

ΑΤΕΙ-ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ  
ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ

7085

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΘΕΜΑ: «ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΟΠΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ LASER»  
(ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΦΥΛΑΞΕΙΣ)  
(ΒΙΝΤΕΟΣΚΟΠΗΣΗ ΚΟΠΗΣ ΜΕ LASER)

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΖΑΧΑΡΙΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ  
ΦΑΡΜΑΚΑΚΗΣ ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΗΣ  
ΧΡΗΣΤΙΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

A.M 3865  
A.M 3650  
A.M 3871

ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ:

ΚΑΠΠΟΣ Κ.  
ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ Α.  
ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ Γ.



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε θερμά την,Εταιρία VETA ΑΕΒΕ , για το υλικό (συγγράματα, βιβλία κ.α) που ευγενικά μας προσέφερε σχετικά με το θέμα της πτυχιακής μας εργασίας, την επίδειξη των μηχανημάτων της εταιρείας, την προσφορά δειγμάτων και τέλος την άψογη συνεργασία, για την εκπόνηση της παρούσης πτυχιακής εργασίας.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u> .....	1
-----------------------	---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ LASER

1.1 Γενικές ιδιότητες laser.....	2
1.2 Βασικές αρχές λειτουργίας laser.....	10

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΤΥΠΟΙ LASER ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

2.1 Τύποι laser.....	15
2.2 Εφαρμογές.....	24

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΚΟΠΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ LASER

3.1 Εισαγωγή.....	31
3.2 Σύγκριση με άλλες μεθόδους.....	34
3.3 Θεωρία της διαδικασίας κοπής.....	40
3.4 Μελέτη των laser.....	41
3.5 Θεωρία συστήματος.....	61
3.6 Έλεγχος του συστήματος.....	70
3.7 Χαρακτηριστικά παροχής ακτίνας για ανακλώμενη ή μεταδιδόμενη ακτίνα.....	72
3.8 Χαρακτηριστικά του συστήματος παροχής με οπτική ίνα.....	77
3.9 Περίληψη των επιδράσεων της παροχής της ακτίνας στην ενέργεια κοπής.....	80
3.10 Μελέτη για την διαδικασία κοπής.....	82
3.11 Ποιότητα κοπής για μέταλλα.....	97
3.12 Παράμετροι κοπής.....	108
3.13 Βοηθητικό αέριο.....	113
3.14 Παλμός.....	118
3.15 Η χρήση του ψυκτικού μέσου.....	120

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΣΥΓΚΟΛΜΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ LASER

4.1 Αρχές της συγκόλλησης με laser και τα χαρακτηριστικά της.....	121
4.2 Σύγκριση με άλλες μεθόδους.....	126
4.3 Κατάλληλα υλικά για συγκόλληση με laser.....	134
4.4 Παράμετροι συγκόλλησης.....	157
4.5 Διαδικασίες ελέγχου και παρακολούθησης.....	184
4.6 Αίτια εμφάνισης σφαλμάτων και συμπτώματά τους.....	197

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ LASER

5.1 Γενικά.....	200
5.2 Κίνδυνοι.....	200
5.3 Πρακτικές προφυλάξεις.....	203

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u> .....	208
---------------------------	-----

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια από τις καινούργιες τεχνολογίες κατεργασίας μετάλλων που έχει εμφανιστεί την τελευταία 20ετία είναι η κατεργασία με ακτίνες laser.

Το laser είναι ένα εργαλείο πολλαπλών λειτουργιών που κινείται στο χώρο είτε με χρήση CNC ή με robot. Αυξομειώνοντας την ένταση του, μπορεί να κόψει, να συγκολλήσει, να τρυπήσει κ.α. μια μεγάλη ποικιλία υλικών, χρησιμοποιώντας τον ίδιο μηχανισμό.

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία υλικών τα οποία μπορούν να υποστούν κατεργασία με ακτίνες laser. Η κύρια ομάδα υλικών την οποία κατεργάζονται είναι τα μέταλλα. Επίσης μπορούν να κατεργασθούν μια σειρά από εύθραστα ή πολύ ελαστικά υλικά, γυαλί, κεραμικά κ.α.

Τα πλεονεκτήματα που έχουμε κατά την κατεργασία με laser είναι πολλά σε σχέση με άλλες συμβατικές μεθόδους. Γι' αυτό, τα τελευταία χρόνια έχει επέλθει ραγδαία εξέλιξη στην βιομηχανία.

Το αντικείμενο της πτυχιακής μας εργασίας θα είναι η ανάπτυξη των τεχνικών της κοπής και της συγκόλλησης μετάλλων με laser, και τα χαρακτηριστικά τους.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ LASER

### 1.1 Γενικές ιδιότητες laser

Η λέξη laser προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, που σημαίνουν ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Ήδη από το 1917 ο Albert Einstein είχε δείξει τη δυνατότητα ύπαρξης της λεγόμενης εξαναγκασμένης - εκπομπής ακτινοβολίας στην οποία στηρίζεται η λειτουργία των laser αλλά μόλις το 1960 ο T. H Maiman πέτυχε πρώτος τη λειτουργία του laser ρουβινίου.

Ενώ η αυστηρή ανάλυση της φυσικής του laser είναι αρκετά δύσκολη, η βασική αρχή λειτουργίας και η κατασκευή του είναι σχετικά εύκολη και αυτός είναι και ο λόγος που δημιουργεί την απορία γιατί καθυστέρησε στο ξεκίνημα της η εφεύρεση του laser. Πάντως η ανάπτυξη του laser από το 1960 και πέρα υπήρξε εκπληκτικά ραγδαία, ενώ σήμερα παρουσιάζονται νέες εφαρμογές των laser σχεδόν καθημερινά.

Το laser χρησιμοποιεί το φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας, που διαφέρει δραστικά από εκείνη που εκπέμπουν οι συμβατικές πηγές φωτός, των οποίων η λειτουργία στηρίζεται στο φαινόμενο της αυθόρμητης εκπομπής ακτινοβολίας.

Πράγματι, αν συγκρίνουμε την ακτινοβολία ενός laser, όπως π.χ. ένα μικρό HeNe laser ισχύος 1mW, με την ακτινοβολία μιας λάμπας πυράκτωσης ή ενός σωλήνα φθορισμού, θα δούμε :

1. Ότι η διαφορά στην ποιότητα της οπτικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται στις δυο περιπτώσεις είναι πάρα πολύ μεγάλη.

2. Ότι το φως του laser υπερτερεί σε τέσσερα σημεία :

- Την κατευθυντικότητα
- Την ένταση
- Την φασματική καθαρότητα και
- Την συμφωνία.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε περιληπτικά στα παραπάνω τέσσερα σημεία.

### Κατευθυντικότητα

Είναι γνωστό ότι μια συμβατική πηγή φωτός (π.χ λάμπα πυράκτωσης) εκπέμπει ακτινοβολία σε όλες τις διευθύνσεις με ανώμαλη κατανομή φωτοβολίας. Αντίθετα η ακτινοβολία από ένα laser είναι αυστηρά περιορισμένη σε μια λεπτή δέσμη φωτός εγκάρσιας διατομής (της τάξης του ενός τετραγωνικού mm) και μικρής απόκλισης (της τάξης του ενός mrad).

### Ένταση

Αν συγκρίνουμε την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας(τιμή της ροής της φωτεινής ενέργειας ανά μονάδα επιφανείας) ή της λαμπρότητας (τιμή της έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας ανά μονάδα στερεάς γωνίας) των δυο προαναφερόμενων κατηγοριών ακτινοβολίας (laser-λάμπα πυράκτωσης) τότε ακόμη και για laser χαμηλής ισχύος (όπως το 1mW LASER HeNe), η υπεροχή του laser είναι εμφανής, όπως άλλωστε φαίνεται και από τον παρακάτω πίνακα 1.1

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1

	ΛΑΜΠΑ ΠΥΡΑΚΤΩΣΗΣ	LASER HeNe	ΛΟΓΟΣ LASER/ΛΑΜΠΑ ΠΥΡΑΚΤΩΣΗΣ
Συνολική Ακτινοβολουμένη Ισχύς εξόδου(W)	100	$10^{-3}$	$10^{-5}$
Ένταση φωτεινής Ακτινοβολίας (W/m <sup>2</sup> )	$1,9 \times 10^5$	$16,5 \times 10^6$	$3,4 \times 10^3$
Λαμπρότητα (W/m <sup>2</sup> x sterad)	$6 \times 10^5$	$2,5 \times 10^8$	$4,2 \times 10^2$

## Φασματική καθαρότητα

Μια λάμπα πυράκτωσης ή μια οποιαδήποτε άλλη πηγή φωτός έχουν μια διευρυμένη περιοχή φάσματος (η λάμπα πυράκτωσης π.χ έχει συνεχές φάσμα περίπου 300nm μέχρι 200nm) ενώ το laser είναι μια αυστηρά μονοχρωματική πηγή φωτός που ακόμη και για ένα απλό HeNe laser, μπορεί να σταθεροποιηθεί σε μια συχνότητα σταθερή με εύρος 1MHz.

## Συμφωνία

Εδώ η ακτινοβολία του laser υπερτερεί εκπληκτικά σε σχέση με την ακτινοβολία των συμβατικών πηγών. Συμφωνία είναι το μέτρο της έκτασης στην οποία η φάση της ακτινοβολίας διατηρείται σταθερή σε διαφορετικά σημεία στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργεί η ακτινοβολία.

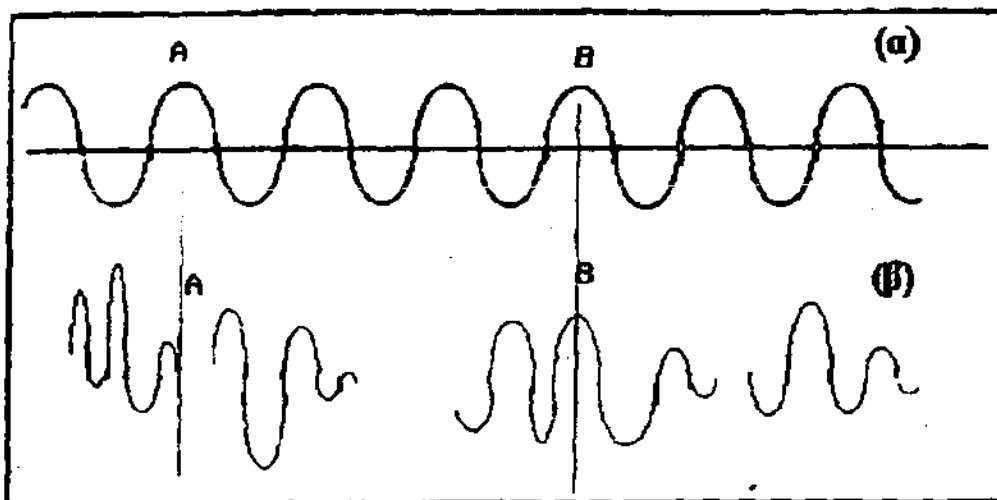
Αν θεωρήσουμε μια ακτινοβολία που διαδίδεται με την μορφή μιας δέσμης, (κατά μια συγκεκριμένη διεύθυνση) τότε μπορούμε να διακρίνουμε 2 τύπους συμφωνίας :

- Τη χρονική συμφωνία (temporal coherence)
- Τη χωρική συμφωνία (spatial coherence)

Αναφερόμαστε σε χρονική συμφωνία όταν παίρνουμε σημεία με σταθερή διαφορά φάσης κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης της φωτεινής δέσμης, ενώ μιλάμε για χωρική συμφωνία όταν παίρνουμε σημεία πάνω στο μέτωπο κύματος της ακτινοβολίας και κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης της φωτεινής δέσμης.

Πιο αναλυτικά : Στην ακτινοβολία laser (εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας) έχουμε εκπομπή ακτινοβολίας υπό μορφή ενός αδιάκοπου κυματοσυρμού μεγάλου μήκους (σχήμα 1.1α). Αντίθετα η φωτεινή ακτινοβολία από συμβατικές πηγές, οφείλει τη δημιουργία της σε έναν άλλο μηχανισμό που ενεργεί αυτόματα στην αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας. Στην αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας, επειδή αυτή γίνεται κατά τυχαίο τρόπο, δημιουργούνται μικρού μήκους και ανεξάρτητοι μεταξύ τους κυματοσυρμοί ενέργειας με τους οποίους και διαδίδεται η ακτινοβολία μιας συμβατικής πηγής φωτός (σχήμα 1.1 β).





