ότι απαιτείται μία μελέτη με πλήρη επιστημονική μεθοδολογία για την LBM διαφορετικών προηγμένων μηχανολογικών υλικών με όλες τις πιθανές παραμέτρους καθώς και μία ή πολλαπλές μετρήσεις απόδοσης. [8]

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Τα μέταλλα και τα κράματα τους**

### **5.1 Εισαγωγή**

Τα μέταλλα αποτελούν αντικείμενο συνεχούς έρευνας ώστε να μπορούν ευκολότερα να υποστούν κατεργασία με laser, ιδίως για τις εφαρμογές της κοπής και της συγκόλλησης. Γενικά οι κοπές με laser δεν επηρεάζονται πολύ από τις μεταβολές στις μεταλλουργικές και μηχανικές ιδιότητες. Δηλαδή, παρόλο η μεταλλουργία επηρεάζει ξεκάθαρα το επίπεδο απόδοσης, απέχει πολύ από το να αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την παραγωγικότητα, την ποιότητα και την κερδοφορία μιας κατεργασίας κοπής με laser. Στις ακόλουθες ενότητες περιγράφονται σημαντικές ιδιότητες των υλικών και η επίδρασή τους στο παραγόμενο προϊόν της κοπής με laser.

### **5.2 Τύποι κραμάτων μετάλλων**

Οι κοπές με laser προσφέρουν ένα μεγάλο εύρος ευκαιριών και προκλήσεων, είτε το υλικό είναι μαλακός χάλυβας με μεγάλη δυνατότητα εφελκυσμού, είτε χάλυβας μεγάλης αντοχής σε τάση για εφαρμογή σε δομικά στοιχεία, είτε ανοξείδωτος χάλυβας για χρήση σε μαγειρικά σκεύη είτε κράματα αλουμινίου, τιτανίου και νικελίου για αεροπορικές εφαρμογές είτε τέλος κράματα χαλκού για εφαρμογές στη βιομηχανία ηλεκτρονικών.

#### **5.2.1 Μαλακός χάλυβας**

Ο χάλυβας είναι το κύριο υλικό που υφίσταται κοπή με laser, λόγω του μεγάλου πλήθους εφαρμογών στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί και λόγω της ευκολίας με την οποία μπορεί να κοπεί με laser.

Ο μαλακός χάλυβας αποτελείται κυρίως από σίδηρο με κάποιες κραματικές προσμίξεις, αλλά σε ελεγχόμενες ποσότητες. Τα βασικά κραματικά στοιχεία του μαλακού χάλυβα είναι ο άνθρακας (C), το μαγγάνιο (Mn), το πυρίτιο (Si), ο φωσφόρος (P) και το θείο (S). Για τη διευκόλυνση της κατεργασίας διαμόρφωσης, κατασκευής και συγκόλλησης, το επίπεδο του άνθρακα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, το μαγγάνιο να διατηρείται σε ποσοστό 0,25-0,50%, ο φωσφόρος κάτω από 0,035% και το θείο κάτω από 0,04%. Οι χάλυβες αυτοί είναι μαγνητικά υλικά.

Είτε σε μορφή λεπτών φύλλων ή χοντρών πλακών, ο μαλακός χάλυβας μπορεί να κοπεί με laser με ανώτερη ποιότητα κοπής άκρων σε σύγκριση με συμβατικές θερμικές κατεργασίες κοπής. Αν προσδιοριστεί η επιθυμητή σύσταση ενός κράματος, το παραγόμενο προϊόν βρίσκεται σε επιθυμητά όρια ανοχών. Οι μεταβολές στη σύσταση ενός κράματος δεν είναι πηγή σημαντικών μεταβολών στη ποιότητα των άκρων και την ταχύτητα κοπής. Τα μέταλλα που



έχουν σύσταση στα όρια του προαναφερθέντος εύρους, παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες κατά την κοπή με laser.

- Ένας χάλυβα με περιεχόμενο άνθρακα κοντά στο ή πάνω από 0,40% είναι επιρρεπής σε μικρορωγμές στα άκρα, ενώ χάλυβες με ικανότητα εφελκισμού και περιεχόμενο άνθρακα κάτω από 0,15% αποδίδουν πρακτικά άκρα χωρίς ρωγμές. Οι μικρορωγμές οδηγούν σε διαχωρισμούς και αστοχία ενός τεμαχίου λόγω κόπωσης κατά τη διάρκεια της χρήσης του. Η αστοχία λόγω κόπωσης μπορεί να αποφευχθεί με θερμική επεξεργασία (ανόπτηση) των άκρων σε άνθρακες με υψηλό περιεχόμενο άνθρακα.
- Για ισοδύναμη ποιότητα κοπής άκρων, οι χάλυβες με χαμηλά ποσοστά άνθρακα ευνοούν την ανάπτυξη ταχυτήτων ως και 20% μεγαλύτερες σε σχέση με τους χάλυβες με υψηλά ποσοστά άνθρακα.
- Για ισοδύναμη ποιότητα άκρων, το μέγιστο πάχος που μπορεί να κοπεί με laser είναι 20% μεγαλύτερο στους χάλυβες με χαμηλό ποσοστό άνθρακα.
- Οι χάλυβες με ποσοστά πυριτίου πάνω από 0,4% προτιμώνται σε ηλεκτρικές εφαρμογές λόγω της αυξημένης ηλεκτρικής τους αντίστασης και του αυξημένου κατωφλίου στην θερμική οξείδωση. Όμως η ταχύτητα κοπής των ανθράκων αυτών είναι μειωμένη κατά 20% σε σύγκριση με χάλυβες με ποσοστό πυριτίου μικρότερο από 0,25%, καθώς παρουσιάζουν και σοβαρή σκουριά.
- Χάλυβες με ποσοστά μαγνησίου και θείου 0,5% και 0,04% αντίστοιχα διαταράσσουν την κοπή με laser, μειώνουν την ταχύτητα κοπής και χειροτερεύουν την ποιότητα των άκρων.

### 5.2.2 Ανοξειδωτος χάλυβας

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες, οι οποίοι αναφέρονται και ως χάλυβες χρωμίου-νικελίου, έχουν κραματικό περιεχόμενο 10-20 φορές μεγαλύτερο από τους μαλακούς χάλυβες. Το χρώμιο (Cr) είναι το κύριο κραματικό στοιχείο, με ποσοστό μεγαλύτερο από 18%. Ακολουθεί το νικέλιο (Ni) με ποσοστό περίπου 8% στους περισσότερους κοινούς τύπους. Αυτά τα κραματικά στοιχεία αυξάνουν τη συγκολλησιμότητα και μειώνουν την ευθραυστότητα.

Παρόλο που οι περισσότεροι ανοξειδωτοι χάλυβες είναι μη-μαγνητικά υλικά, μερικοί τύποι με πολύ μικρά ή μηδενικά ποσοστά νικελίου είναι μαγνητικά υλικά. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό του εξοπλισμού διαχείρισης του υλικού καθώς και του εξοπλισμού απομάκρυνσης των υπολειμμάτων.

Ο ανοξειδωτος χάλυβας παρουσιάζει υψηλή αντοχή στη διάβρωση, λόγω της φυσικής διαμόρφωσης φιλμ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  στην επιφάνειά του όταν εκτίθεται σε ελεύθερη ατμόσφαιρα. Αυτό το οξειδωτικό φιλμ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  προστατεύει το υλικό από περαιτέρω διάβρωση. Αυτό το φιλμ δημιουργεί επίσης μικρότερη ανάγκη για οξυγόνο στη θερμική κοπή σε σύγκριση με το οξυγόνο που απαιτείται στην κοπή του μαλακού χάλυβα. Όμως, η παρουσία του οξυγόνου αυξάνει το σχηματισμό σκουριάς στο ίχνος της κοπής. Για μείωση της οξείδωσης, ο ανοξειδωτος χάλυβας κατεργάζεται κυρίως με το άζωτο ως βοηθητικό αέριο. Η πίεση του αζώτου ως βοηθητικού αερίου οδηγεί σε μεγάλη κατανάλωση αζώτου και αυξάνει το κόστος της κατεργασίας. Για ίση ισχύ του laser και ισοδύναμη ποιότητα των άκρων, το μέγιστο πάχος ανοξειδωτου που μπορεί να κοπεί με laser είναι μισό σε σχέση με το μαλακό χάλυβα.

### **5.2.3 Κράματα αλουμινίου**

Το αλουμίνιο είναι το δεύτερο μετά το χάλυβα όσον αφορά το εύρος των εφαρμογών κοπής με laser. Όμως οι εφαρμογές της κοπής με laser που περιλαμβάνουν τη χρήση αλουμινίου περιλαμβάνουν σημαντικούς τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, παρόλο που το κόστος του αλουμινίου είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με το κόστος του χάλυβα.

Όπως και στην περίπτωση του χάλυβα, το αλουμίνιο οξειδώνεται γρήγορα όταν εκτίθεται στην ελεύθερη ατμόσφαιρα, σχηματίζοντας ένα επιφανειακό αυτοπροστατευτικό φιλμ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  που εμποδίζει την περαιτέρω διείσδυση της διάβρωσης. Το φιλμ αυτό εμποδίζει την αποτελεσματική καύση του οξυγόνου κατά μήκος του ίχνους κοπής. Η ουδετεροποίηση του οξυγόνου είναι σημαντικός παράγοντας κυρίως σε πλάκες μεγάλου πάχους. Καθώς η κοπή με τη βοήθεια του οξυγόνου δεν παρέχει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα, το αλουμίνιο υφίσταται κοπή με laser που χρησιμοποιεί ως βοηθητικό αέριο των αέρα, καθώς παρουσιάζει και μικρότερο κόστος. Για να μειωθεί η σκουριά και η οξείδωση των άκρων, το αλουμίνιο κόβεται κυρίως με laser που χρησιμοποιεί ως βοηθητικό αέριο το άζωτο.

### **5.2.4 Κράματα τιτανίου και νικελίου**

Ο τομέας της ενέργειας και της αεροβιομηχανίας αντιπροσωπεύουν δύο από τις μεγαλύτερες αγορές κραμάτων τιτανίου και νικελίου. Τα μέταλλα αυτά παρουσιάζουν μεγάλη σκληρότητα και πλεονεκτικό λόγο αντοχής/βάρος σε σχέση με τα κοινά μέταλλα, συμπεριλαμβανομένου του αλουμινίου και του χάλυβα. Κράματα νικελίου, όπως το Monel και το Hastelloy είναι γνωστά για τη μεγάλη αντίστασή τους στη διάβρωση σε όξινα χημικά περιβάλλοντα και μεγάλες θερμοκρασίες. Τα πλεονεκτήματα αυτά εξισορροπούν το αυξημένο τους κόστος. Τα κράματα αυτά χρησιμοποιούνται συνήθως σε μηχανές

αεροσκαφών και πτερύγια αεροστροβίλων λόγω της υψηλής αντοχής τους σε σχέση με το βάρος τους και της δυνατότητάς τους να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες.

Το τιτάνιο χρησιμοποιείται ως δομικό μέταλλο από τη δεκαετία του 50. Το κράμα τιτανίου είναι ένα ακριβό κράμα που χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροβιομηχανία και σε περιβάλλοντα υψηλών θερμοκρασιών και υψηλών πιέσεων, όπως στους αεροστροβίλους όπου η επαρκής ψύξη επιτρέπει τη διατήρηση των θερμοκρασιών κάτω από το σημείο τήξης. Το τιτάνιο είναι επίσης βιολογικά συμβατό με τους ανθρώπινους ιστούς και τα οστά, γεγονός που εξηγεί τη χρήση του σε ιατρικές προσθετικές συσκευές.

Κατά τη διάρκεια της θερμικής κοπής με οξυγόνο ως βοηθητικό αέριο, το τιτάνιο αντιδρά με το οξυγόνο σε ισχυρά εξώθερμη αντίδραση. Αντιδρά επίσης με αδρανή αέρια, όπως το άζωτο, σε περιβάλλον όπου η θερμοκρασία βρίσκεται πάνω από τους 480°C. Η υψηλά εξώθερμη αντίδραση του τιτανίου μπορεί να προκαλέσει εκρηκτικές φλόγες. Γενικά δεν ενδείκνυται η επεξεργασία του τιτανίου είτε με άζωτο είτε με οξυγόνο. Η οξείδωση του τιτανίου εμφανίζεται ως μπλε χρώμα στις άκρες κοπής. Καταλήγει επίσης σε αύξηση της σκληρότητας στη θερμοεπηρεαζόμενη περιοχή (HAZ), σε σημείο που εμφανίζονται μικρές ρωγμές κατά μήκος του άκρου κοπής.

Γενικά ενδείκνυται η κοπή του τιτανίου με τη χρήση κάποιου αδρανούς αερίου ως βοηθητικό αέριο, όπως το αργό. Αυτό επιτρέπει την κοπή πολύπλοκων χαρακτηριστικών, καθώς έτσι ελαχιστοποιείται η οξείδωση, αν δεν εξαφανίζεται εντελώς. Η δημιουργία σκουριάς ελαχιστοποιείται ή και εξαφανίζεται. Η μικρορωγμή κατά μήκος του άκρου κοπής ελαχιστοποιείται όταν το ίχνος του άκρου κοπής προστατεύεται από την οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια και μετά την αλληλεπίδραση με τη δέσμη laser. Το γκρι μεταλλικό χρώμα της κοπτικής ακμής υποδηλώνει την απουσία οξείδωσης του τιτανίου. Η θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη (HAZ) παρουσιάζει μικρότερη αύξηση σκληρότητας σε σύγκριση με τη θερμική κοπή με τη βοήθεια οξυγόνου.

### **5.2.5 Κράματα χαλκού**

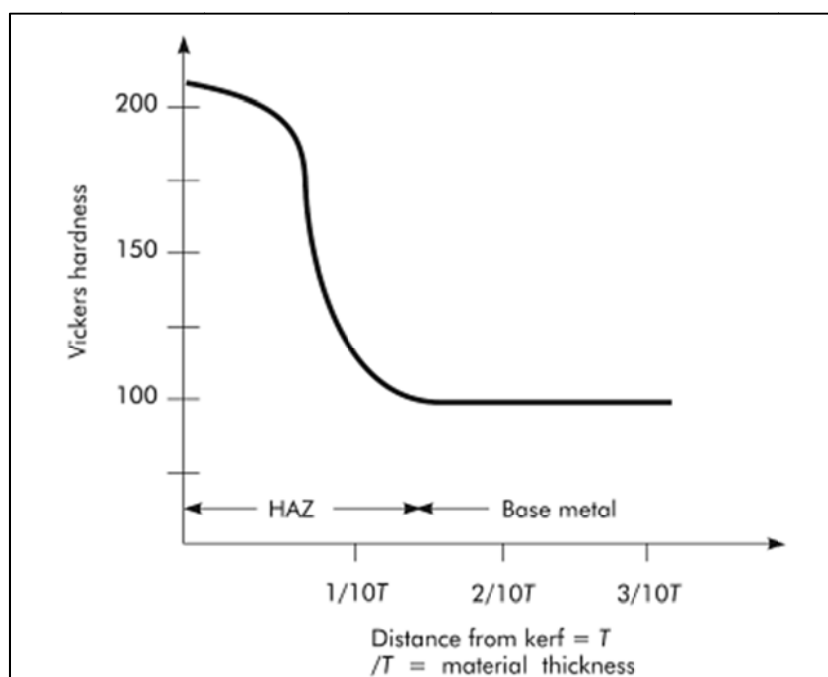
Τα laser μπορούν να κόψουν το χαλκό στην καθαρή του μορφή καθώς και σε κράματα, όπως ο ορείχαλκος με αναλογία ένα τρίτο ψευδάργυρο ή μπρούντζος με 10% κασσίτερο. Οι τρεις αυτές κατηγορίες κραμάτων είναι οι βασικότερες που συναντώνται στην πράξη. Ο μπρούντζος κατεργάζεται συνήθως μέσω της χύτευσης και όχι τόσο μέσω κατεργασίας σε μεταλλικά φύλλα ή πλάκες, και έτσι δεν κόβεται συνήθως με laser, αλλά διαμορφώνεται και κόβεται μηχανικά.

Η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού συμβαδίζει, σύμφωνα με τους νόμους της φυσικής με την υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Το γεγονός αυτό τον καθιστά ιδιαίτερα επιθυμητό υλικό για βιομηχανικά ηλεκτρικά συστήματα. Δουλεύει επίσης καλά σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή θερμική αγωγιμότητα, όπως οι εναλλάκτες θερμότητας. Τα κράματα χαλκού δεν παρουσιάζουν συνήθως μαγνητικές ιδιότητες.

Όπως και τα ευγενή αέρια, όπως ο χρυσός, τα κράματα χαλκού έχουν υψηλή αντίσταση στη διάβρωση σε ποικίλα βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η οξείδωση του χαλκού από το οξυγόνο είναι μέτρια εξώθερμη σε σύγκριση με το χάλυβα ή το τιτάνιο. Η κατεργασία με laser οξυγόνου των κραμάτων χαλκού επιτρέπει μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής σε σύγκριση με τη χρήση αδρανούς βοηθητικού αερίου.

### 5.3 Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων όπως η τάση εφελκυσμού, η σκληρότητα, η ολκιμότητα, η αντίσταση σε κόπωση δεν είναι οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τη διαδικασία κοπής με laser. Η κοπή με laser είναι μια θερμική διαδικασία με υψηλούς ρυθμούς θέρμανσης και ψύξης, και έτσι οι μηχανικές ιδιότητες της θερμοεπηρεαζόμενης ζώνης (HAZ) διαφέρουν σημαντικά σε σύγκριση με αυτές του βασικού μετάλλου. Στην Εικόνα 5-1 παρουσιάζεται η μεταβολή της σκληρότητας από την κοπτική ακμή, στη HAZ και το βασικό μέταλλο.



**Εικόνα 5-1:** Τυπικό προφίλ της σκληρότητας συναρτήσει της απόστασης από το ίχνος κοπής για σιδηρούχα μέταλλα

Τα σιδηρούχα μέταλλα παρουσιάζουν αύξηση της σκληρότητας στη HAZ 50-100%, ανάλογα με τις μεταβλητές εισόδου της διαδικασίας, συμπεριλαμβανομένου του μεταλλικού κράματος, του μήκους κύματος του laser, της ισχύος, του κύκλου χρησιμοποίησης και του τύπου του βοηθητικού αερίου. Συνήθως το πλάτος της HAZ εκτείνεται στο μισό του πάχους του υλικού και κατά την περιφέρεια του τεμαχίου, και μπορεί να αφαιρεθεί με τη διαδικασία του τριμμαρίσματος ή του ρελιάσματος (hemming).

Η ολκιμότητα μειώνεται και το όριο κόπωσης ελαττώνεται, πράγμα το οποίο αποτελεί μειονέκτημα για ορισμένες εφαρμογές, όπως στα δομικά στοιχεία.

Φυσικές ιδιότητες όπως η θερμική αγωγιμότητα και το ιξώδες του υλικού έχουν σημαντική επίδραση στην ποιότητα, την παραγωγικότητα, την κερδοφορία και την ασφάλεια της διαδικασίας κοπής. Στους Πίνακες 5-1 και 5-2 συγκρίνονται οι φυσικές ιδιότητες διαφόρων μετάλλων. Οι ενέργειες που αναφέρονται στους πίνακες αντιπροσωπεύουν ένα μέρος μόνο της απαιτούμενης ενέργειας της δέσμης, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της σπαταλάται λόγω της αντανάκλασης στην επιφάνεια, τη μερική μετάβαση μέσω του ίχνους κοπής, την αγωγή θερμότητας μέσα από το σώμα του εργαζόμενου τεμαχίου, την ψύξη λόγω συναγωγής από την ατμόσφαιρα και την ακτινοβολία του θερμού τεμαχίου.

Η κοπή με laser είναι εξ' ορισμού λιγότερο αποδοτική όταν επικρατούν υψηλοί ρυθμοί αγωγής θερμότητας. Αυτό γίνεται εμφανές όταν κατεργαζόμαστε πλάκες μεγάλου πάχους με χαμηλό ρυθμό τροφοδοσίας. Ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας του laser καταναλώνεται λόγω αγωγής στο κυρίως σώμα του τεμαχίου μακριά από την αιχμή κοπής. Ένα μέταλλο που έχει θερμανθεί λόγω αγωγής μπορεί να προκαλέσει έγκαυμα στο ανθρώπινο δέρμα, αν έρθει απευθείας σε επαφή μετά την ολοκλήρωση της κοπής. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο συνδυασμός του θερμού μετάλλου με κάποιο λιπαντικό έλαιο που χρησιμοποιείται για την προστασία του μετάλλου από τη διάβρωση μπορεί να οδηγήσει σε κίνδυνο πυρκαγιάς.

Το ιξώδες επίσης του μετάλλου παίζει σημαντικό ρόλο στην ποιότητα και την παραγωγικότητα. Σε γενικές γραμμές, τα μέταλλα έχουν χαμηλό ιξώδες σε θερμοκρασίες τήξης. Το ιξώδες μειώνεται περαιτέρω καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Η μείωση του ιξώδους αποτελεί σημαντικό παράγοντα που οδηγεί στη δημιουργία σκουριάς, ειδικά στην περίπτωση που η θερμοκρασία τήξης του υλικού είναι σχετικά χαμηλή, όπως στο αλουμίνιο.