Σχήμα 1.1 α)laser και β)Συμβατική πηγή φωτός

Αν εξετάσουμε τη διαδικασία της αυθόρμητης εκπομπής ακτινοβολίας από την άποψη του κυματοσυρμού που εκπέμπεται, βλέπουμε ότι επειδή η διαδικασία αυτή διαρκεί περιορισμένο χρόνο, ο εκπεμπόμενος κυματοσυρμός έχει πεπερασμένο μήκος. Το φάσμα συχνοτήτων της εκπομπής βρίσκεται με ανάλυση Fourier του κυματοσυρμού. Επειδή ο κυματοσυρμός αυτός έχει απεριόριστη διάρκεια, προκύπτει μια διασπορά συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα  $\nu_{21}$  :

$$\nu_{21}=(E_2- E_1)/h$$

Είναι φανερό ότι η διαφορά φάσης μεταξύ των σημείων A και B στην ακτινοβολία laser είναι χρονικά σταθερή (όπως φαίνεται άλλωστε και στο σχήμα 1.1α), εφόσον αυτά αποτελούν σημεία που βρίσκονται πάνω στον ίδιο κυματοσυρμό.

Αντίθετα σημεία A και B που βρίσκονται σε ίση απόσταση επάνω σε κυματοσυρμό που προέρχεται από ακτινοβολία συμβατικής πηγής φωτός έχουν διαφορά φάσης που διακυμαίνεται τυχαία με το χρόνο, αφού τα σημεία αυτά βρίσκονται πρακτικά συνεχώς σε διαφορετικούς κυματοσυρμούς (σχήμα 1.1 β).

Η μέγιστη απόσταση των σημείων A και B στα οποία η συσχέτιση της φάσης διατηρείται, αναφέρεται ως μήκος συμφωνίας (coherence length) και αποτελεί ένα μέτρο της χρονικής συμφωνίας. Έτσι βλέπουμε ότι η ακτινοβολία laser έχει ένα μεγάλο μήκος συμφωνίας σε σχέση με την ακτινοβολία από μια συμβατική πηγή φωτός.

Επίσης από τον τρόπο διάδοσης της ακτινοβολίας είναι φανερό ότι ο χρόνος στον οποίο η φάση σε ένα συγκεκριμένο σημείο του κύματος της ακτινοβολίας συμπεριφέρεται ομαλά, με την λογική δηλαδή της μη τυχαίας διακύμανσης με το χρόνο, είναι ακριβώς ο χρόνος που χρειάζεται για να περάσει ο κυματοσυρμός το συγκεκριμένο σημείο.

Ο χρόνος αυτός είναι γνωστός ως χρόνος συμφωνίας  $t_c$  (coherence time) της ακτινοβολίας. Μεταξύ του χρόνου συμφωνίας  $t_c$  και του μήκους συμφωνίας  $l_c$  ισχύει η σχέση :

$$T_c = l_c / C$$

όπου  $C$  η ταχύτητα φωτός,

Στην περίπτωση της χωρικής συμφωνίας, αναφερόμαστε σε συσχέτιση φάσης μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε επίπεδο κάθετο στην διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας. Η χωρική συμφωνία μπορεί να μετρηθεί από την περιοχή συμφωνίας, η οποία ορίζεται ως η περιοχή στην οποία για οποιοδήποτε ζεύγος σημείων της η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου της ακτινοβολίας διατηρεί σταθερή διαφορά φάσης συναρτήσει του χρόνου.

Στην περίπτωση για παράδειγμα ενός HeNe laser, είναι εξασφαλισμένο ότι η περιοχή συμφωνίας της εκπεμπόμενης δέσμης είναι ίση με την συνολική διατομή της δέσμης. Με άλλα λόγια αυτό σημαίνει ότι το laser εκπέμπει χωρικά σύμφωνο μέτωπο κύματος.

Στην περίπτωση μιας συμβατικής πηγής φωτός η περιοχή συμφωνίας είναι αντιστρόφως ανάλογη με το γωνιακό μέγεθος της πηγής, όπως αυτή φαίνεται από το σημείο μέτρησης. Στην απόσταση του 1m από μια τυπική λάμπα πυράκτωσης, η περιοχή συμφωνίας είναι της τάξεως του  $10^{-3} \text{ mm}^2$ , σε αντίθεση με την περιοχή συμφωνίας ενός μικρού HeNe laser που είναι ίση με την διατομή της δέσμης, δηλαδή της τάξης του  $1 \text{ mm}^2$ .

Σε πολλές εφαρμογές οπτικής ακτινοβολίας, μια σπουδαία παράμετρος είναι το συνολικό ποσό της διαθέσιμης σύμφωνης οπτικής ενέργειας, δηλαδή το ποσό της οπτικής ενέργειας που διασχίζει την περιοχή συμφωνίας στον χρόνο συμφωνίας.

Οι παραπάνω αναφερόμενες ιδιότητες του laser, το κάνουν σπουδαίο σε πάρα πολλές εφαρμογές όχι μόνο ως πηγής φωτός αλλά και ως εργαλείο χρήσιμο σε πάρα πολλές περιπτώσεις και σε πάρα πολλούς τομείς έρευνας και εφαρμογών.

Στη συνέχεια θα επιχειρήσουμε μια περιγραφή των βασικών αρχών λειτουργίας, έτσι ώστε να μπορέσουν να γίνουν κατανοητές μερικές από τις πάρα πολλές δυνατότητες εφαρμογής του.

### 1.1.1 Εκπομπή και απορρόφηση ακτινοβολίας - Αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας

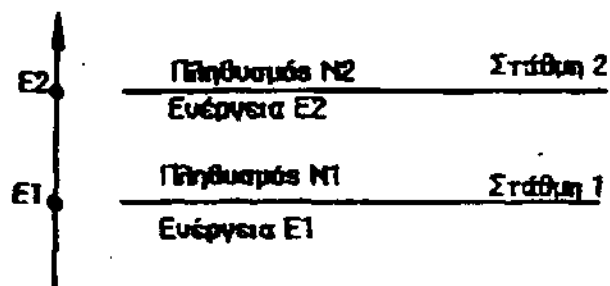
Προκειμένου να κατανοήσουμε την λειτουργία του laser, πρέπει αρχικά να εξοικειωθούμε με τις διαδικασίες που περιγράφουν την εκπομπή και απορρόφηση ακτινοβολίας από τα άτομα.

Ο Einstein έθεσε τις βάσεις για την ανάπτυξη του laser με την εξήγηση της διαδικασίας της ατομικής απορρόφησης, της αυθόρμητης εκπομπής και της εξαναγκασμένης εκπομπής το 1917. Έτσι σήμερα είναι γνωστό ότι όταν ένα ηλεκτρόνιο σε ένα άτομο μεταπηδά μεταξύ δύο ενεργειακών σταθμών, τότε ή απορροφά ή εκπέμπει ένα φωτόνιο, του οποίου η συχνότητα  $N$  δίνεται από την σχέση :

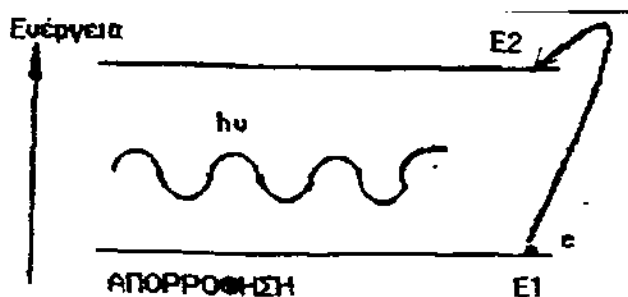
$$N = \Delta E / h$$

Όπου  $\Delta E$  η διαφορά της ενέργειας των δυο ενεργειακών σταθμών και  $h$  η σταθερά του Planck

Ας θεωρήσουμε ότι έχουμε ένα υποθετικό ατομικό σύστημα δυο ενεργειακών σταθμών (σχήμα 1.2) και ότι οι μεταπηδήσεις ενός ηλεκτρονίου του ατόμου αυτού μπορούν να γίνουν μόνο μεταξύ αυτών των δυο ενεργειακών σταθμών. Αν το ηλεκτρόνιο βρίσκεται στην στάθμη χαμηλότερης ενέργειας  $E_1$ , τότε αυτό μπορεί να διεγερθεί και να μεταπηδήσει στη στάθμη μεγαλύτερης ενέργειας  $E_2$ , αν απορροφήσει την ενέργεια ενός φωτονίου. Για να γίνει αυτό δυνατό πρέπει η ενέργεια του φωτονίου που θα απορροφηθεί από το ηλεκτρόνιο να είναι ίση  $E_2 - E_1$  (σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.2 σύστημα δυο ενεργειακών σταθμών



Σχήμα 1.3 απορρόφηση

Αντίθετα, όταν το ηλεκτρόνιο βρίσκεται στη στάθμη μεγαλύτερης ενέργειας  $E_2$ , είναι δηλαδή διηγεμένο, τότε αυτό τείνει να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση εκπέμποντας ένα φωτόνιο.

Αυτή η εκπομπή του φωτονίου, μπορεί να γίνει με δυο διαφορετικούς τρόπους:

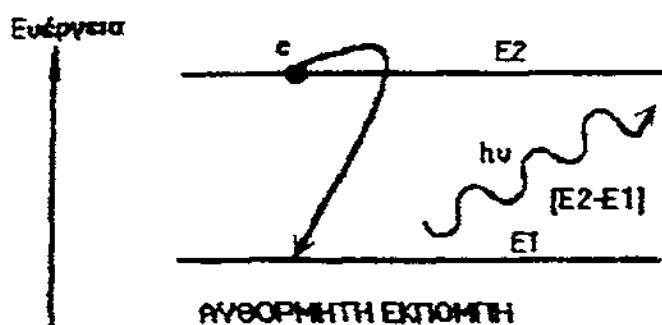
- Την αυθόρμητη εκπομπή (spontaneous emission)
- Την εξαναγκασμένη εκπομπή (stimulated emission)

Στην αυθόρμητη εκπομπή, το ηλεκτρόνιο του υλικού που διεγείρεται μένει στην κατάσταση διέγερσης για ελάχιστο χρόνο (της τάξης του  $0.5\text{ns}$ ), αποδιεγείρεται αυτόματα και εντελώς τυχαία, επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση και εκπέμπει φωτόνιο ενέργειας  $h\nu = E_2 - E_1$ . Το χαρακτηριστικό της μετάπτωσης αυτής είναι ότι γίνεται με εντελώς τυχαίο τρόπο (σχήμα 1.4).

Αντίθετα στην εξαναγκασμένη εκπομπή το ηλεκτρόνιο που διεγείρεται έχει τη δυνατότητα να παραμείνει πολύ περισσότερο χρόνο (της τάξεως του  $\text{ms}$ ) σε ορισμένες πρόσκαιρα σταθερές στάθμες ενέργειας (μετασταθείς στάθμες).

Στην περίπτωση αυτή το ηλεκτρόνιο θα αποδιεγερθεί και θα επανέλθει στην αρχική του κατάσταση όταν «φωτιστεί» από φωτόνιο του οποίου η ενέργεια είναι  $E_2 - E_1$ . Έτσι από την

αποδιέγερση αυτή του ηλεκτρονίου παράγεται ένα ακόμη φωτόνιο ενέργειας  $E_2 - E_1$  του οποίου η ενέργεια προστίθεται στην ενέργεια του αρχικού φωτονίου (σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.4 Αυθόρμητη εκπομπή

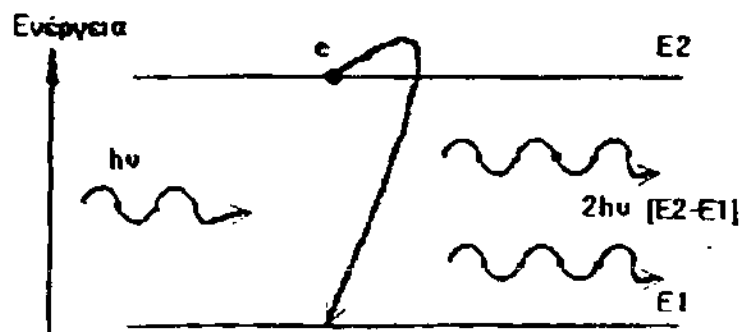
Υπο κανονικές συνθήκες δεν παρατηρείται η εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας, γιατί η πιθανότητα να συμβεί αυθόρμητη εκπομπή είναι πολύ μεγαλύτερη. Αν επιχειρήσουμε μια πιο μαθηματική ανάλυση των παραπάνω διεργασιών της απορρόφησης και της εκπομπής ακτινοβολίας, θα πρέπει σε μια πρώτη προσέγγιση, να δεχτούμε ότι οι πιθανότητες να συμβούν οι πιο πάνω μεταπηδήσεις του ηλεκτρονίου είναι ανεξάρτητες του χρόνου.