**Πίνακας 5-1:** Φυσικές ιδιότητες ορισμένων μετάλλων

| Material               | Thermal Conductivity<br>at Room Temperature,<br>Btu/h ft <sup>-2</sup> F (W/m-K) | Viscosity at<br>Melting Temperature<br>10 <sup>-3</sup> poise | Melting<br>Temperature, ° F (K) |
|------------------------|--|---|---------------------------------|
| Iron                   | 91.7 (53)  | 2.200   | 2,798 (1,810)                   |
| Low-carbon steel       | 51.9 (30)  | 6.100   | 2,798 (1,810)                   |
| Stainless steel        | 29.4 (17)  |   | 2,896 (1,864)                   |
| Aluminum 6009, 6010 T4 | 259.7–289.1 (150–167)  | 4.500   | 1,112 (873)                     |
| Aluminum 6101, 7075 T6 | 377.4 (218)  | 4.500   | 1,112 (873)                     |
| Aluminum 5052, 5662    | 238.9 (138)  | 4.500   | 1,112 (873)                     |
| Aluminum 5456, 5083    | 202.5 (117)  | 4.500   | 1,112 (873)                     |
| Oxygen-free copper     | 640.5 (370)  | 3.360   | 1,981 (1,356)                   |
| Brass                  | 209.5 (121)  | 3.420   | 1,688 (1,193)                   |
| Inconel®               | 29.4 (17)  |   | 2,741 (1,778)                   |
| Titanium               | 190.4 (110)  |   | 3,038 (1,943)                   |
| Chromium               | 45.0 (26)  | 0.684   | 3,407 (2,148)                   |
| Nickel                 | 162.7 (94)   |   | 2,647 (1,726)                   |
| Zinc                   | 199.1 (115)  | 3.930   | 786 (692)                       |

**Πίνακας 5-2:** Σύγκριση των θερμικών ιδιοτήτων και της θερμικής ενέργειας που απαιτείται για την τήξη ή την εξάτμιση ενός όγκου μετάλλου

| Property  | Steel                        | Aluminum                      | Titanium                     |
|---|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Density, $\rho$ , lb/ft <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )               | 491 (7,858)                  | 169 (2,700)                   | 282 (4,510)                  |
| Fusion temperature, $T_f$ (° F [K])                                     | 2,786 (1,803)                | 1,220 (933)                   | 3,034 (1,941)                |
| Vaporization temperature, $T_v$ (° F [K])                               | 5,432 (3,273)                | 3,734 (2,330)                 | 5,900 (3,533)                |
| Latent heat of fusion, $L_f$ , Btu/lbm (J/kg)                           | 64 (2.67 10 <sup>5</sup> )   | 95 (3.97 10 <sup>5</sup> )    | 104 (4.35 10 <sup>5</sup> )  |
| Latent heat of vaporization, $L_v$ , Btu/lbm (J/kg)                     | 1,505 (6.3 10 <sup>6</sup> ) | 2,723 (11.4 10 <sup>6</sup> ) | 1,194 (5.0 10 <sup>6</sup> ) |
| Specific heat for solid metal, $C_p$ , Btu/(lb × °F) (J/[kg × K])       | 0.11 (460)                   | 0.23 (961)                    | 0.12 (519)                   |
| Specific heat for molten metal, $C_p$ , Btu/(lb × °F) (J/[kg × K])      | 0.15 (627)                   | 0.26 (1,087)                  | 0.16 (650)                   |
| Heat energy to melt kerf volume ( $w \times l \times t$ ), Btu (J)      | 0.002 (1.88)                 | 0.0006 (0.68)                 | 0.001 (1.45)                 |
| Heat energy to vaporize kerf volume, ( $w \times l \times t$ ), Btu (J) | 0.004 (4.34)                 | 0.002 (2.15)                  | 0.003 (2.74)                 |

\* Volume = ( $w \times l \times t$ )  
 where:  
 kerf zone width,  $w$  = 0.010 in. (0.25 mm)  
 length,  $l$  = 0.4 in. (1 mm)  
 thickness,  $t$  = 0.4 in. (1 mm)

### 5.3.1 Οξείδωση

Όταν επεξεργαζόμαστε θερμικά ένα μέταλλο, η χημική αντιδραστικότητά του με τα αέρια του περιβάλλοντος χώρου αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Τα περισσότερα μέταλλα αντιδρούν εξώθερμα με το οξυγόνο που υπάρχει στον αέρα. Για να αποφευχθεί η οξείδωση, η κοπή με laser μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια κάποιου μη αντιδραστικού βοηθητικού αερίου, συμπεριλαμβανομένων των αδρανών αερίων όπως το αργό. Σε μικρότερο βαθμό, αλλά με σημαντικά χαμηλότερο κόστος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το άζωτο. Η οξείδωση μπορεί να ευνοήσει τη διαδικασία κοπής. Ωστόσο έχει αρνητικές συνέπειες για το τελείωμα των άκρων και τις ιδιότητες του.

### 5.3.2 Λίπανση

Είναι συνηθισμένο στη βιομηχανία κατασκευής μετάλλων να τοποθετείται ένα λεπτό φιλμ λιπαντικού ελαίου γύρω από τα μεταλλικά φύλλα και τις μεταλλικές πλάκες. Το έλαιο αυτό στοχεύει στην προστασία του φύλλου ή της πλάκας από τη διάβρωση κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Οι συμβατικές κατεργασίες ευνοούνται από την ύπαρξη του φιλμ καθώς μειώνεται η τριβή μεταξύ του μετάλλου και του υλικού της μήτρας. Οι κατεργασίες με laser σπάνια επηρεάζονται από το έλαιο καθώς το έλαιο εξατμίζεται γρήγορα γύρω από το ίχνος κοπής προτού το μέταλλο αρχίσει να τήκεται.

Η λίπανση μπορεί να έχει καταστροφική επίδραση στην παραγωγικότητα, αν το σύστημα χειρισμού και τοποθέτησης των τεμαχίων δεν είναι κατασκευασμένο για γλιστερά τεμάχια. Το έλαιο μπορεί να κάνει τα μεταλλικά φύλλα να κολλήσουν μεταξύ τους, πράγμα το οποίο μπορεί να προκαλέσει διακοπή της παραγωγικής διαδικασίας.

### 5.3.3 Επένδυση

Η επένδυση με βάση τον ψευδάργυρο είναι πολύ συνηθισμένη στους χάλυβες ώστε να βελτιωθεί η αντίστασή τους στη διάβρωση, μέσω της εκμετάλλευσης της καθοδικής δράσης του ψευδαργύρου όταν έρχεται σε επαφή με το χάλυβα. Μερικοί χάλυβες μπορεί να επενδυθούν με αλουμίνιο.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι επενδύσεις έχουν θερμοκρασία τήξης ή και ατμοποίησης πολύ κάτω από εκείνη του βασικού μετάλλου. Η θερμοκρασία βρασμού του ψευδάργυρου είναι 900 K ενώ ο χάλυβας τήκεται στους 1800 K. Εξαιτίας αυτού, η επένδυση από ψευδάργυρο αναμένεται θεωρητικά να έχει μικρή επίδραση στην απόδοση της κοπής με laser. Στην πράξη βέβαια οι ατμοί του ψευδάργυρου μειώνουν την απόδοσης της κατεργασίας οδηγώντας σε χαμηλότερη ταχύτητα κοπής.

Επίσης η δημιουργία σκουριάς μπορεί να αποφευχθεί σημαντικά όταν τα μέταλλα έχουν επένδυση μεγάλου πάχους.

Ο ατμός που προκύπτει από την καύση της επένδυσης μπορεί να είναι τοξικός και πρέπει να φιλτράρεται, να συλλέγεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις για την προστασία των χειριστών και του περιβάλλοντος.

#### **5.3.4 Δυνατότητα σόρευσης**

Τα μεταλλικά φύλλα και οι μεταλλικές πλάκες μπορούν να τοποθετηθούν το ένα πάνω στο άλλο και στη συνέχεια εύκολα, π.χ. με ένα μαγνητικό άκρο τοποθετημένο σε ένα ρομποτικό βραχίονα, να απομονωθεί κάποιο από αυτά. Ειδικά στην περίπτωση του αλουμινίου, η σκουριά που έχει συσσωρευτεί κάτω από το βάρος των άλλων τεμαχίων και με την παρουσία υγρασίας, μπορεί να προκαλέσει ψυχρή χύτευση στο από κάτω τεμάχιο.

Υλικά όπως ο μαλακός χάλυβας, ο οποίος παρουσιάζει μαγνητικές ιδιότητες, μπορούν ευκολότερα να απομονωθούν με χρήση της ιδιότητάς τους αυτής.

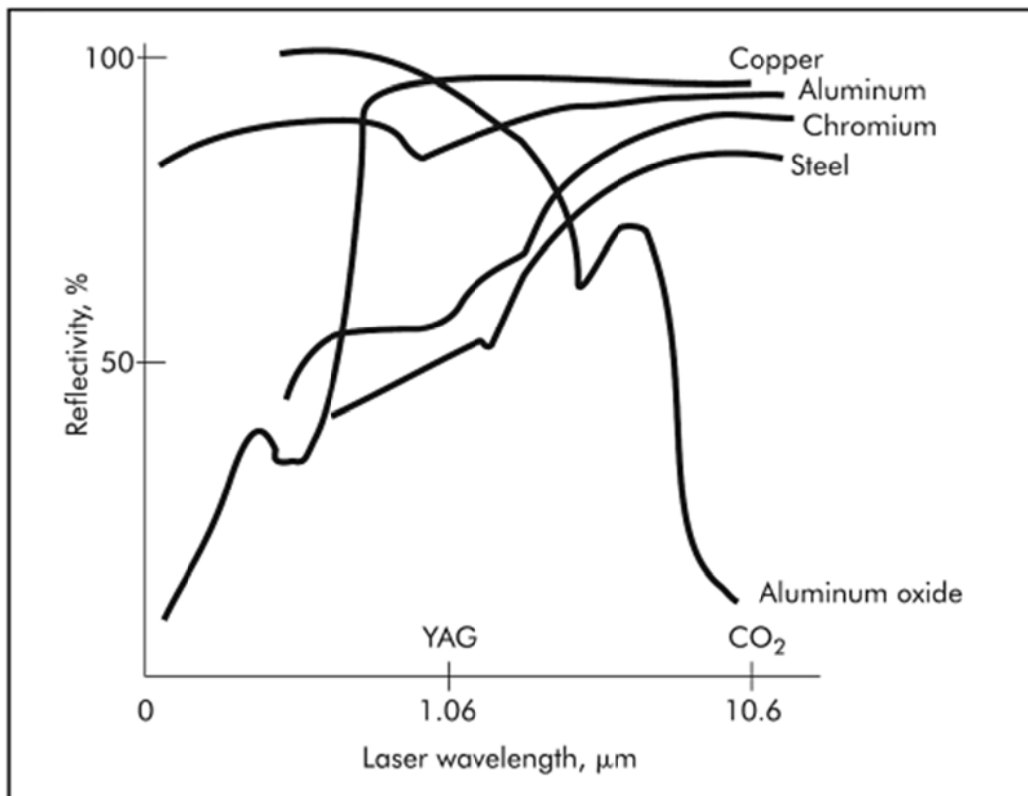
#### **5.3.5 Αποθήκευση**

Η πλειονότητα των αποθηκευτικών χώρων δεν είναι κλιματιζόμενοι, με αποτέλεσμα τα μέταλλα να υφίστανται την «επίθεση» διαφόρων στοιχείων, όπως η σκόνη, το νέφος και η υγρασία. Επηρεάζουν την επιφάνεια των μετάλλων, πράγμα το οποίο μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην κατεργασία κοπής. Η ακεραιότητα όλων των μεταλλικών φύλλων ή πλακών σε μια παλέτα μπορεί να διασφαλιστεί με την περιτύλιξη της παλέτας με χαρτί για την αποθήκευση και τη μεταφορά.