Ο μέσος χρόνος στον οποίο το ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση, πριν κάνει μια αυθόρμητη μεταπήδηση ονομάζεται «χρόνος ζωής  $\tau_{2,1}$ » της διεγερμένης κατάστασης. Οι δείκτες 2,1 δείχνουν τη σειρά των ενεργειακών σταθμών που συνεπάγεται αυτή η μεταπήδηση.

Η πιθανότητα ότι το συγκεκριμένο άτομο θα δημιουργήσει αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας μέσα στο χρονικό διάστημα  $dt$  δίνεται από τη σχέση :

$$A_{2,1} \times dt = dt / \tau_{2,1}$$

Όπου  $A_{2,1}$  είναι μια χαρακτηριστική σταθερή ποσότητα που εκφράζει το ρυθμό της αυθόρμητης εκπομπής ακτινοβολίας ( $A_{2,1} = 1/\tau_{2,1}$ ).



Σχήμα 1.5 Εξαναγκασμένη εκπομπή

Επειδή η αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας από οποιοδήποτε άτομο είναι τυχαία, είναι φανερό ότι η ακτινοβολία αυτή, όταν προέρχεται από μεγάλο αριθμό ατόμων είναι ασύμφωνη. Αντίθετα η ακτινοβολία που προέρχεται από τη διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής είναι σύμφωνη, με καθορισμένη συχνότητα, ενώ τα φωτόνια της είναι συμφασικά και με την ίδια κατάσταση πόλωσης.

Αυτό σημαίνει ότι με τη διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής, το πλάτος ενός εισερχομένου κύματος μπορεί να αυξάνει, καθώς αυτό περνά μέσα από ένα σύνολο ατόμων, είναι δηλαδή μια διαδικασία ενίσχυσης.

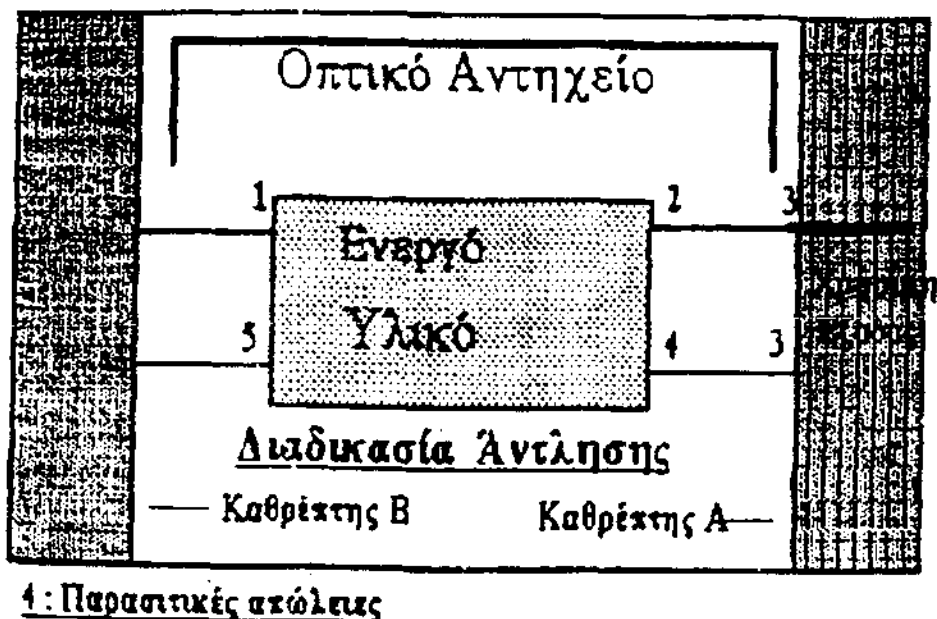
Ο μηχανισμός της εξαναγκασμένης εκπομπής συναγωνίζεται κατά κάποιο τρόπο τους μηχανισμούς της αυθόρμητης εκπομπής, καθώς επίσης και της απορρόφησης. Προκειμένου επομένως να ενισχύσουμε σε μια δέσμη φωτός το μηχανισμό της εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας, πρέπει να αυξήσουμε το ρυθμό αυτού του μηχανισμού σε σχέση με τους άλλους δυο μηχανισμούς.

## 1.2 Βασικές αρχές λειτουργίας laser

Παρ'όλο που υπάρχουν πολλοί τύποι laser, καθένας των οποίων έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και τις δικές του κατασκευαστικές λεπτομέρειες, εν τούτοις είναι δυνατόν να υποδειχθούν ορισμένες βασικές αρχές λειτουργίας των laser, που είναι κοινές για όλους τους τύπους.

Έτσι η μελέτη όλων των τύπων laser δείχνει ότι σε κάθε ένα από αυτά μπορούμε να διακρίνουμε τα ακόλουθα τμήματα (σχήμα 1.6) :

- Το ενεργό υλικό.
- Το οπτικό αντηχείο ή κοιλότητα συντονισμού.
- Το τμήμα της διαδικασίας άντλησης



Σχήμα 1.6 Σχηματική διάταξη laser

Το ενεργό υλικό είναι το υλικό που παρέχει τις στάθμες ενέργειας του για μεταπτώσεις ηλεκτρονίων που οδηγούν σε δράση laser. Το υλικό αυτό δρα ως ένας ενισχυτής στην οπτική ακτινοβολία που περνά μέσα από αυτό.

Η ακτινοβολία αυτή εγκλωβίζεται στο λεγόμενο «οπτικό αντηχείο» ή «κοιλότητα συντονισμού», το οποίο αποτελείται από δυο καθρέπτες. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται το φαινόμενο της ανάδρασης (feedback) στην παραγόμενη οπτική ακτινοβολία, έτσι ώστε το laser να λειτουργεί σε μια αυτοσυντηρούμενη ταλάντωση.

Με τη «διαδικασία άντλησης» είναι δυνατόν να μεταφέρεται ενέργεια μέσα στα άτομα του ενεργού υλικού, έτσι ώστε να διατηρείται μια συντηρούμενη ταλάντωση μέσα στο οπτικό αντηχείο παρά την ύπαρξη απωλειών της οπτικής ενέργειας λόγω της (σκόπιμης) χρήσιμης απώλειας εξόδου, είτε λόγω (ανεπιθύμητων) παρασιτικών απωλειών που οφείλονται στην ίδια την κατασκευή του laser.

Στο σχήμα 1.6 έχουμε το ενεργό υλικό ανάμεσα σε δυο καθρέπτες Α και Β που αποτελούν το οπτικό αντηχείο. Μια οπτική ακτινοβολία που διαδίδεται από το σημείο 1 στο σημείο 2 βγαίνει κατά πολύ ενισχυμένη από το ενεργό υλικό. Αυτό γίνεται διότι το ενεργό υλικό διοχετεύει την ενέργεια που δέχεται με τη διαδικασία άντλησης στο πεδίο της ακτινοβολίας που σχηματίζεται.

Στη συνέχεια η ακτινοβολία διαδίδεται από το σημείο 2 στο σημείο 3 πάνω στον καθρέπτη A. Ο καθρέπτης A είναι κατασκευασμένος κατά τέτοιο τρόπο ώστε μόνο ένα μικρό κλάσμα της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω του να είναι δυνατόν να περάσει μέσα από αυτόν. Η ακτινοβολία αυτή αποτελεί τη χρήσιμη ακτινοβολία εξόδου του laser. Η ακτινοβολία που παραμένει ανακλάται και επιστρέφει στο οπτικό αντηχείο (από το σημείο 3 στο σημείο 4).

Με τον τρόπο αυτό η ακτινοβολία ενισχύεται ξανά με το πέρασμα της μέσα από το ενεργό υλικό από το σημείο 4 στο σημείο 5, οπότε και προσπίπτει στον καθρέπτη B, ανακλάται ολόκληρη και επιστρέφει ξανά ακολουθώντας την ίδια διαδρομή.

Ο καθρέπτης B είναι κατασκευασμένος σε αντίθεση με τον καθρέπτη A, ώστε να έχει ανακλαστικότητα ίση με 100%.

Σε μια κλειστή διαδρομή μέσα στο οπτικό αντηχείο, η ακτινοβολία που παραμένει μέσα σε αυτό, θα πρέπει να έχει ενέργεια αρκετή ώστε να καλύψει αφενός την ενέργεια εξόδου και αφετέρου την ενέργεια που χάνεται από τη λειτουργία του όλου συστήματος (παρασιτικές απώλειες και απώλειες κατά τη διέλευση της ακτινοβολίας μέσα από το ενεργό υλικό).

Όταν συμβαίνει αυτό, τότε το σύστημα είναι αυτοσυντηρούμενο και είναι δυνατό να εκπέμπεται συνεχώς ακτινοβολία εξόδου. Αν η ενίσχυση που μπορεί να επιτευχθεί από το ενεργό υλικό (που είναι γνωστή ως οπτική απολαβή) είναι πολύ μικρή ώστε να μη καλύπτει τις απώλειες, τότε το laser δεν μπορεί να διατηρήσει την κατάσταση ταλάντωσης της ακτινοβολίας μέσα στο οπτικό αντηχείο και επομένως δεν μπορεί να λειτουργεί.

Εαν όμως η οπτική απολαβή υπερβαίνει τις απώλειες, η ακτινοβολία μέσα στο οπτικό αντηχείο αυξάνει με το πέρασμα της από το ενεργό υλικό, με συνέπεια η ωφέλιμη ισχύς εξόδου της ακτινοβολίας να αυξάνει με το χρόνο.

Αυτό όμως δεν μπορεί να συνεχίζεται για πολύ, γιατί με την αύξηση της ακτινοβολίας στο ενεργό υλικό, η οπτική απολαβή που πρόκειται να αποσπασθεί από το ενεργό υλικό ελαττώνεται προοδευτικά λόγω φαινομένων κορεσμού, μέχρι το laser να φθάσει σε ένα σημείο λειτουργίας,

όπου η (κορεσμένη) απολαβή να είναι ακριβώς ίση με τις συνολικές απώλειες του οπτικού αντηχείου.

Με τις συνθήκες αυτές το laser εργάζεται σε μια κατάσταση ισορροπίας και η ισχύς εξόδου διατηρεί σταθερή τιμή. Ο κορεσμός στη λειτουργία του laser είναι εκείνη ακριβώς η κατάσταση στην οποία ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας για οπτική ακτινοβολία είναι ίσος με το ρυθμό ενέργειας, που εισέρχεται στο σύστημα laser με την διαδικασία άντλησης.



## Τρόποι λειτουργίας

Τα laser λειτουργούν με δυο διαφορετικούς τρόπους :

1. Με παλμούς
2. Με συνεχή εκπομπή

**Με παλμούς :** Ανάλογα με τις χαρακτηριστικές του παλμού έχουμε διαφορετικές ιδιότητες στην έξοδο, όπως : Normal mode (normal pulse). Σε αυτό το laser, η διάρκεια του παλμού είναι μεταξύ του ms ως δεκάδες ms. Σε κάθε περίπτωση η διάρκεια του παλμού είναι ανάλογη ως προς τη διάρκεια της διέγερσης π.χ στην οπτική άντληση μπορεί να φθάσει με ειδικές τεχνικές μέχρι 30ms.

Η λειτουργία με παλμούς μπορεί να γίνει και με άλλο τρόπο, Q-switched, όπως λέγεται. Το Q εκφράζει τον παράγοντα ποιότητας του συστήματος παλμών. Εδώ πρόκειται για την δυνατότητα να περάσουμε από μια κατάσταση χαμηλής τιμής, σε μια κατάσταση πάρα πολύ μεγάλης τιμής μέσα σε ελάχιστο χρόνο. Δηλαδή από μια κατάσταση που δεν έχουμε εκπομπή laser παρ'όλο ότι έχουμε αναστροφή του πληθυσμού σε μια κατάσταση ενισχυμένης εκπομπής, με δυνατότητα να φθάσουμε σε ισχείς πάρα πολύ υψηλές ( $10^6 \sim 10^9 \text{W}$ )

Σε μια συσκευή laser, την οποία μπορούμε να θεωρήσουμε σαν ένα ταλαντωτή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, είναι δυνατό να επιτύχουμε στατικά κύματα, αν φυσικά η απόσταση μεταξύ των δυο κατόπτρων της κοιλότητας, είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του ήμισυ μήκους κύματος της ακτινοβολίας.

Με αυτό το σύστημα επί πλέον μπορούμε να επιτύχουμε παλμούς πάρα πολύ βραχείς (psec). Είναι λοιπόν δυνατόν να δημιουργήσουμε με διάφορα συστήματα laser, παλμούς διαφορετικής διάρκειας, από msec ως psec, και διαφορετικής ενέργειας. Κυρίως οι παλμοί Q-switched έχουν μικρότερη ενέργεια από τους normal-pulse, αλλά συγκεντρωμένοι σε μικρότερο διάστημα χρόνου. Οι παλμοί mode-locked αντίθετα παρουσιάζουν τη μέγιστη ισχύ.

**Με συνεχή εκπομπή :** Μπορούμε επίσης να έχουμε συνεχή εκπομπή laser (Cw) ή σχεδόν συνεχή όταν η συχνότητα επαναληψιμότητας του παλμού είναι μεγάλη. Οι ισχείς που επιτυγχάνονται με αυτό το σύστημα είναι κατώτερες σε σχέση με τα παλμικά. Στον παρακάτω πίνακα 1.11 δίνονται οι κυριώτερες χαρακτηριστικές των πιο διαδεδομένων laser.

Περιοχή εκπομπής	Μήκος κύματος	Μέσον	Τρόπος εκπομπής
UV_A	325	He-Cd	Συνεχές
UV_A	337	N <sub>2</sub>	Παλμικό
UV_A	350	Ar excimer	Συνεχές Παλμικό
Ορατό	441,6	He-Cd	Συνεχές
Ορατό	458 488 514	Ar	Συνεχές
Ορατό	458 568 647	Kr	Συνεχές
Ορατό	530	Nd	Παλμικό
Ορατό	632	HeNe	Συνεχές
Ορατό	694	Ρουβίδιο	Παλμικό
Ορατό	όλες	Laser χρωστικών	Συνεχές
IR-A	850	GaAlAs	Πακέτα παλμών
IR-A	905	GaAs	Παλμικό
IR-A	1060	Nd:glass	Παλμικό
IR-A	1064	Nd:YAG	Παλμικό/ Συνεχές
IR-C	5000	CO	Παλμικό/ Συνεχές
IR-C	10600	CO <sub>2</sub>	Παλμικό

Πίνακας 1.11

### Κυριώτερες ιδιότητες των laser

Μεταξύ των κοινών χαρακτηριστικών όλων των laser, που τα καθιστούν διαφορετικά από τις άλλες πηγές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι τα παρακάτω :

1. Μονοχρωματικότητα.
2. Ελάχιστη σύγκλιση δέσμης.
3. Το προφίλ στο χώρο της έντασης της δέσμης είναι τύπου Gauss.
4. Υψηλή πυκνότητα δέσμης.
5. Μεγάλο βαθμό χωρικής και χρονικής συμβατότητας.
6. Μεγάλο βαθμό πόλωσης της δέσμης.
7. Μεγάλη πυκνότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Οι παραπάνω ιδιότητες κάνουν μοναδική την επιλογή των laser στην επεξεργασία των υλικών όπως και στα άλλα πεδία εφαρμογής τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΤΥΠΟΙ LASER ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

#### 2.1 Τύποι laser

Μέσα σε μια εικοσαετία, από τότε που ο Τ.Η. Maiman παρατήρησε τη δράση των laser, αναπτύχθηκαν ραγδαία διάφοροι τύποι laser καθώς και η τεχνολογία των υλικών που χρησιμοποιούνται σε αυτά.

Οι διάφορες συσκευές laser μπορούν να ταξινομηθούν σε κατηγορίες, ανάλογα με το είδος του ενεργού υλικού τους, και έτσι έχουμε :

- **laser στερεών ή laser προσμίξεων**

1. laser ρουβινίου
2. laser Nd:YAG
3. laser Nd:Glass

- **laser υγρών βαφής (dye laser)**

- **laser αερίων**

1. laser ουδέτερων ατόμων
2. laser ιόντων
  - laser αερίων ιόντων
  - laser μεταλλικών ατμών
3. laser μοριακών αερίων
  - Δονητικά-Περιστροφικά laser
  - Δονητριάκα laser
  - laser διεγερμένων διμερών (EXCIMER LASER)

- **laser ημιαγωγών**

- **Χημικά laser**

- **laser χρωματικών κέντρων**

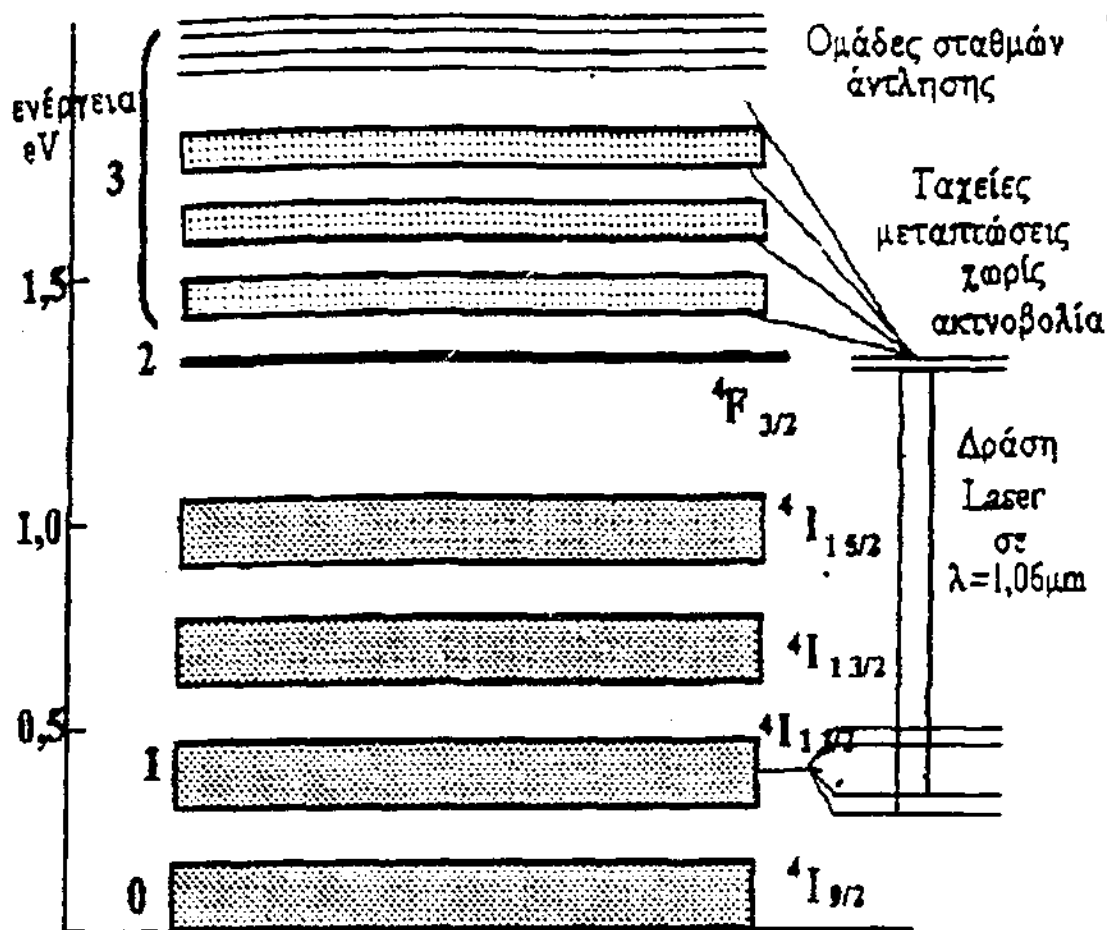
- **laser ελευθέρων ηλεκτρονίων**

Το σχήμα 2.1 παρουσιάζει τα μήκη κύματος διαφόρων τύπων laser.



Οι μεταπηδήσεις αυτές δίνουν αρκετές γραμμές εκπομπής laser από τις οποίες η πιο έντονη είναι αυτή που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος 1064nm (αντιστοιχεί στο υπέρυθρο και είναι εξαιρετικά επικίνδυνη στο μάτι).

Η άντληση επιτυγχάνεται με την χρησιμοποίηση ενός έντονου «φλας» λευκού φωτός με τη χρήση μιας λάμπας ευγενούς αερίου Ξένιου.



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα σταθμών ενέργειας και μεταπτώσεις σε laser Nd:YAG

Η φωτεινή ενέργεια της λάμπας διεγείρει τα ιόντα του Nd<sup>3+</sup> από τη θεμελιώδη στάθμη στις διάφορες ενεργειακές στάθμες πάνω από την  ${}^4F_{3/2}$  στάθμη, όπως άλλωστε φαίνεται και στο σχήμα 2.2.

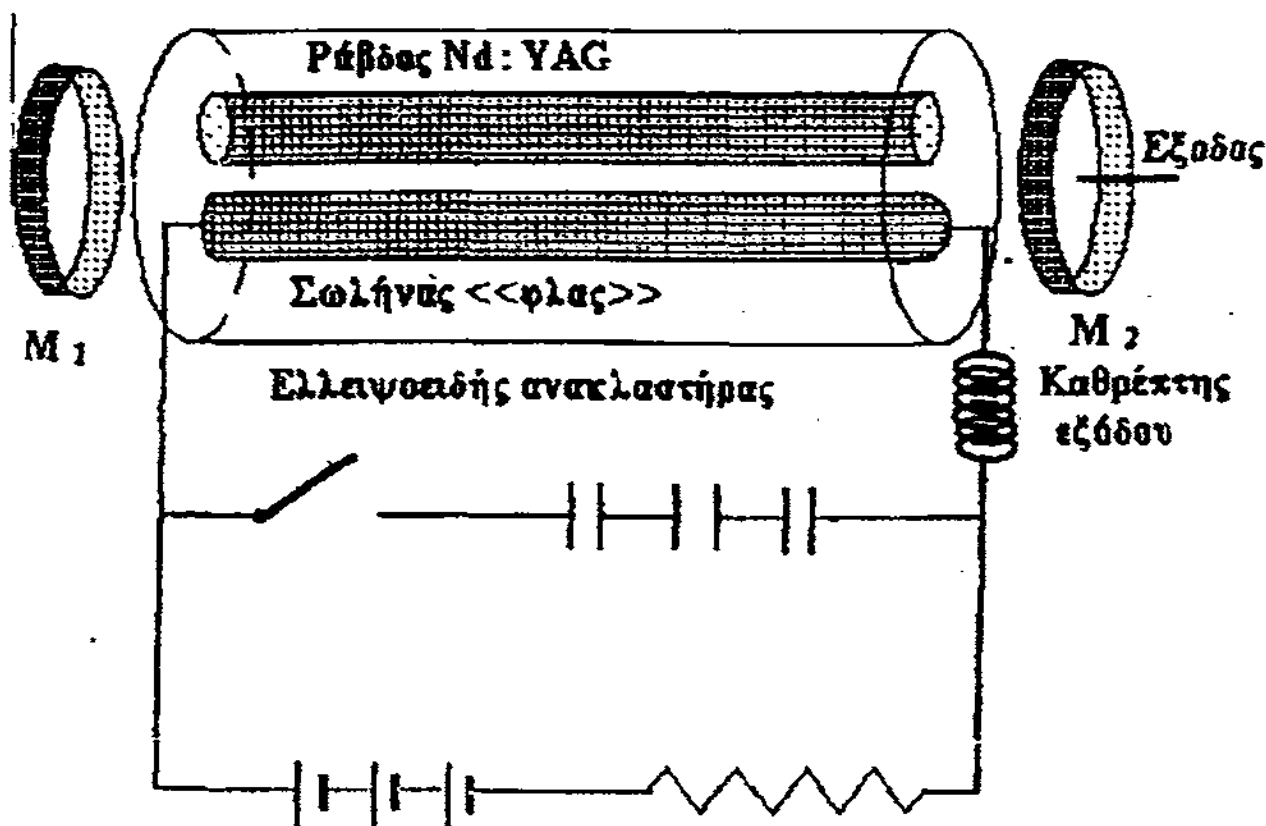
Για να έχουμε τη μέγιστη δυνατή απόδοση της λάμπας «φλας», ώστε το μέγιστο της ακτινοβολίας της να απορροφάται από το ενεργό υλικό, χρησιμοποιείται η διάταξη του σχήματος 2.3.