#### **5.3.6 Οπτικές ιδιότητες**

Τα περισσότερα μέταλλα αντανακλούν το υπέρυθρο φως σε ποσοστό 80% σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου. Το υπόλοιπο 20% απορροφάται από το μέταλλο και στο μεγαλύτερο μέρος του μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία ξεκινά την τήξη. Εκτός ορισμένων εξαιρέσεων, όπως το οξείδιο του αλουμινίου, η ανακλαστικότητα αυξάνεται με την αύξηση του μήκους κύματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-2.





**Εικόνα 5-2:** Μεταβολή της επιφανειακής ανακλαστικότητας των μετάλλων συναρτήσει του μήκους κύματος ης δέσμης laser σε θερμοκρασία δωματίου

Η ανακλαστικότητα ενός μετάλλου μπορεί να μεταβληθεί μέσω της επένδυσης της επιφάνειάς του. Το οξείδιο αλουμινίου αποτελεί φυσική επένδυση του φύλλου αλουμινίου ως αυτοπροστασία απέναντι στη διάβρωση. Είναι υψηλά ανακλαστικό στο μήκος κύματος ενός YAG laser. Όμως κατά τη διαδικασία κοπής με laser το οξείδιο αλουμινίου γρήγορα εξατμίζεται και η ανακλαστικότητά του αλουμινίου γίνεται ο κυρίαρχος παράγοντας. [12]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Κύρια είδη και εφαρμογές των laser

### 6.1 Κυριότερα είδη laser

Υπάρχουν διάφορα είδη laser που χρησιμοποιούν πληθώρα υλικών και το καθένα αποσκοπεί σε διαφορετικά αποτελέσματα. Το υλικό αυτό μπορεί να είναι οποιασδήποτε φυσικής κατάστασης: αέριο, υγρό, στερεό ή πλάσμα. Έτσι τα πιο γνωστά είδη laser είναι:

1. Laser He-Ne
2. Laser Ιόντων Αργού
3. Χημικά laser
4. Laser Χρωστικής
5. Laser κρυστάλλων (πχ, κρυστάλλων σαπφείρου με προσμίξεις ιόντων τιτανίου)
6. Laser διοξειδίου του άνθρακα
7. Laser νεοδυμίου με προσμίξεις υτρίου-αλουμινίου γρανάτη (YAG)
8. Laser ημιαγωγών.

Θα αναφέρουμε ενδεικτικά κάποιες πληροφορίες για ορισμένα από τα ανωτέρω είδη, ενώ στη συνέχεια θα αναλυθούν εκτενέστερα τα laser διοξειδίου του άνθρακα και τα laser Nd:YAG.

Τα laser He-Ne μπορούν να λειτουργήσουν σε πολλά διαφορετικά μήκη κύματος, όμως η συντριπτική πλειοψηφία λειτουργεί στα 633 nm. Έχουν σχετικά μικρό κόστος και μεγάλη συνεκτικότητα. Τα laser διοξειδίου του άνθρακα μπορούν να έχουν πολύ μεγάλη ισχύ και χρησιμοποιούνται για εμπορικούς σκοπούς. Η εκπομπή τους είναι στα 10,6 μm, στην υπέρυθρη περιοχή. Τα laser αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως η κοπή και η συγκόλληση. Η απόδοση ενός laser διοξειδίου του άνθρακα είναι ασυνήθιστα υψηλή: πάνω από 10%. Τα laser χρωστικής χρησιμοποιούν μια οργανική χρωστική ως ενεργό μέσο. Τα laser αυτά είναι συντονίσιμα και μπορούν να παράξουν παλμούς πολύ μικρής διάρκειας (της τάξης του femtosecond).

Χρησιμοποιούνται διάφορα laser στην επεξεργασία των υλικών, όπως η κοπή και η διάτρηση, η συγκόλληση και η επιφανειακή επεξεργασία κ.λ.π. Τα laser CO<sub>2</sub> και Nd:YAG χρησιμοποιούνται κυρίως στη βιομηχανία, και αναλύονται εκτενέστερα στη συνέχεια.

#### Laser CO<sub>2</sub>

Τα laser CO<sub>2</sub> χρησιμοποιούνται τόσο σε κοπή μη μεταλλικών υλικών σε επίπεδα ισχύος μερικών εκατοντάδων W, όσο και σε κοπή μεταλλικών υλικών

σε επίπεδα ισχύος του 1kW, σε συγκόλληση με περισσότερα από 3 kW, και σε επιφανειακή επεξεργασία μετάλλων σε πάνω από 5 kW. Η κοπή χαλύβδινων πλακών είναι η μεγαλύτερη αγορά του CO<sub>2</sub> laser. Τα CO<sub>2</sub> laser και η εφαρμογή τους στην κοπή μεταλλικών πλακών φαίνεται να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του χρήστη. Ωστόσο, τα CO<sub>2</sub> laser συνεχώς βελτιώνονται έτσι ώστε να μπορούν να εφαρμοσθούν και σε πιο αποτελεσματικές και ακριβέστερες κατεργασίες υλικών. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού είναι ουσιώδες να κατασκευαστούν laser υψηλής ισχύος, laser υψηλής ποιότητας δέσμης με πολύ ακριβή έλεγχο.

**Πίνακας 6-1:** Σύγκριση διαφόρων τύπων laser αερίου

| Laser Type      | Linear Power Density<br>W/m | Maximum<br>Power<br>W | Power<br>Efficiency<br>percent |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| He-Ne           | 0.1                         | 1                     | 0.1                            |
| Argon           | 1-10                        | 50                    | 0.1                            |
| CO <sub>2</sub> | 60-80                       | 1200                  | 15-20                          |

Ανάμεσα σε πολλές εφαρμογές του CO<sub>2</sub> laser, η κοπή μεταλλικών πλακών είναι η μεγαλύτερη αγορά του. Το laser υψηλής ποιότητας χρησιμοποιείται κυρίως στην κοπή ακριβείας μεταλλικών πλακών.

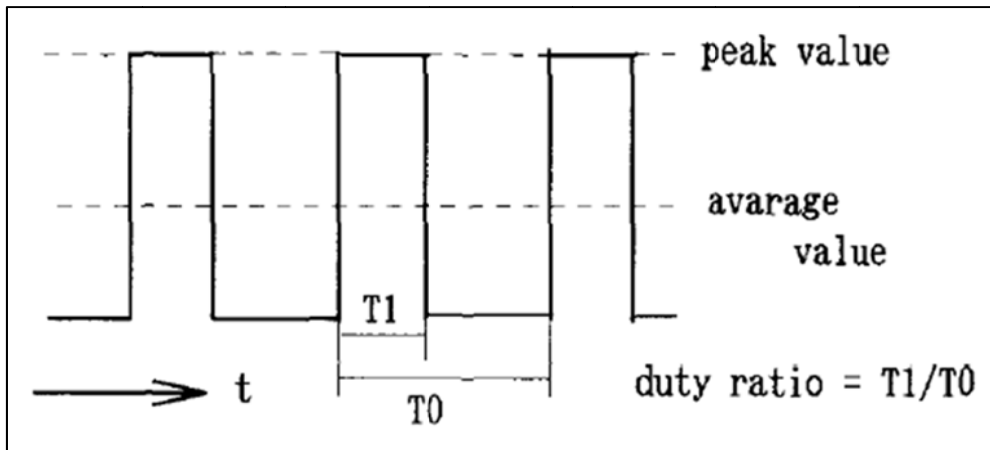
CO<sub>2</sub> laser ταλαντωτής για κοπή ακριβείας

Το laser CO<sub>2</sub> συνεχούς κύματος που χρησιμοποιείται για την κοπή ακριβείας χαλύβδινης πλάκας πρέπει να έχει τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά:

- Ορθογωνική κυματοειδή μορφή παλμών εξόδου,
- Σταθερή ισχύ εξόδου,
- Σταθερή λειτουργία δέσμης και κατάλληλη επιλογή του τρόπου λειτουργίας της.

Ορθογωνική κυματοειδής μορφή παλμών εξόδου

Η ορθογωνική μορφή του παλμού εξόδου με μεγάλες αιχμές είναι ιδανική για την κοπή μεταλλικών πλακών. Ο παλμός μεγάλης ισχύος μπορεί να κόψει μεταλλική πλάκα μεγάλου πάχους, χωρίς να δημιουργηθεί σκουριά.



Εικόνα 6-1: Ορθογωνική κυματομορφή παλμού εξόδου μεγάλης αιχμής

Στην Εικόνα 6-1 φαίνεται η κυματομορφή του παλμού εξόδου μεγάλης αιχμής. Η τιμή αιχμής της ισχύος του laser σχετίζεται με το πάχος της πλάκας που μπορεί να υποστεί κατεργασία ακριβείας και η μέση τιμή της ισχύος του laser με την ταχύτητα κοπής. Ο ορθογωνικός παλμός ελέγχει τη μέση τιμή και την τιμή αιχμής ανεξάρτητα, μεταβάλλοντας το συντελεστή χρησιμοποίησης (duty ratio), ώστε να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες κοπής χωρίς τη δημιουργία σκουριάς και τη δημιουργία «καψίματος» στα σημεία κοπής, σύμφωνα με το πάχος της πλάκας και την ταχύτητα κοπής. Η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη που δημιουργείται είναι μικρή, ακόμα και στα αιχμηρά άκρα και τα σημεία κοπής.

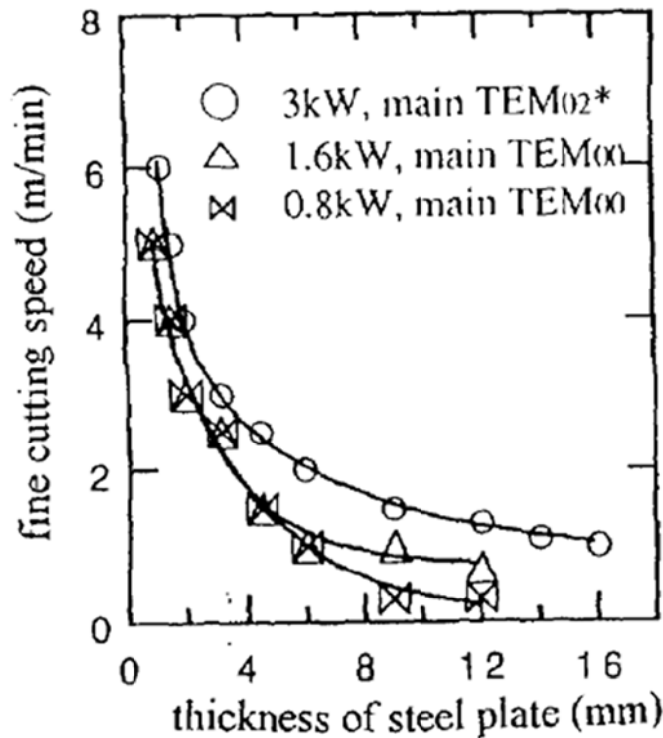
#### Σταθερή ισχύς εξόδου

Ο ακριβής έλεγχος της ισχύος εξόδου είναι σημαντικός για την αξιοπιστία και την ποιότητα της κοπής μεταλλικών πλακών. Η χαμηλή διακύμανση της ισχύος εξόδου, επιτρέπει πιο ομοιόμορφο πλάτος κοπής και πιο ομαλή επιφάνεια κοπής.

#### Σταθερή λειτουργία δέσμης και κατάλληλη επιλογή του τρόπου λειτουργίας

Η ύπαρξη μιας συνεκτικής δέσμης είναι πολύ σημαντική για την αξιοπιστία και την ποιότητα της κοπής, γιατί η μεταβολή της κατάστασης της δέσμης έχει ως συνέπεια την αλλαγή του σημείου εστίασης και τη μείωση της ικανότητας κοπής.

Μια συσχέτιση μεταξύ του πάχους της μεταλλικής πλάκας και της ταχύτητας κοπής για laser διαφόρων ισχύων φαίνεται στην Εικόνα 6-2.



Εικόνα 6-2: Συσχέτιση του πάχους της πλάκας με την ταχύτητα κοπής

### Laser Nd: YAG

Τα Laser Nd: YAG εκπέμπουν δέσμη μήκους κύματος 1,06 μm, το οποίο ισούται με το 1/10 του μήκους κύματος της δέσμης laser CO<sub>2</sub> και συγκεντρώνεται σε ένα κύκλο διαμέτρου 0,01mm, στην περίπτωση της δέσμης που υφίσταται περίθλαση. Βέβαια μόνο τα laser χαμηλής ισχύος (λιγότερο από 10 W) μπορούν να δημιουργήσουν τέτοια δέσμη. Μια οπτική παραμόρφωση στη ράβδο του laser υποβιβάζει την ποιότητα λειτουργίας της δέσμης και διευρύνει την εστιασμένη δέσμη.

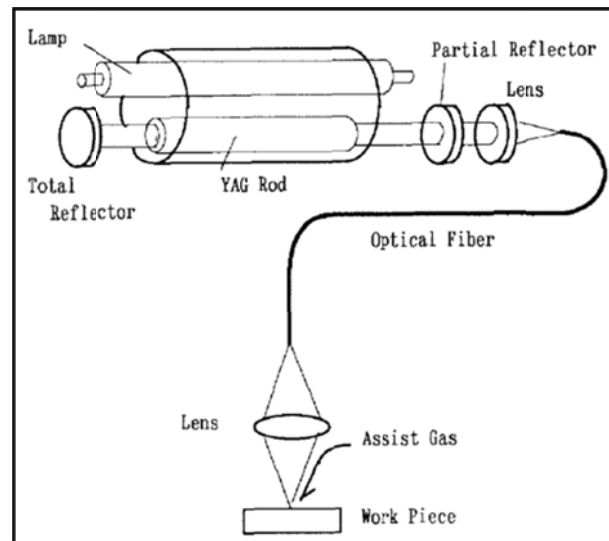
Μια αξιοσημείωτη βελτίωση του Nd: YAG laser βρίσκεται σε πρόοδο. Η χαμηλή εστίαση της δέσμης, το αδύνατο σημείο του Nd: YAG laser υψηλής ισχύος, τείνει να ξεπεραστεί με νέες τεχνικές. Το Nd: YAG laser παρέχει τη δυνατότητα για τη δημιουργία μιας δέσμης καλής ποιότητας με καλή εστίαση σε κάθε επίπεδο ισχύος εξόδου.

Η ανάπτυξη του Nd: YAG laser σε επίπεδο ισχύος πάνω από 100 W, και με την ίδια δυνατότητα εστίασης όπως το CO<sub>2</sub> laser δίνει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί το Nd: YAG laser στην ίδια περιοχή που βρίσκει εφαρμογή το laser CO<sub>2</sub>. Το laser Nd: YAG είναι πιο εύκολο να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία, επειδή η δέσμη 1,06 μm μπορεί να μεταδοθεί από την οπτική ίνα χωρίς απώλεια ισχύος και υποβάθμιση της ποιότητας εστίασης της δέσμης. Η

βιομηχανική χρήση του Nd: YAG θα διευρύνεται, όσο αυξάνεται η ισχύς εξόδου.

Συμβατικά Laser Nd: YAG

Στο σχήμα απεικονίζεται η διαμόρφωση ενός Laser Nd: YAG και το σύστημα επεξεργασίας.



Εικόνα 6-3: Διαμόρφωση ενός Laser Nd: YAG και του συστήματος επεξεργασίας

Μπορούμε στο σημείο αυτό να κάνουμε μια σύγκριση μεταξύ των laser Nd: YAG και των laser CO<sub>2</sub>.

Τα laser CO<sub>2</sub> έχουν μήκος κύματος 10 μm στην υπέρυθρη περιοχή. Τα βασικά τους πλεονεκτήματα είναι:

- Η υψηλή μέση ισχύς της δέσμης
- Η καλύτερη απόδοση
- Η καλή ποιότητα δέσμης
- Η κοπή ακριβείας μεταλλικών φύλλων με μεγάλη ταχύτητα

Τα δυνατά σημεία των laser Nd: YAG είναι:

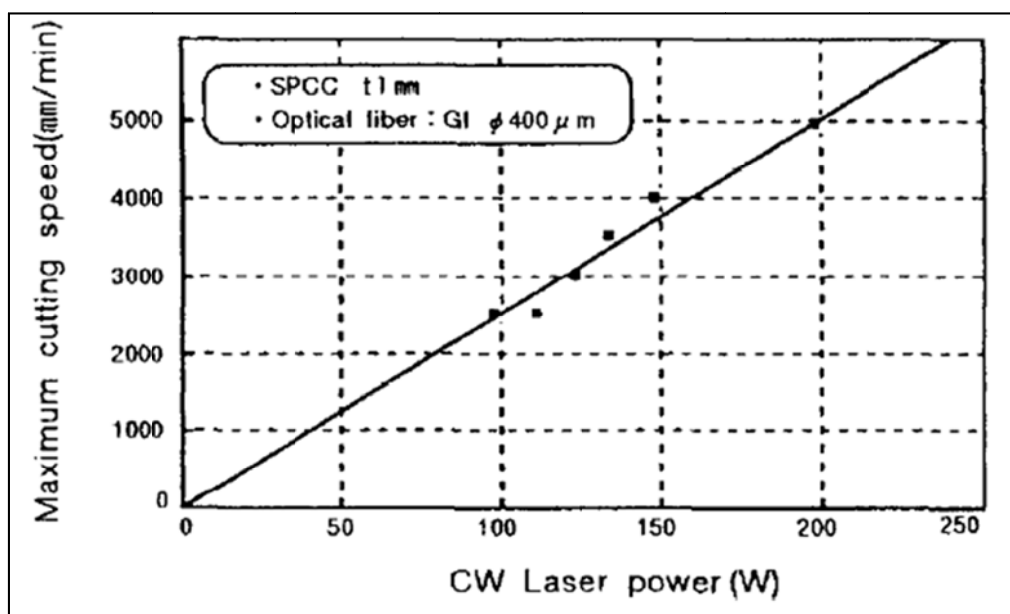
- Ο στιβαρός και σταθερός ταλαντωτής
- Η διακίνηση της δέσμης μέσω οπτικών ινών
- Η απορρόφηση από υλικά υψηλής ανακλαστικότητας που κατεργάζονται δύσκολα με laser CO<sub>2</sub>
- Κατεργασία υλικών μεγαλύτερου πάχους με παλμική λειτουργία.

Τα αδύνατά τους σημεία είναι:

- Χαμηλή ισχύς εξόδου της δέσμης
- Κακή εστίαση
- Υψηλή κατανάλωση ενέργειας

Το σημαντικότερο μειονέκτημα από αυτά είναι η κακή εστίαση. Αν αυτό ξεπεραστεί, θα βρουν πιο ευρεία εφαρμογή στους τομείς της κοπής ακριβείας και της συγκόλλησης σε σχέση με τα laser CO<sub>2</sub>.

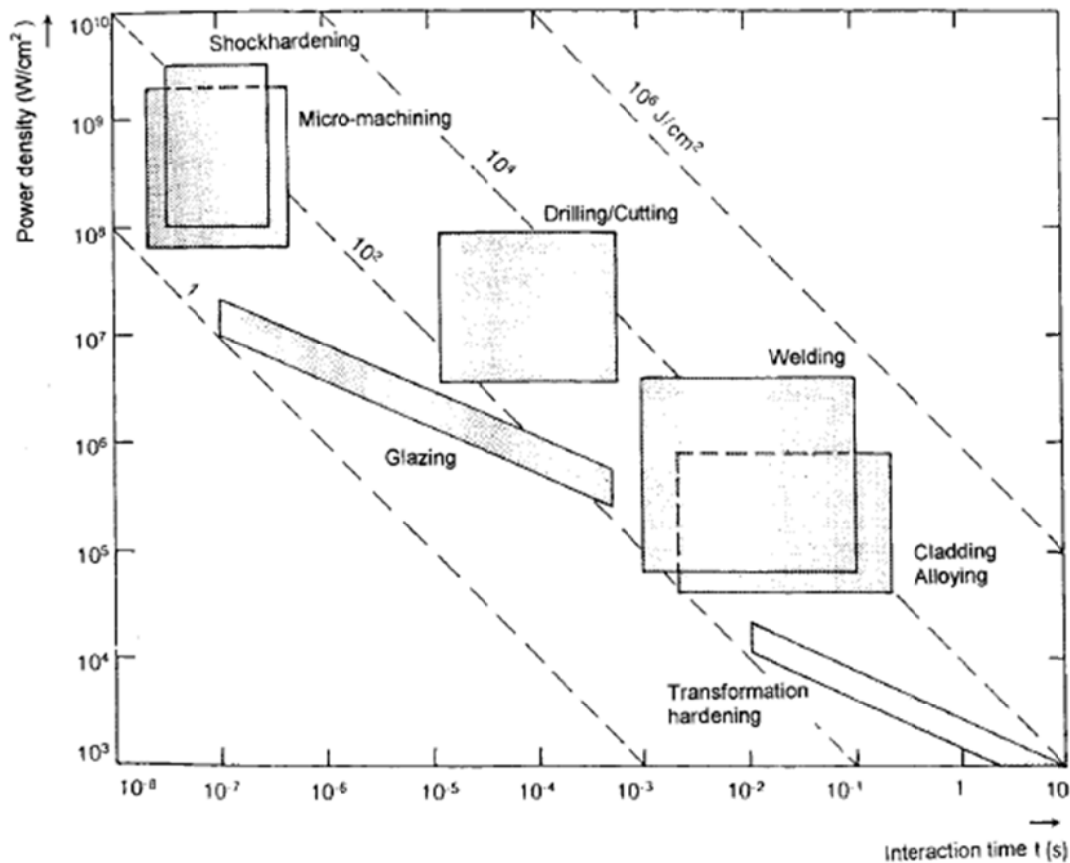
Στο σχήμα φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ της ισχύος εξόδου του laser και της μέγιστης ταχύτητας κοπής για πλάκα μαλακού χάλυβα. Η υψηλή ισχύς των 200W μας επιτρέπει να έχουμε μεγάλη ταχύτητα κοπής 5 m/s για πλάκα πάχους 1mm. Η στιλπνότητα της επιφάνειας είναι σχεδόν ίδια με την κοπή με laser CO<sub>2</sub>. [13] [14] [15]