Στο οπτικό αντηχείο δίνεται ελλειψοειδής μορφή. Η λάμπα υπό μορφή ευθύγραμμου σωλήνα τοποθετείται στον ένα εστιακό άξονα του ελλειψοειδούς, ενώ στον άλλο τοποθετείται με μορφή

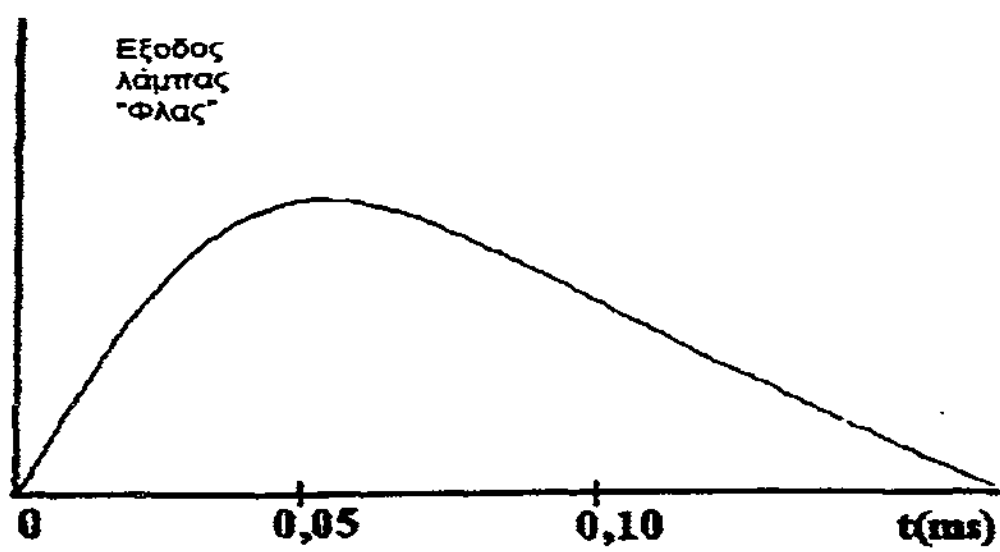
ράβδου το ενεργό υλικό. Εσωτερικά το οπτικό αντηχείο παρουσιάζει μεγάλη ανακλαστικότητα, έτσι εξ αιτίας της ιδιότητας του ελλειψοειδούς, η ακτινοβολία από τη λάμπα που κατέχει τον ένα άξονα, συγκεντρώνεται στη ράβδο του ενεργού υλικού.

Το «φλας» ανάβει με την εκφόρτιση πυκνωτών που τροφοδοτούνται από βοηθητική πηγή 20Kv.

Εφόσον το «φλας» που δημιουργεί την άντληση διαρκεί πολύ λίγο (περίπου 1ms), η έξοδος του laser αποτελείται από μια σειρά έντονων παλμών που αρχίζουν από 0,5ms μετά την έναρξη του «φλας». Κάθε παλμός έχει περίπου 1μs διάρκεια και απέχει χρονικά από τον άλλο περίπου 1 μs (σχήμα 2.4).



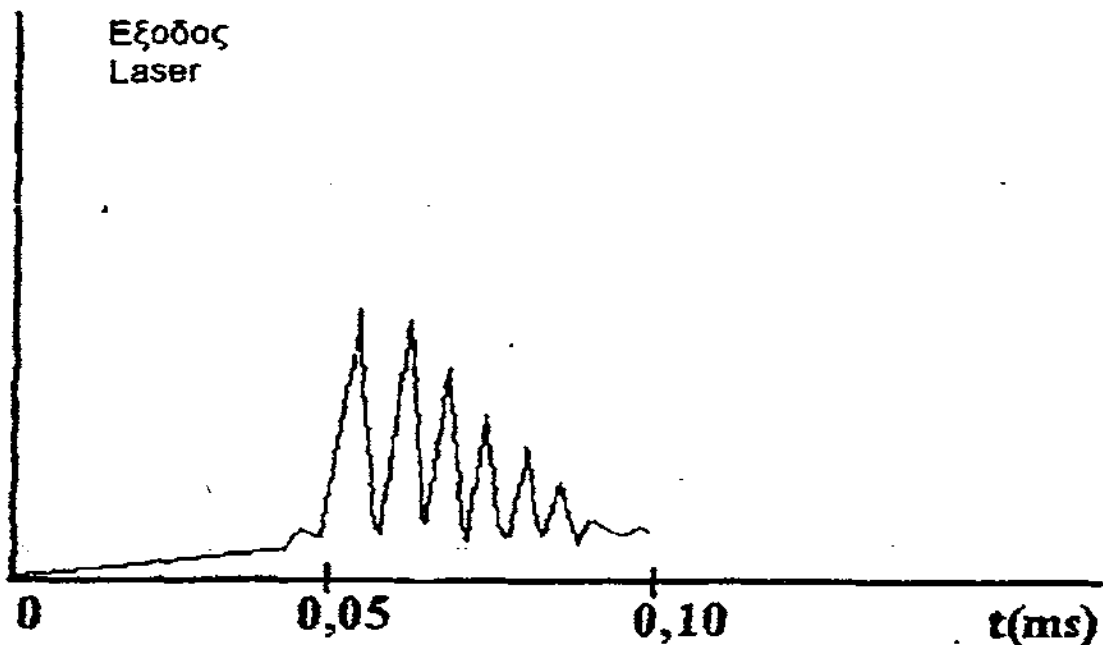
Σχήμα 2.3 Συγκρότηση και συνδεσμολογία του βασικού τμήματος του laser Nd:YAG



Σχήμα 2.4 Λειτουργία λάμπας άντλησης

Λόγω της φύσης του ενεργού υλικού του και των συνθηκών λειτουργίας του, το laser αυτό παρουσιάζει μεγάλο αριθμό τρόπων (modes) μέσα στην καμπύλη απολαβής του, όταν λειτουργεί ανεξέλεγκτα (είναι δυνατό να παρουσιαστούν γύρω στους 100 τρόπους).

Οι τρόποι αυτοί περιορίζονται βέβαια με τις τεχνικές που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ώστε το laser αυτό να μπορεί να λειτουργεί με ένα μόνο τρόπο (σχήμα 2.5).



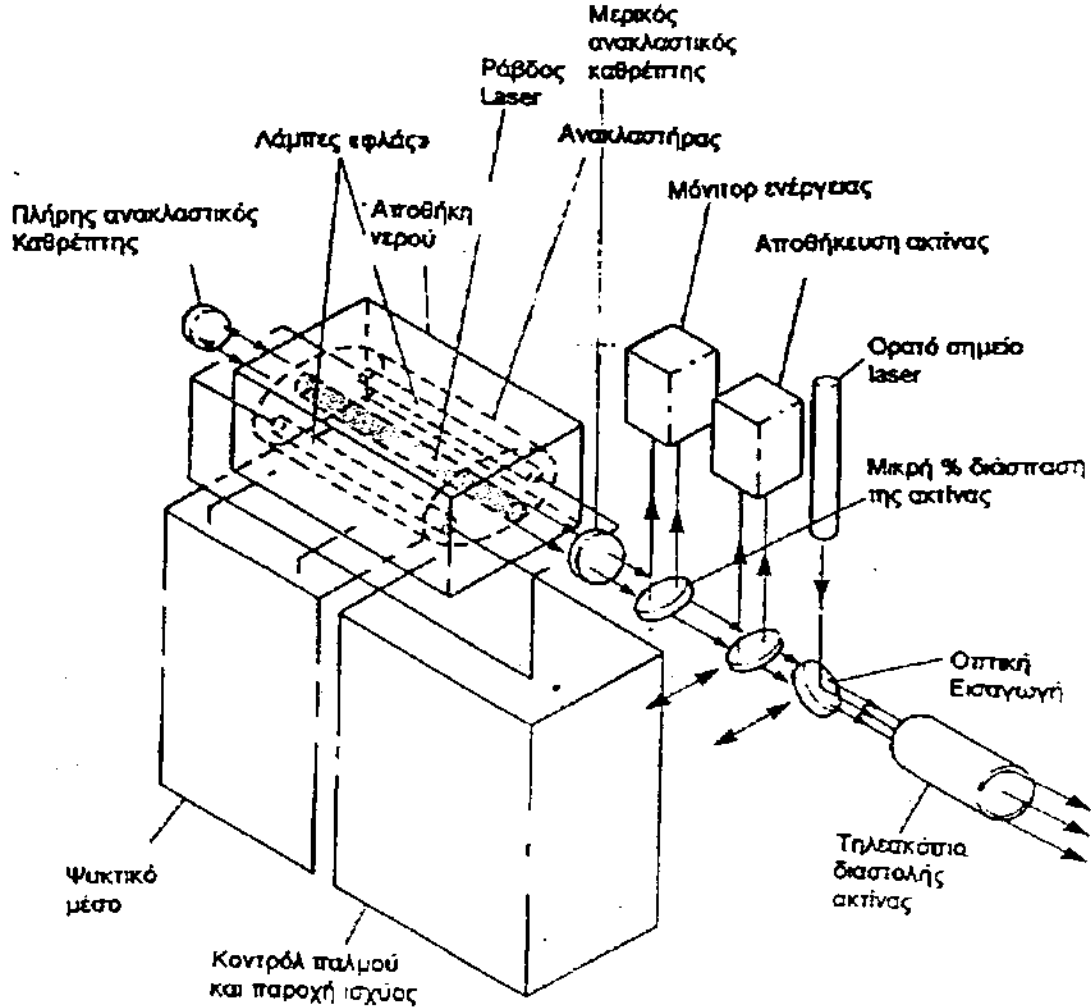
Σχήμα 2.5 Έξοδος Nd:YAG laser

Ένα άλλο οπτικό αντηχείο σχηματίζεται ανάμεσα στις βάσεις του κυλινδρικού κρυστάλλου Nd:YAG που γυαλίζονται επιμελώς. Παρ'όλα αυτά, χρησιμοποιούνται άλλοι δυο καθρέπτες κάθετα στον άξονα του ελλειπτικού οπτικού αντηχείου. Από αυτούς ο ένας έχει 100% ανακλαστικότητα, ενώ ο άλλος έχει 90% ανακλαστικότητα (δηλαδή διαπερατότητα 10%) για να δώσει ωφέλιμη έξοδο.

Λόγω του «φλας», διαχέεται ένα μεγάλο ποσό θερμότητας το οποίο θερμαίνει έντονα τη ράβδο Nd:YAG. Προκειμένου να αποφευχθούν ζημιές ο κρύσταλλος ψύχεται είτε με ρεύμα αέρα, είτε με ρεύμα νερού, που διαβιβάζονται στο οπτικό αντηχείο το οποίο παίζει και ρόλο δοχείου ψύξεως.

Το νερό χρησιμοποιείται ως ψυκτικό στο laser αυτού του τύπου, που αποδίδουν μεγάλη ισχύ. Η απόδοση ενός τέτοιου laser ανέρχεται στο 1%. Τυπικές τιμές ισχύος παλμών ενός τέτοιου laser είναι 15MW διάρκειας 10ns με ρυθμό 10Hz.





Σχήμα 2.7: Σχηματική άποψη ενός Nd:YAG laser

## CO<sub>2</sub> laser

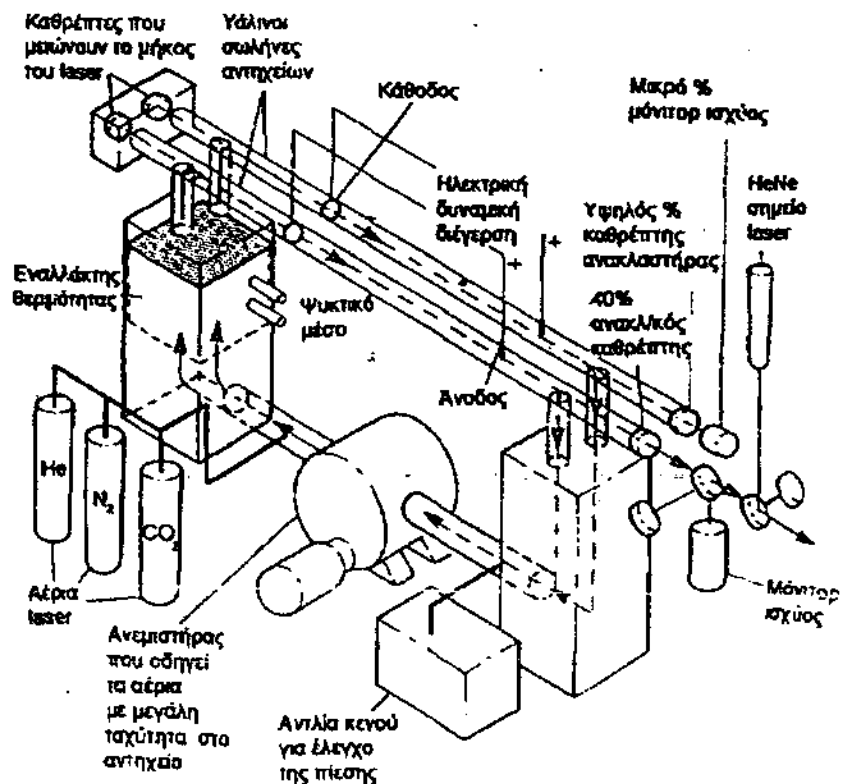
Τα CO<sub>2</sub> laser είναι διαθέσιμα με εξωτερικές ισχύς 0,5 ως 2,5KW. Τα laser με 2KW και με 5KW χρησιμοποιούνται στις περισσότερες συγκολλήσεις. Τα laser των 2KW επιτυγχάνει βάθος συγκόλλησης περίπου 3mm με ταχύτητα 1m/min, ενώ τα laser των 5KW μπορεί άνετα να πετύχει βάθος 7mm, με την ίδια ταχύτητα.

Μια σχηματική άποψη του CO<sub>2</sub> laser φαίνεται στο σχήμα 2.10. Αυτού του είδους το laser είναι μεγαλύτερο, πιο πολύπλοκο και μπορεί να επιτύχει υψηλότερη ισχύ από το Nd:YAG laser.

Το ενεργητικό CO<sub>2</sub> laser, που η λειτουργία του βοηθιείται με την προσθήκη ηλίου και αζώτου, περιέχει μια μικρή πίεση της τάξεως των 50μbar μέσα στο θάλαμο, που μορφοποιεί το κιβώτιο του αντηχείου. Το ήλιο και το άζωτο όταν προστεθούν στο CO<sub>2</sub> laser, αφαιρούν τα ανεπιθύμητα μήκη κύματος και παρέχουν περισσότερη παραγωγή αποτελεσματικών φωτονίων.

Ο αέρας αφαιρείται από το θάλαμο με μια αντλία κενού. Αυτή διπλασιάζει τον έλεγχο της πίεσης του θαλάμου, σε σχέση με τα αέρια του laser μειώνοντας την διαρροή των αερίων με την συνεχή διέγερση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του laser. Ο προσεκτικός έλεγχος της χαμηλής πίεσης είναι απαραίτητος για να πετύχουμε την εκφόρτιση του λαμπτήρα από το ηλεκτρικό δυναμικό, που εφαρμόζεται για τη διέγερση των μορίων των αερίων, που απασχολούν περισσότερο την ένταση των οπτικών δίοδων μεταξύ των καθρεπτών-αντηχείων.

Το συνεχές ρεύμα (DC) και η ραδιοσυχνότητα (RF) με υψηλές τάσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διέγερση των αερίων του laser και η εσωτερική ισχύ που απαιτείται είναι τυπικά μεγαλύτερη κατά 10 φορές από την έξοδο του laser. Το συνεχές ρεύμα μπορεί να εφαρμοστεί είτε με συνεχή κύμα ή με παλμικό τρόπο. Ο μετασχηματιστής είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος.

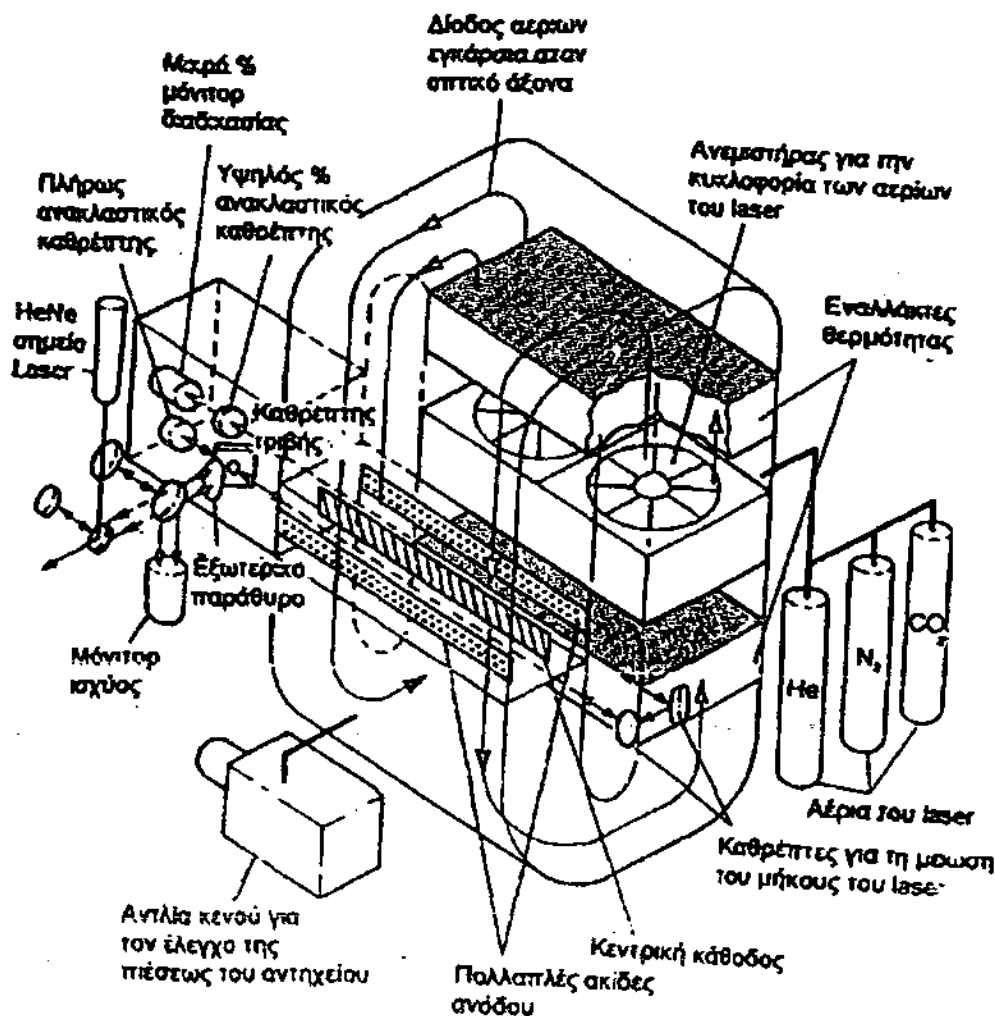


Σχήμα 2.10: Σχηματική άποψη ενός αζονικού CO<sub>2</sub> laser

Τα αέρια οδηγούνται μέσα από ένα συνεχές δακτύλιο διαμέσου του αντηχείου και από ένα σύστημα ανταλλαγής θερμότητας που τα ψύχει και κάνει τη δράση του laser πιο αποδοτική. Υπάρχουν δυο διαφορετικοί τύποι δακτυλίου που εφαρμόζονται στα CO<sub>2</sub> laser. Ο πρώτος τύπος αναφέρεται στην αξονική ροή των αερίων (σχήμα 2.10), όπου τα αέρια διαρρέουν αξονικά τον οπτικό άξονα.

Ο δεύτερος τύπος αναφέρεται στην κατά μήκος ροή, όπου η εκροή γίνεται σε κατεύθυνση 90° από τον οπτικό άξονα (σχήμα 2.11). Τα laser αξονικής ροής, γενικά, παράγουν ακτίνες με μικρότερο αριθμό TEM απ'ότι των laser των κατά μήκος ροής (TEM<sub>00</sub> ή TEM<sub>01</sub>). Πάντως, τα κατά μήκος ροής laser μπορούν να πετύχουν μεγαλύτερες ισχύς για ένα δεδομένο μήκος αντηχείων, που δίνουν τη δυνατότητα για την κατασκευή πιο συμπαγών CO<sub>2</sub> laser, σε μεγάλο εύρος υψηλών ισχύων.

Γενικότερα, τα αξονικά CO<sub>2</sub> laser κυριαρχούν στην αγορά των laser για ισχύ μέχρι 5KW, ενώ τα κατά μήκος CO<sub>2</sub> laser από 5KW ως 25KW.



Σχήμα 2.11: Σχηματική άποψη ενός κατά μήκος CO<sub>2</sub> laser

## 2.2 Εφαρμογές

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία υλικών τα οποία μπορούν να υποστούν κατεργασία με ακτίνες laser. Το laser λειτουργεί με την ίδια λογική που λειτουργούν όλες οι διαδικασίες θερμικής κατεργασίας, όπως η κοπή με οξυγόνο-προπάνιο, με τη διαφορά ότι υπάρχει πρόβλημα στα υλικά που αντανακλούν την ακτίνα. Ιδανικά, ένα υλικό για να είναι εύκολο να κατεργαστεί με ακτίνες laser πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

- ▣ Χαμηλή ανακλαστικότητα
- ▣ Χαμηλή θερμοαγωγιμότητα
- ▣ Χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής
- ▣ Μη αλλοίωση της χημικής του σύνθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες
- ▣ Ελαστικότητα για να μην σπάει από τη θέρμανση

Η κύρια ομάδα υλικών την οποία κατεργάζονται τα laser είναι τα μέταλλα. Οι ακτίνες laser μπορούν να κόψουν ή να συγκολλήσουν χάλυβα, ατσάλι, ανοξείδωτο ατσάλι, τιτάνιο, αλουμίνιο, χαλκό, μπρούτζο κ.λ.π. Μπορούν επίσης, καθώς η κοπή γίνεται χωρίς άσκηση δύναμης, να κόψουν με άνεση πολύ σκληρά μέταλλα, όπως Stellite, χρωμοβανάδιο κ.λ.π. Λόγω του ότι δεν ασκείται δύναμη, μια σειρά από εύθραυστα ή πολύ ελαστικά υλικά μπορούν να υποστούν κατεργασία. Τέτοια υλικά είναι το καουτσούκ, οι σιλικόνες, το μαλακό πλαστικό, ο αφρός πολυουρεθάνης κ.λ.π. Τέλος οι ακτίνες laser μπορούν επίσης να κατεργασθούν πολύ δύσκολα υλικά, όπως γυαλί, ανθρακονήματα, κεραμικά υλικά κ.α.

Μια από τις σημαντικότερες βιομηχανικές εφαρμογές των laser, είναι η χρησιμοποίηση τους στη μεταλλοτεχνία. Οι εφαρμογές των laser περιλαμβάνουν :

- ▣ Διάτρηση
- ▣ Κοπή
- ▣ Συγκόλληση
- ▣ Θερμική κατεργασία
- ▣ Μη καταστρεπτικό έλεγχο
- ▣ Έλεγχο μεταλλικών επιφανειών

Στη σχετικά συντηρητική βιομηχανία της μεταλλοτεχνίας, το laser συνεχίζει να εμφανίζει αργή αλλά σταθερή πρόοδο και σήμερα είναι σε ορισμένους τομείς το μόνο εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Τα laser που χρησιμοποιούνται κυρίως στη μεταλλοτεχνία είναι τα παλμικά συστήματα laser στερεών, όπως είναι το laser ρουβιδίου, το Nd:YAG laser και το laser Nd:Glass. Η υψηλή απόδοση των CO<sub>2</sub> laser έχει επίσης χρησιμοποιηθεί εκτενώς στη μεταλλοτεχνία.