Εικόνα 6-4: Συσχέτιση της ισχύος εξόδου του laser και της μέγιστης ταχύτητας κοπής για πλάκα μαλακού χάλυβα

## 6.2 Εφαρμογές των laser

Μια εποπτική απεικόνιση των εφαρμογών των laser φαίνεται στην Εικόνα 6-5. Στο διάγραμμα αυτό η απορροφούμενη πυκνότητα ισχύος  $I$  συσχετίζεται με το χρόνο στον οποίο η ακτίνα laser είναι σε επαφή με το υλικό.



Εικόνα 6-5: Περιοχές εφαρμογών κατεργασιών συναρτήσει πυκνότητας ισχύος και χρόνου επαφής laser και υλικού

Η μικροκατεργασία με laser περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος κατεργασιών αποβολής υλικού, αλλά και μικροκατεργασίες, όπως η μικροσύνδεση (microjoining) και η μικροδιαμόρφωση (microadjustment). Οι περισσότερες εφαρμογές ανήκουν στο τομέα της ηλεκτρονικής. Οι πρώτες εφαρμογές της κοπής με laser εμφανίστηκαν τη δεκαετία του 60 στη διάτρηση του διαμαντιού. Το 1970 χρησιμοποιήθηκε η συγκόλληση με laser στην παραγωγή τμημάτων για την οθόνη της τηλεόρασης. Τη δεκαετία του 80 εφαρμόστηκαν τα excimer lasers στο φρεζάρισμα και την αποβολή υλικού, ενώ το 1990 αναπτύχθηκε η μικροδιαμόρφωση για εφαρμογή σε βιομηχανικό επίπεδο.

Τα laser που χρησιμοποιούνται στις μικροκατεργασίες χαρακτηρίζονται γενικά από μικρή διάρκεια παλμού, στην περιοχή των millisecond για εφαρμογές όπως η συγκόλληση και των picosecond ή femtosecond, για εφαρμογές αποβολής υλικού. [16]

Για την κατεργασία μετάλλων χρησιμοποιείται τόσο το συνεχές, όσο και το παλμικό laser. Υπάρχουν όμως και άλλες δύο παραλλαγές της μεθόδου. Στη μια περίπτωση η ακτίνα laser συνοδεύεται από ρεύμα οξυγόνου για να οξειδώσει το υλικό που υπόκειται σε κατεργασία. Το laser λειτουργεί ως πηγή



θερμότητας που θερμαίνει το υλικό, και το ρεύμα οξυγόνου οξειδώνει και έτσι αφαιρεί το υλικό. Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται αδρανές αέριο αντί του οξυγόνου, οπότε το laser λιώνει το μέταλλο και το αέριο το απομακρύνει από τη θέση κατεργασίας. Η πρώτη εκδοχή επιτυγχάνει υψηλότερες ταχύτητες κατεργασίας, η δεύτερη καλύτερη ποιότητα επιφάνειας και ακρίβεια διαστάσεων.

Η κατεργασία με laser χρησιμοποιείται μεταξύ των άλλων στη βιομηχανία κατασκευής κινητήρων αεροσκαφών. Σε ορισμένα σημεία μερών της τουρμπίνας πρέπει να διατηρηθούν 30.000 οπές με διάμετρο 1,5 mm. Η κατεργασία αυτή με συμβατικά μέσα είναι αδύνατη λόγω της μικρής διάστασης και της υψηλής σκληρότητας των συγκεκριμένων υλικών. Στην περίπτωση αυτή η κατεργασία με laser δίνει μια πρακτική λύση, εκεί που οι συμβατικές κατεργασίες αδυνατούν να δώσουν κάποια λύση.

Μια άλλη πολύ διαδεδομένη χρήση του laser είναι και η χρήση για τη συγκόλληση μετάλλων, γιατί έχει το μεγάλο πλεονέκτημα να μην προκαλεί θερμικές παραμορφώσεις των συγκολλώμενων μερών. Οι πρώτοι βιομηχανικοί κλάδοι που τη χρησιμοποίησαν ήταν η αεροδιαστημική και η αυτοκινητοβιομηχανία, γιατί είχαν τη δυνατότητα να αναλάβουν το υψηλό κόστος της επένδυσης και να το ενσωματώσουν σχετικά εύκολα στην τιμή του προϊόντος. Όμως, οι μεγάλες ταχύτητες συγκόλλησης, η ακρίβεια και η ευελιξία της μεθόδου γρήγορα απέδειξαν την αξία της και για πολλούς άλλους κλάδους της βιομηχανίας, που το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης αντισταθμίζεται από τα οφέλη της μεθόδου.

### **6.2.1 Μικροδιάτρηση με laser**

Η διάνοιξη μικρών οπών με laser είναι μια ευρεία εφαρμογή. Οι οπές διανοίγονται σε σκληρά υλικά, όπως μέταλλα, κεραμικά ή διαμάντι, σε πιο μαλακά υλικά που χρησιμοποιούνται στη μικροηλεκτρονική ή σε ιατρικές εφαρμογές, καθώς επίσης σε πλαστικά για αερισμό. Χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές τεχνικές: άμεση εστίαση της δέσμης στην επιθυμητή (μικρή) διάμετρο της οπής και εναλλακτικά απεικονίζοντας μια μάσκα.

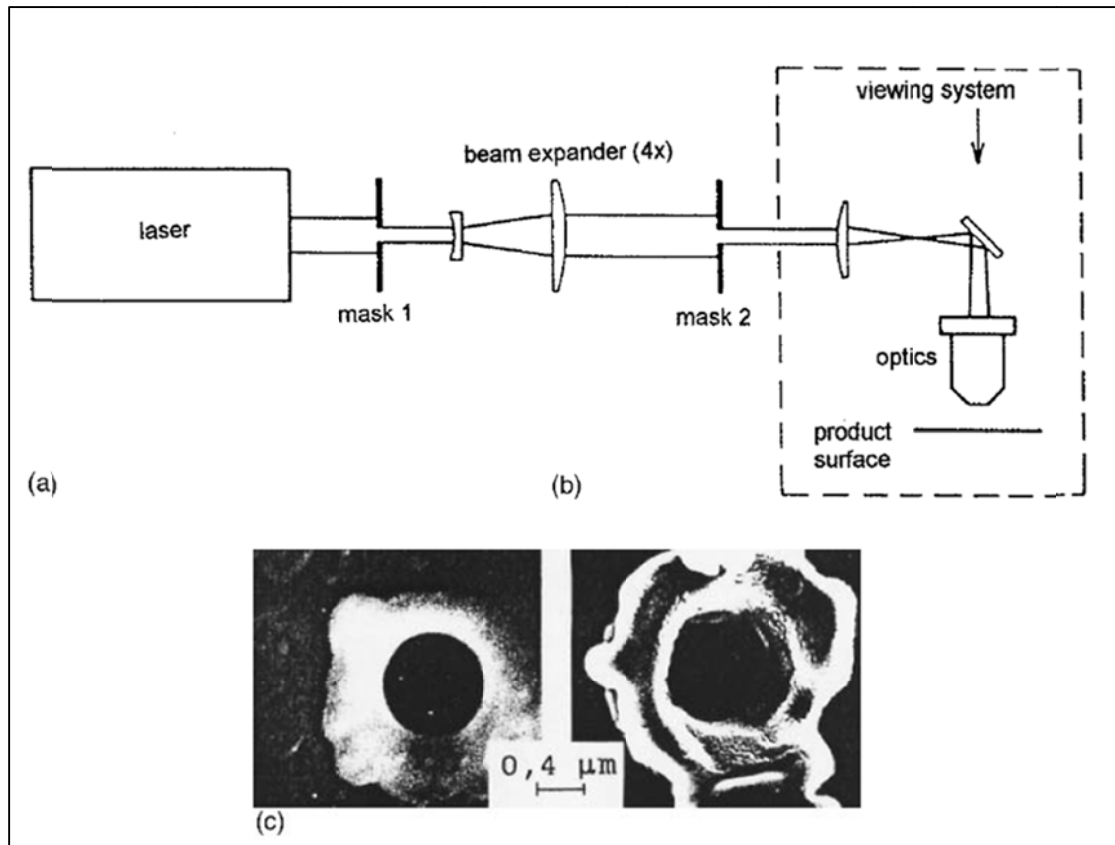
Η άμεση εστίαση είναι η πιο απλή διαδικασία, καθώς απαιτείται απλώς ένας φακός. Το μήκος εστίασης επιλέγεται, έτσι ώστε η διάμετρος εστίασης να αντιστοιχεί στην απαιτούμενη διάμετρο της οπής. Η συνθήκη αυτή απαιτεί μια καλά ορισμένη και σταθερή ακτίνα, καθώς η ποιότητα της δέσμης  $M^2$  επηρεάζει άμεσα τη διάμετρο εστίασης και τη διάμετρο της οπής. Η πυκνότητα ενέργειας του laser πρέπει να συμφωνεί με το αντίστοιχο ποσό, δηλαδή  $1 \text{ J/cm}^2$  για πλαστικά μέχρι  $10 \text{ J/cm}^2$  για μέταλλα. Η ενέργεια του laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά, αν χρησιμοποιήσουμε μια συστοιχία

μικροφακών, ώστε να παραχθούν ταυτόχρονα δεκάδες ή εκατοντάδες οπές. Στην άμεση εστίαση χρησιμοποιούνται αρκετά είδη laser. Τα laser CO<sub>2</sub> χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη μεγάλου αριθμού οπών σε λεπτά υλικά (ο ρυθμός παραγωγής είναι πάνω από 10000 οπές ανά δευτερόλεπτο). Τα laser Nd:YAG χρησιμοποιούνται για διάτρηση μεγάλης ακρίβειας σε σκληρά υλικά, όπως μέταλλα και διαμάντι, ενώ τα laser διηγεμένου διατομικού μορίου χρησιμοποιούνται συνήθως σε σύνθετα υλικά και κεραμικά.

Η διάτρηση οπών με laser μεγάλης ισχύος, όπως για παράδειγμα στα πτερύγια των στροβίλων, είναι μία από τις πιο σπουδαίες εφαρμογές. Ενδεικτικό παράδειγμα είναι η ζυγοστάθμιση ρότορα. Οι διαδοχικές διατρήσεις γίνονται κατά την περιστροφή του ρότορα με μεγάλη ταχύτητα. Η ενεργοποίηση του laser γίνεται από H/Y, ο οποίος δέχεται και επεξεργάζεται κατάλληλα τα σήματα από τους αισθητήρες ζυγοστάθμισης. Με αυτό τον τρόπο αφαιρείται κάθε φορά και από διαφορετικό σημείο του ρότορα, μια μικρή ποσότητα υλικού, ώστε να επιτυγχάνεται η ζυγοστάθμισή του.

Μια ειδική εφαρμογή των μικροκατεργασιών είναι σε μεγάλη κλίμακα είναι η διάνοιξη οπών για αναρρόφηση αέρα στα πτερύγια των αεροπλάνων, που χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από την British Aerospace. Οπές διαμέτρου 20-80 μm διανοίγονται σε αλουμίνιο με laser διηγεμένου διατομικού μορίου ισχύος 1kW με παλμούς διάρκειας 200 ns υψηλής ποιότητας  $M^2=1,5$ . Περίπου 100 οπές ανοίγονται ταυτόχρονα μέσω μιας συστοιχίας μικροφακών. Περίπου 20 παλμοί απαιτούνται για να διατρηθεί μια πλάκα αλουμινίου πάχους 1mm. Η διάμετρος των οπών ελέγχεται από την πυκνότητα ενέργειας. Οι οπές 20 μm απαιτούν 250 J/cm<sup>2</sup> και οπές 80 μm απαιτούν 80 J/cm<sup>2</sup>.

Η άλλη τεχνική, η μέθοδος προβολής μέσω μάσκας, προβάλλει τη δέσμη του laser μέσω μιας μάσκας στο υπόστρωμα. Με τη διαδικασία αυτή μπορούν να κατασκευαστούν σχήματα οπών, από απλές κυκλικές, τετραγωνικές ή ορθογωνικές μέχρι πιο πολύπλοκες διαμορφώσεις. Οι μάσκες παράγονται με κλίμακα 3 φορές τη γεωμετρία του προϊόντος για πλαστικά, μέχρι 10 φορές για μέταλλα. Οι μάσκες των οπών παράγονται με διάτρηση ή κοπή με laser από μεταλλικό φύλλο, ενώ οι μάσκες για πιο πολύπλοκες οπές παράγονται από μεταλλικές ταινίες ή χαλαζία.



**Εικόνα 6-6:** (α) Αποβολή υλικού μέσω προβολής μάσκας. Ένας συγκεντρωτικός φακός μπορεί να εφαρμοσθεί για να συγκεντρώσει την ακτίνα στο άνοιγμα του φακού επαφής, (β) εγκατάσταση μάσκας για διάτρηση μικρών οπών. Η μάσκα 1 επιλέγει το ομογενές μέρος της ακτίνας laser, η μάσκα 2 απεικονίζεται στο προϊόν, (γ) οπή, διαμέτρου 0.5 μm σε μολυβδένιο. Το υγρό που έχει αποβληθεί φαίνεται καθαρά στο μπροστινό τμήμα (δεξιά).

## 6.2.2 Κατεργασία του διαμαντιού με laser

Το διαμάντι είναι δύσκολο κατεργάσιμο καθώς είναι οπτικά διαπερατό από ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος. Σε υψηλές πυκνότητες ισχύος, όμως, το διαμάντι μετατρέπεται σε γραφίτη, ο οποίος απορροφά την ισχύ του laser και κατά συνέπεια αποβάλλεται. Η κατεργασία του διαμαντιού γίνεται πλέον με laser Nd:YAG παλμών διάρκειας microsecond και laser διηγεμένου διατομικού μορίου παλμών διάρκειας nanosecond.

Παραδείγματα εφαρμογών είναι η διάνοιξη οπών σε μήτρες συρματοποίησης ή κατασκευή κοπτικών λεπίδων για την οφθαλμοχειρουργική με τη βοήθεια μιας ειδικής κατηγορίας των laser Nd:YAG, τα Nd:YAG laser χρονοκαθυστερήσης (Q-switched). Τα laser χρονοκαθυστερήσης επιτρέπουν στο μέσο να απορροφήσει τη μέγιστη ενέργεια. Αυτού του είδους τα laser παράγουν παλμούς υψηλής ποιότητας 150 ns ενέργειας περίπου 1mJ σε συχνότητα από 1 ως 8 kHz. Μετά την κατεργασία παραμένουν λεπτά στρώματα γραφίτη ή άμορφου άνθρακα στην επιφάνεια και έτσι απαιτούνται πρόσθετες διαδικασίες καθαρισμού, ώστε να απομακρυνθεί ο γραφίτης. Μια νέα τεχνική που μπορεί

να εφαρμοσθεί είναι η χρήση υπερβραχέων παλμών laser διάρκειας femtosecond. Στην περίπτωση αυτή δεν βρέθηκε γραφίτης διότι το βάθος θερμικής διάχυσης είναι μόνο 50nm.



Εικόνα 6-7: Μήτρα χάραξης διαμαντιού

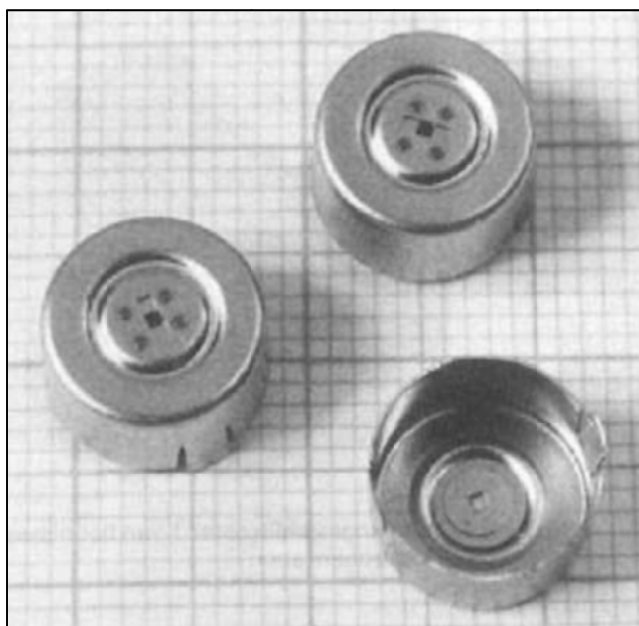
Ορισμένα στοιχεία για την κατεργασία του διαμαντιού ανάλογα με το είδος του laser που χρησιμοποιείται φαίνονται στον Πίνακα 6-2.

Πίνακας 6-2: Σύγκριση των laser για την κατεργασία του διαμαντιού

| Laser                              | Q-switched<br>Nd:YAG | Excimer laser           | Femtosecond<br>laser |
|------------------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| Wavelength                         | 1.06 $\mu\text{m}$   | 248 nm                  | 248 nm               |
| Pulse length                       | 150 ns               | 20 ns                   | 500 fs               |
| Diffusion depth                    | 30 $\mu\text{m}$     | 10 $\mu\text{m}$        | 50 nm                |
| Fluence ( $\text{J}/\text{cm}^2$ ) |                      | Removal rates per pulse |                      |
| 0.8                                |                      | 5 nm                    | 5 nm                 |
| 2                                  |                      | 10 nm                   | 15 nm                |
| 4                                  |                      | 20 nm                   | 35 nm                |
| 6                                  |                      | 30 nm                   | 50 nm                |
| 10                                 | 0.5 $\mu\text{m}$    | 45 nm                   |                      |
| 20                                 | 1.0 $\mu\text{m}$    | 60 nm                   |                      |
| 50                                 | 2.5 $\mu\text{m}$    |                         |                      |
| 150                                | 4.0 $\mu\text{m}$    |                         |                      |

### 6.2.3 Μικροσυγκόλληση με laser

Η μικροσυγκόλληση είναι η πιο ευρεία εφαρμογή. Μετά την ωρίμανση της κοπής με laser, εξελίχθηκε σε καθημερινή τεχνολογία. Για πολλά χρόνια επικρατούσε η άποψη, ότι μπορεί να συγκολληθεί μόνο ο ανοξείδωτος χάλυβας. Σήμερα βέβαια σχεδόν οποιοδήποτε υλικό μπορεί να υποστεί συγκόλληση με laser. Χρησιμοποιείται στη μαζική παραγωγή ηλεκτρονικών προϊόντων, όπως σετ τηλεοράσεων, λαμπτήρων χαλαζία και άλλων καταναλωτικών προϊόντων, όπου κατασκευάζεται μία μηχανή για λίγες μόνο συγκολλήσεις. Ένα παράδειγμα δίνεται στην Εικόνα 6-7. Σχεδόν όλες οι μικροσυγκολλήσεις γίνονται με παλμικό Nd:YAG laser .



Εικόνα 6-8: Συγκολλημένα με laser εξαρτήματα παραγωγής ηλεκτρονίων σε τηλεόραση

Οι συγκολλήσεις επί παραγγελία γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς στην κατασκευή αυτοκινήτων. Χρησιμοποιούνται για την πίεση των μεταλλικών εξαρτημάτων, όπως πόρτες, καπό του κινητήρα, αναρτήσεις κλπ.

Ένας νέος τομέας είναι η **συγκόλληση διαφορετικών υλικών** όπως χάλυβας και αλουμίνιο, πράγμα το οποίο φαινόταν απίθανο στην συμβατική συγκόλληση. Στην Εικόνα 6-8 φαίνεται μια συγκόλληση επικάλυψης μιας πλάκας χάλυβα σε αλουμίνιο. Για την επίτευξη καλής διαβρεξιμότητας, το υλικό πρέπει να είναι καθαρό από οξειδία πριν τη συγκόλληση και η θερμοκρασία και η ταχύτητα πρέπει να ελέγχονται ώστε να μειώνεται η διαμεταλλική επιφάνεια. Φαίνεται ότι το αλουμίνιο ρέει καλά πάνω στον χάλυβα. Οι συγκολλήσεις αυτές έχουν μεγάλο ενδιαφέρον για την ναυπηγική και διάφορες εφαρμογές αυτοματισμού.



Εικόνα 6-9: Συγκόλληση με laser χάλυβα (πάνω) σε αλουμίνιο

Η μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης στη συγκόλληση με laser και οι μικρές ανοχές απαιτούν μεγάλο βαθμό αυτοματισμού. Για αυτό το λόγο τα ρομπότ χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο.