Στα παλμικά laser στερεών, η πολύ μεγάλη παλμική ισχύς, ο υψηλός βαθμός χωρικής και χρονικής συνέχειας, καθώς και η ακρίβεια κατεύθυνσης της ακτίνας κάνουν δυνατή την εστίαση της ακτίνας φωτός σε ένα πολύ μικρό σημείο. Με αυτή τη πυκνότητα οπτικής ακτινοβολίας, το μέταλλο μπορεί να απομακρυνθεί όπως συμβαίνει στην κοπή και στην συγκόλληση.

Η ταχεία αποδέσμευση των ελευθέρων ηλεκτρονίων που στη συνέχεια αλληλεπιδρούν με την ιοντική δομή του μετάλλου, προκαλεί τοπικές βίαιες ακουστικές δονήσεις, που είναι γνωστές ως ακουστικό φωτόνιο. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή μιας έντονης θερμικής αντίδρασης με μια ευρεία περιοχή εκπομπής, που συνοδεύεται από εκτίναξη μεταλλικών σπινθήρων και εξαχνωμένου μετάλλου. Η σημαντικότερη παράμετρος του laser είναι η ισχύς ανά μονάδα εμβαδού της μεταλλικής επιφάνειας. Πυκνότητες ισχύος στην περιοχή από 250 KW/cm<sup>2</sup> μέχρι 50 KW/cm<sup>2</sup> απαιτούνται για την πραγματοποίηση μεταλλοτεχνικών κατεργασιών με τη χρήση laser.

Η επιλογή εξαρτάται από τον τύπο του μετάλλου, την παλμική ενέργεια του laser, την διάρκεια των παλμών, την απόκλιση της ακτίνας και τέλος την εστίαση. Αν η πυκνότητα ισχύος δεν είναι αρκετά υψηλή, τότε η κατεργαζόμενη περιοχή θα παραμείνει κάτω από το σημείο τήξεως. Αν το μήκος των παλμών είναι μικρότερο, τότε θα επιτευχθεί μια υψηλότερη θερμοκρασιακή αύξηση λόγω της θερμικής διάχυσης στο μέταλλο. Σε υψηλή ισχύ λαμβάνουν χώρα εξάχνωση και ρευστοποίηση.

Το ποσοστό του εξαχνούμενου υλικού είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση θερμικών ιδιοτήτων του υλικού. Σε δείγματα χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, το σημείο βρασμού στην επιφάνεια του μετάλλου επιτυγχάνεται εύκολα, αλλά ένα μικρό μόνο ποσό της θερμότητας θα εισχωρήσει στο υλικό και συνεπώς η εξάχνωση πραγματοποιείται μόνο σε ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα.

Για μέταλλα μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας το βάθος του υλικού που εξαχνώνεται είναι επίσης μικρό μια και ένα μεγάλο μέρος της θερμότητας χάνεται λόγω θερμικής αγωγής. Μεγάλα κύματα πίεσης εμφανίζονται στη διαδικασία της εξάχνωσης. Αυτό οφείλεται στη θερμική διαστολή της επιφάνειας του μετάλλου που παράγει κύματα πίεσης που είναι δυνατό να φτάσουν ακόμη και αρκετές ατμόσφαιρες. Τα εξαχνωμένα τεμαχίδια που

εκτοξεύονται, αποτελούνται από μέταλλο που αντιδρά με ισχυρό παλμικό laser, και κυμαίνονται από 20000 μέχρι 50000 cm/sec. Οι ταχύτητες αυτές είναι χαρακτηριστικές της θερμικής κίνησης ενός υλικού που εξαχνώνεται από μια επιφάνεια που έχει φθάσει το σημείο βρασμού της.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως υπάρχουν συγκεκριμένες εφαρμογές, όπου το laser φαίνεται ότι αποτελεί το μόνο σύστημα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Σήμερα υπάρχουν βιομηχανικές προδιαγραφές που απαιτούν διάτρηση, κοπή ή συγκόλληση που πραγματοποιούνται σε διάφορους τύπους υάλινων σωλήνων, και στην κατασκευή υπολογιστών για την ανάπτυξη των κυκλωμάτων.

### **Χειρισμός συσκευών laser**

Υπάρχουν δυο τρόποι κίνησης του συστήματος laser στο χώρο. Ο ένας βασίζεται στη χρήση CNC μηχανών, ο άλλος χρησιμοποιεί robot. Θα εξετάσουμε κάθε μέθοδο χωριστά.

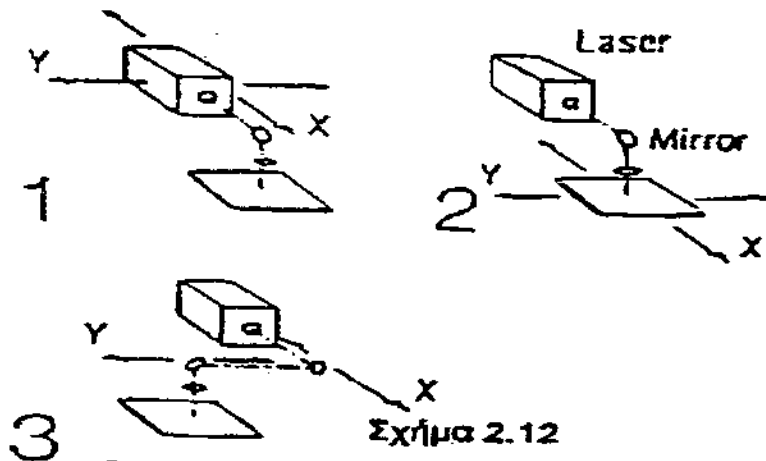
#### **A. Συστήματα CNC**

Τα συστήματα CNC χωρίζονται σε δυο κύριες κατηγορίες : δυο βαθμών ελευθερίας (x-y) και περισσότερων από δυο. Τα πρώτα χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία επίπεδων φύλλων ή αντικειμένων που χρειάζονται μόνο οριζόντια κίνηση (π.χ μια κόλληση μορφής T), ενώ τα άλλα για πιο περίπλοκες εργασίες, ή εργασίες σε 3 διαστάσεις.

Υπάρχουν τρεις τρόποι μετακίνησης της ακτίνας με CNC συστήματα (σχήμα 2.12):

1. Κινούμενο laser.
2. Κινούμενο αντικείμενο.
3. Κινούμενο οπτικό σύστημα.

Οι 3 τρόποι μετακίνησης της ακτίνας laser με CNC συστήματα.  
1.κινούμενο laser. 2.κινούμενο αντικείμενο.3.κινούμενο οπτικό σύστημα



### 1.Κινούμενο laser

Στην πρώτη περίπτωση, οι καθρέπτες και η κεφαλή εστίασης είναι συνδεδεμένα σταθερά και κινούνται μαζί για να ακολουθήσουν την επιθυμητή τροχιά. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για laser ισχύος μέχρι 500W. Αυτού του τύπου τα laser είναι ελαφρά και μπορούν να έχουν εξωτερικό τροφοδοτικό, οπότε είναι σχετικά απλό να τοποθετηθούν σαν μια μονάδα πάνω στο μηχάνημα. Το πρόβλημα είναι ότι με 500W το ελάχιστο πάχος ατσάλιου που μπορεί να κοπεί είναι περίπου 4mm και γενικά η διεισδυτικότητα της μεθόδου είναι περιορισμένη. Η μέθοδος αυτή δεν ταιριάζει για laser μεγαλύτερα από 500W, καθώς αυτά γίνονται πολύ βαριά.

### 2. Κινούμενο αντικείμενο

Στην δεύτερη περίπτωση το κομμάτι κινείται επίπεδα κάτω από μια ακίνητη κεφαλή εστίασης. Καθώς το σύστημα laser δεν κινείται, δεν υπάρχει περιορισμός ισχύος. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για μικρά και ελαφριά κομμάτια. Για μεγάλα κομμάτια όμως γίνεται σπατάλη χώρου και υπάρχει πρόβλημα αδράνειας, που οδηγεί σε ανακρίβειες στην τοποθέτηση των κομματιών. Μια παραλλαγή των μεθόδων 1 και 2 οδηγεί σε μηχανή που το laser κινείται μόνο σε έναν άξονα και το κομμάτι κινείται κατά μήκος του άλλου. Αυτός ο μηχανισμός χρησιμοποιείται κυρίως για επεξεργασία ρολλών μετάλλου.

### 3.Κινούμενο οπτικό

Στην τρίτη περίπτωση το κομμάτι προς επεξεργασία και το laser είναι ακίνητα, οι δε κινήσεις επιτυγχάνονται με δυο κινούμενους καθρέπτες και κινητή κεφαλή εστίασης. Οι ταχύτητες εδώ είναι μεγάλες και δεν υπάρχουν περιορισμοί βάρους ή ισχύος. Τα προβλήματα που υπάρχουν είναι δυο : πρώτον, οι καθρέπτες πρέπει να είναι καλά προστατευμένοι από δονήσεις και όλο το σύστημα απαιτεί μεγάλη ακρίβεια κατασκευής, πράγματα που ανεβάζουν το κόστος.

Η πιο περίπλοκη περίπτωση είναι τα CNC 3 και 5 βαθμών ελευθερίας. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται πάντα χρήση της τεχνικής των κινούμενων οπτικών. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για να καλύψουν μεγάλους όγκους και επίσης για επεξεργασία μεγάλων τρισδιάστατων κομματιών.

#### **B. Συστήματα robot**

Η άλλη λύση είναι η χρήση robot σε συνδυασμό με ένα αρθρωτό σύστημα με σωλήνες, καθρέπτες και αρθρώσεις το οποίο κατευθύνει την ακτίνα στην κεφαλή εστίασης. Το σύστημα αυτό δίνει την μέγιστη ευελιξία στην επεξεργασία. Επιτρέπει την πραγματοποίηση πολύ περίπλοκων κινήσεων με ομαλό τρόπο και επιτρέπει την κατεργασία σε σημεία που είναι πολύ δύσκολο να προσεγγισθούν αλλιώς.

Υπάρχουν και εδώ τρεις τρόποι μετακίνησης της ακτίνας (σχήμα 2.13):

- > Το robot, μετακινεί το αντικείμενο κάτω από μια ακίνητη ακτίνα laser.
- > Το αντικείμενο είναι σταθερό και το robot μετακινεί την άκρη του συστήματος μετάδοσης της ακτίνας laser.
- > Το αντικείμενο είναι σταθερό και το robot έχει ενσωματωμένο και μετακινεί το σύστημα μετάδοσης της ακτίνας laser.

Στην πρώτη περίπτωση, η μονάδα παραγωγής και μετάδοσης της ακτίνας laser είναι σταθερή, ενώ το robot κρατάει και μετακινεί το προς επεξεργασία κομμάτι κάτω από το σημείο δράσης της ακτίνας. Η μέθοδος αυτή είναι ιδανική για επεξεργασία σε μικρά κομμάτια, όπου απαιτείται εργασία υψηλής ακρίβειας. Υπόκεινται βέβαια στον περιορισμό βάρους αντικειμένου από τον τύπο robot που χρησιμοποιείται.