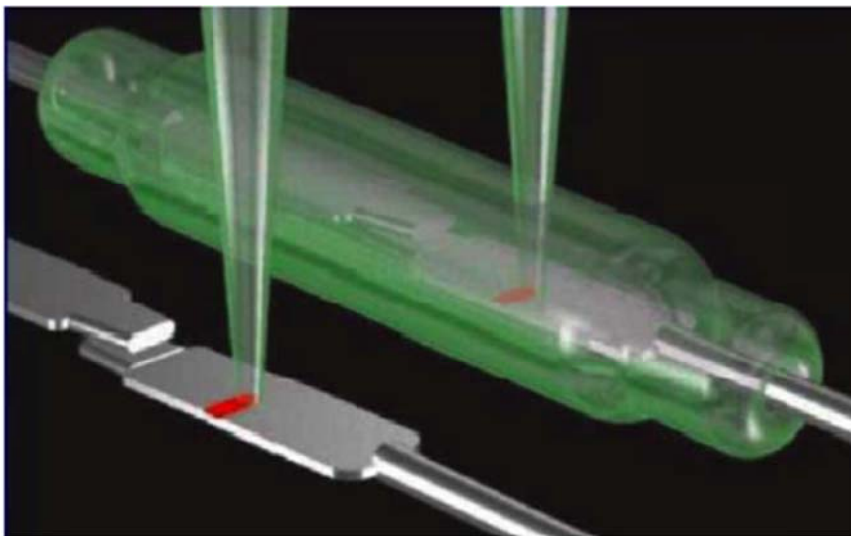


Εικόνα 6-10: Χρήση ρομπότ στη συγκόλληση με laser

#### 6.2.4 Μικροδιαμόρφωση με laser

Η βάση της μικροδιαμόρφωσης με laser είναι η παραγωγή θερμομηχανικών τάσεων στη μεταλλική δομή. Τα παλμικά laser εφαρμόζονται με επιτυχία στη συναρμολόγηση ηλεκτρομηχανολογικών τμημάτων. Η εφαρμογή αυτή ανοίγει νέους δρόμους στο σχεδιασμό επενεργητών. Τα παλμικά laser Nd:YAG καθώς και τα laser διηγευμένου διατομικού μορίου (excimer laser) χρησιμοποιούνται στην προσαρμογή διαφόρων υλικών, όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, τα κράματα αλουμινίου και υλικά που περιέχουν μόλυβδο. Μια εφαρμογή είναι

στους διακόπτες reed contacts. Μια ειδική απαίτηση για αυτή την εφαρμογή είναι ότι η ακτίνα του laser πρέπει να διέλθει από το πράσινο περίβλημα της επαφής.



Εικόνα 6-11: Ρύθμιση με laser

### 6.2.5 Μικροκοπή με laser

Η μικροκοπή των μετάλλων και των κεραμικών είναι μια πολύ διαδεδομένη εφαρμογή. Ο πιο κοινός τύπος είναι το παλμικό laser Nd:YAG χαμηλής ισχύος. Τυπικές παράμετροι της κοπής ανοξείδωτου χάλυβα πάχους 0,2 mm είναι: παλμός ισχύος 0,1J, μήκος παλμού 0.1ms , συχνότητα 150 Hz και ταχύτητα κοπής 5 mm/s. Το πλάτος κοπής είναι μικρότερο από 100μm και η τραχύτητα 2μm.

### 6.2.6 Επένδυση και κραματοποίηση με laser

Το laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας εφαρμόζοντας ένα σκληρό ή αντιδιαβρωτικό στρώμα σε ένα προϊόν. Η συνήθης τεχνική είναι η δημιουργία μιας λεπτής στρώσης τήγματος από μια ακτίνα laser εκτός εστίασης και η παροχή μεταλλικής πούδρας στη στρώση με τη βοήθεια ενός αδρανούς αερίου. [10] [17] [14]

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα – Κατευθύνσεις για το μέλλον**

Σύμφωνα με την παρουσίαση στην παρούσα διπλωματική εργασία καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

Οι κατεργασίες με laser αποτελούν μια δυναμική μέθοδο κατεργασίας για την κοπή σύνθετων προφίλ και τη διάτρηση οπών σε ένα μεγάλο εύρος κατεργαζόμενων υλικών. Όμως, το κύριο μειονέκτημα της διεργασίας αυτής είναι ο χαμηλός βαθμός απόδοσης από την άποψη του ρυθμού παραγωγής και η συγκλίνουσα αποκλίνουσα μορφή της δέσμης από την άποψη της ακρίβειας.

Εκτός από την κοπή και τη διάτρηση, οι κατεργασίες με laser είναι επίσης κατάλληλες για την ακριβή επεξεργασία μικροτεμαχίων. Οι μικροοπές διαμέτρου μέχρι 5μm μπορούν να διατηρηθούν με ακρίβεια με τη χρήση τριπλών παλμών διάρκειας nanosecond. Η κοπή λεπτών φύλλων μέχρι 4 μm είναι εφικτή με μικρό εύρος πλάτους ίχνους κοπής.

Η απόδοση των κατεργασιών με laser εξαρτάται κυρίως από τις παραμέτρους του laser (π.χ. την ισχύ του laser, το μήκος κύματος, τον τρόπο λειτουργίας), τις παραμέτρους του υλικού (π.χ. είδος, πάχος) και τις παραμέτρους της κατεργασίας (π.χ. ρυθμός τροφοδότησης, τοποθέτηση επιπέδου εστίασης, συχνότητα, ενέργεια, διάρκεια παλμού τύπος βοηθητικού αερίου και πίεση). Τα σημαντικά χαρακτηριστικά της κατεργασίας που μας ενδιαφέρουν στη μελέτη των κατεργασιών με laser είναι η θερμο-επηρεαζόμενη ζώνη HAZ, το ίχνος κοπής και η κωνικότητα της οπής, η επιφανειακή τραχύτητα, η στρώση αναμόρφωσης, η προσκόλληση σκουριάς και η δημιουργία μικρορωγμών.

Η διεργασία κοπής με laser χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλία παραμέτρων που προσδιορίζουν την απόδοση, την οικονομικότητα και την ποιότητα της όλης διαδικασίας και ως εκ τούτου οι επιστήμονες έχουν καταβάλει προσπάθειες για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας προς διάφορες κατευθύνσεις.

Οι περισσότερες δημοσιεύσεις αφορούν την κοπή, τη διάτρηση και τη μικροκατεργασία, αλλά τρισδιάστατες κατεργασίες όπως η τόννευση και το φρεζάρισμα δεν εφαρμόζονται ακόμα σε βιομηχανικό επίπεδο. Ο ταυτόχρονος έλεγχος δύο ακτίνων σε διαφορετικές γωνίες κατά τη διάρκεια των τρισδιάστατων κατεργασιών δεν είναι εύκολος. Το πάχος του υλικού είναι ένας επιπλέον περιορισμός για τις κατεργασίες με laser, ο οποίος μπορεί να περιοριστεί με βελτίωση της ποιότητας της δέσμης. Προς το παρόν, η χρήση των κατεργασιών με laser περιορίζεται στην κοπή σύνθετων προφίλ σε μεταλλικά φύλλα, αλλά λόγω της εμφάνισης των προηγμένων υλικών είναι



απαραίτητη η περαιτέρω ανάπτυξή τους για την κοπή δύσκολα κατεργάσιμων υλικών. Η ανάπτυξη αυτή αποτελεί ένα πεδίο για μελλοντική έρευνα.

Οι περισσότερες από τις πειραματικές μελέτες που παρουσιάστηκαν εστιάζουν στα ποιοτικά χαρακτηριστικά της διεργασίας. Οι επιστήμονες έχουν εξαιρέσει πολλούς σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις μεταβλητές απόδοσης, όπως η διάμετρος της δέσμης, η θερμική αγωγιμότητα και η ανακλαστικότητα του κατεργαζόμενου υλικού, καθώς και η αλληλεπίδραση των διαφόρων παραγόντων.

Τέλος, καθώς οι κατεργασίες με laser ανήκουν στις θερμικές κατεργασίες προκαλούν πολλά αντίξοα αποτελέσματα στο κατεργαζόμενο υλικό, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες. Η πλειονότητα των ποιοτικών χαρακτηριστικών που συζητήθηκαν αφορούν στις γεωμετρικές, μεταλλουργικές και επιφανειακές ιδιότητες, όπως: επιφανειακή τραχύτητα, διαμόρφωση κωνικότητας και HAZ. Η κόπωση, η μικροσκληρότητα και οι παραμένουσες τάσεις είναι επίσης σημαντικά μέτρα ποιότητας που απαιτούν βελτίωση. Ως εκ τούτου, η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων στις κατεργασίες με laser αποτελούν ένα επιστημονικό πεδίο ενδιαφέροντος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Καντζάβελος, «Κατεργασίες κοπής υψηλής ταχύτητας: Πειραματική Μελέτη και Αριθμητική Προσομοίωση,» Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2009.
- [2] Α. Γ. Μάμαλης, Κατεργασίες των υλικών, Ε.Μ.Π., 1992.
- [3] Π. Τσαλαπάτης, Μη συμβατικές μέθοδοι κοπής.
- [4] M. C. Gupta, "Laser Based Manufacturing," 2010.
- [5] "Wikipedia," [Online]. Available:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Laser#Laser\\_physics](http://en.wikipedia.org/wiki/Laser#Laser_physics).
- [6] P. W. Milonni and J. H. Eberly, Laser Physics, Wiley.
- [7] C. Mark, Fundamentals of Light Sources and Lasers, Wiley, 2004.
- [8] A. K. Dubey and V. Yadava, "Laser beam machining-A review," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, pp. 609-628, 2008.
- [9] M. Radovanovic, "Laser Cutting Machines for 3-D Thin Sheet Parts," 2002.
- [10] J. Meijer, Micromachining of Engineering Materials, Joseph McGeough.
- [11] G. N. Levy, R. Schindell and J. P. Kruth, "Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing technologies, state of the art and future perspectives," 2003.
- [12] C. L. Caristan, Laser Cutting, Guide for Manufacturing, Society of Manufacturing Engineers, 2004.
- [13] N. Tabata, S. Yagi and M. Hischii, "Present and Future of Lasers for Fine Cutting of Metal Plate," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 309-314, 1996.
- [14] K. Kanaoka and M. Kitani, "Report on Current CO2 Laser applications in Japan," 1988.

- [15] M. Seguchi and K. Kuba, "1.4 kW Nd:YAG slab laser with a Diffusive closed-coupled pump cavity," *Optic Letters*, p. 300, 1995.
- [16] G. Ogura, J. Angell and D. Wall, "Applications test potential of laser micromachining," *Laser Focus World*, pp. 117-123, 1998.
- [17] J. Meijer, "Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 2-17, 2004.