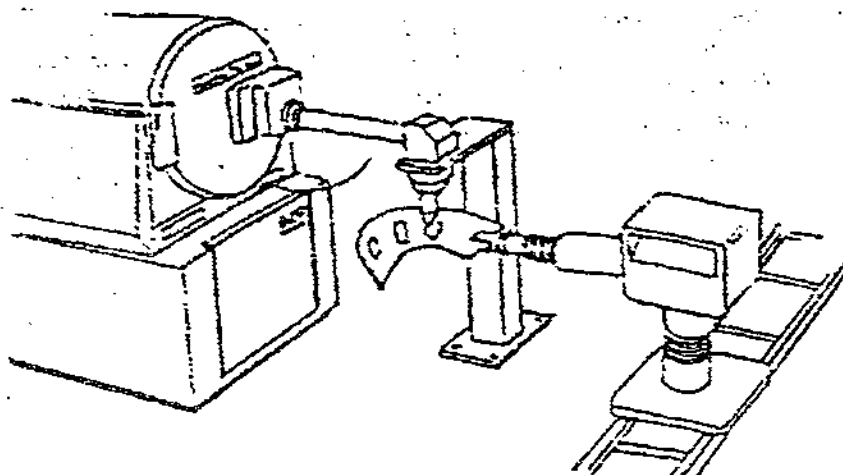
Η δεύτερη περίπτωση είναι η πλέον διαδεδομένη στις βιομηχανίες επεξεργασίας μετάλλου. Παρέχει μεγάλη ευελιξία στην κατεργασία πολύπλοκων αντικειμένων και είναι τελείως ανεξάρτητη από τον όγκο και το βάρος του αντικειμένου. Τα συστήματα



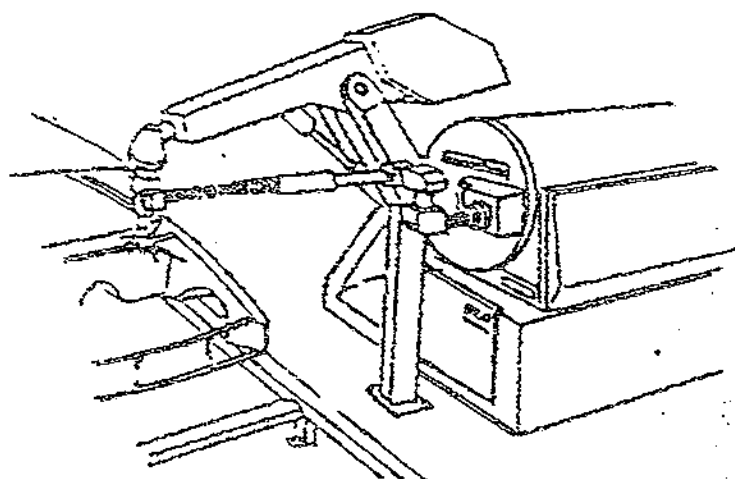
μετάδοσης της ακτίνας laser σήμερα παράγονται μαζικά κάνοντας τα προσιτά για κάποιον χρήστη robot.

Τέλος, η τρίτη περίπτωση είναι και η πιο πολύπλοκη, έχει ερευνηθεί λιγότερο και χρησιμοποιείται από ελάχιστες και πολύ εξειδικευμένες εταιρίες. Είναι ιδανική μέθοδος όταν χρησιμοποιείται μεγάλη ισχύς (π.χ 2500W), αλλά έχει το μειονέκτημα των ακριβών οπτικών συστημάτων και γενικότερα ακριβής κατασκευής που τείνει να είναι σύστημα κατά παραγγελία.

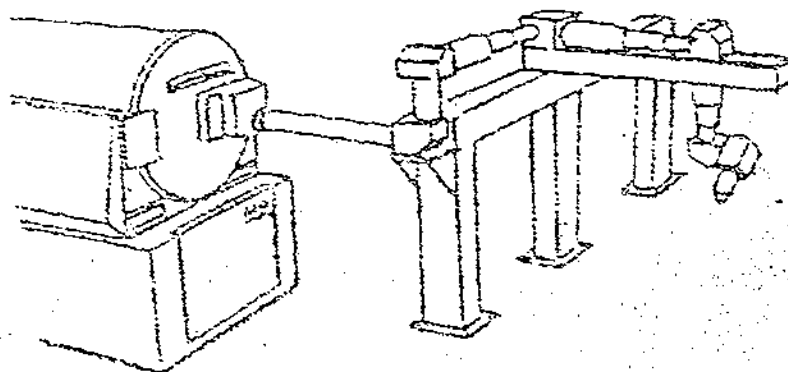
Τύπος 1: Το robot κινεί το αντικείμενο κάτω από ακίνητη ακτίνα



Τύπος 2: Το robot κινεί το σύστημα μετάδοσης της ακτίνας



Τύπος 3: Το robot έχει ενσωματωμένο το σύστημα μετάδοσης



Σχήμα 2.13 Οι τρεις τρόποι μετακίνησης της ακτίνας με robot

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΚΟΠΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ LASER

#### 3.1 Εισαγωγή

Τα βιομηχανικά laser έχουν κερδίσει την αποδοχή ως αποτελεσματικά και αξιόπιστα εργαλεία παραγωγής. Καμιά περιοχή της μεθόδου των laser δεν αναπτύχθηκε τόσο γρήγορα και με τόσο πλατιά αποδοχή, όσο αυτή του laser κοπής. Η πιο σημαντική συμβολή στην ανάπτυξη της βιομηχανίας μπορεί να αποδοθεί τόσο στη μόρφωση και την εμπειρία των κατασκευαστών, όσο και στους χρήστες που αξιοποίησαν τα μοναδικά πλεονεκτήματα της κοπής με laser. Τελικά, οι χρήστες πίεσαν τους κατασκευαστές εργαλείων και laser για βελτιωμένη αξιοπιστία και μεγαλύτερες δυνατότητες της διαδικασίας. Όσο η χρήση των laser γίνεται ευρέως διαδεδομένη, η ανάγκη να κατανοηθούν οι ιδιότητες, τα πλεονεκτήματα και η εφαρμοσιμότητα της διαδικασίας κοπής με laser είναι ουσιώδης.

Οι θεμελιώδεις ιδιότητες των laser, η εκλογή laser (μόνο για CO<sub>2</sub> και Nd:YAG λαμβάνεται υπ' όψιν), η μελέτη συστημάτων, τα κατάλληλα υλικά, η ποιότητα κοπής, εξαρτήματα και παράμετροι κοπής ακολουθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Μερικά ερωτήματα που μπορεί να απαντηθούν παρακάτω είναι:

- α) Ποια πλεονεκτήματα προσφέρει η διαδικασία κοπής με laser.
- β) Η σύγκριση με συμβατικές μεθόδους κοπής.
- γ) Τι κάνει ένα laser κατάλληλο για κοπή.
- δ) Πως κόβει το laser.
- ε) Ποια είδη laser είναι τα πιο κατάλληλα.
- στ) Ποια είναι τα βασικά εξαρτήματα για μηχανές κοπής laser.
- ζ) Ποια είναι τα κατάλληλα υλικά.
- η) Πως προσδιορίζεται ή μετριέται η ποιότητα κοπής.
- θ) Ποιες είναι οι πιο σημαντικές παράμετροι για την κοπή.
- ι) Πως επηρεάζουν αυτές οι παράμετροι την ποιότητα κοπής.

Η επιτυχία όποιας διαδικασίας κοπής με laser εξαρτάται από την προσεκτική μελέτη δύο βασικών περιοχών. Αυτές οι περιοχές είναι η διαδικασία του laser (δηλαδή, το πως χειρίζεται η ακτίνα και πως προσπίπτει στο τεμάχιο) και η διαδικασία της κοπής (η αλληλεπίδραση μεταξύ του laser και του προς κοπή τεμαχίου). Κάθε περιοχή των διαδικασιών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μερικοί απ αυτούς παρατίθενται παρακάτω:

## **I. Χαρακτηριστικά των laser:**

- 1) Τύπος laser και μήκος κύματος (π.χ. CO<sub>2</sub> ή Nd:YAG).
- 2) Ισχύ του laser και τύπος (π.χ. κύμα ή CW).
- 3) Ποιότητα ακτίνας (π.χ. ικανότητα εστίασεως).
- 4) Μέγεθος ακατέργαστης ακτίνας (π.χ. απόκλιση).
- 5) Εστιακή απόσταση.
- 6) Μέγεθος εστιασμού.
- 7) Βάθος εστίασης.
- 8) Πυκνότητα ισχύος, πυκνότητα ενέργειας και ενέργεια κοπής.
- 9) Πόλωση.
- 10) Διαδικασία παροχής ακτίνας.
- 11) Διαδικασίες συστήματος.

## **II. Χαρακτηριστικά διαδικασίας κοπής:**

1. Καταλληλότητα υλικών (π.χ. κατάσταση, της επιφάνειας, ανακλαστικότητα, και απορροφητικότητα, πάχος, πυκνότητα, θερμοκρασία ατμοποίησης, θερμοχωρητικότητα και διαχυτότητα).
2. Ποιότητα κοπής (π.χ. πλάτος εγκοπής, κωνικότητα, ομαλότητα/ τραχύτητα).
3. Κατάσταση της επιφάνειας του μετάλλου.
4. Θέση εξαρτημάτων.
5. Παράμετροι κοπής (π.χ. ισχύς και πυκνότητα ισχύος, ταχύτητα, εστιακή απόσταση και θέση εστίασης, τύπος και πίεση βοηθητικού αερίου, σχεδιασμός ακροφυσίου αερίου, μέγεθος στομίου εκροής).

Η θεωρία της διαδικασίας των laser αναφέρεται στο σύνολο των παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν πόσο επιτυχημένα η εστιασμένη ενέργεια συσχετίζεται με το υλικό, και πόσο αποτελεσματικά αυτή η ενέργεια χρησιμοποιείται στην διαδικασία κοπής.

### **3.1.1 Μερικά πλεονεκτήματα της κοπής με laser**

Από τη στιγμή που η ακτίνα του laser μπορεί να συγκεντρωθεί, ώστε να παράγει ένα μικρό σημείο υψηλής έντασης ενέργειας, η κοπή με laser προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους κοπής (όπως η διάτμηση ή η κοπή με πλάσμα).

• **Πρώτον**, η μεγάλη θερμική ενέργεια των laser περιέχεται σε μια εξαιρετικά μικρή περιοχή έτσι ώστε να παρέχεται για τα εξής:

1. Στενές εγκοπές με ευθείες ακμές και γενικά καλή εμφάνιση (στις περισσότερες περιπτώσεις τα τεμάχια δεν απαιτούν επιπρόσθετη διαδικασία καθαρισμού).
2. Ελάχιστες ζώνες θερμικού επηρεασμού παρακείμενες στην ακμή κοπής.
3. Ελάχιστη απορρόφηση θερμότητας, η οποία οδηγεί σε μηδενική παραμόρφωση του τεμαχίου.
4. Μπορούν να κοπούν μικρές τρύπες (με διάμετρο μικρότερη από το πάχος του τεμαχίου).
5. Ο τέλειος έλεγχος του μέσου όρου της ισχύος εξαλείφει το υπερβολικό κάψιμο κατά την επιτάχυνση και την επιβράδυνση.

• **Δεύτερον**, από την στιγμή που το φως δεν εξασκεί καμία δύναμη στο τεμάχιο, τα laser είναι εργαλεία κοπής μη επαφής, το οποίο σημαίνει:

- 1) Καμία μηχανική παραμόρφωση στο τεμάχιο.
- 2) Σε πολλές περιπτώσεις δεν απαιτούνται σύνδεσμοι.
- 3) Δεν υπάρχει φθορά σε εργαλεία, ώστε να απαιτείται συντήρηση ή αντικατάσταση.
- 4) Δυνατότητα για κοπή υλικών, αδιαφορώντας για την σκληρότητα τους.
- 5) Υπολογίσιμος λιγότερος θόρυβος συγκρινόμενος με μηχανικές τεχνικές, κοπή με πλάσμα ή με εκτοξευτήρες νερού.

• Επιπρόσθετα, η ακτίνα φωτός από το laser έχει υψηλό βαθμό ελέγχου και ευελιξίας, που προσφέρει:

1. Ευκολία για κοπή πλήθους υλικών και σχημάτων (ιδανικό για πλήθος μικρών μεγεθών, ανάπτυξη πρωτοτύπων και άμεση κατασκευή).
2. Ευκολία στην ολοκλήρωση και εύκολα ελεγχόμενη με αυτοματοποιημένο εξοπλισμό (π.χ. CNC).
3. Απεριόριστη δυνατότητα κάθετων τομών (δεν υπάρχουν ακμές κοπής).
4. Πλήρης εκμετάλλευση του υλικού.
5. Δυνατότητα κοπής σε περιοχές που είναι δύσκολο να γίνει με άλλες τεχνικές.

**Μερικά από τα μειονεκτήματα τα οποία πρέπει να λάβουμε υπόψη είναι:**

- 1) Υψηλό κόστος κεφαλαίου σε σχέση με άλλες τεχνικές (ωστόσο, το κόστος λειτουργίας είναι μικρότερο σε σχέση με άλλες μεθόδους).
- 2) Σκληρές και συχνά ψαθυρές ακμές μπορεί να εμφανιστούν σε σκληρυμένα υλικά.
- 3) Σε κάποια υλικά μπορεί να συμβούν μικρορωγμές στις ακμές κοπής.

4) Κατά την κοπή κάποιων υλικών για laser, παράγονται τοξικές αναθυμιάσεις.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, μερικές εφαρμογές-κλειδιά της κοπής με laser είναι φανερές:

- \* Μικρή προς μεσαία παραγωγή ή παραγωγή πρωτοτύπων.
- \* Ευαίσθητα και μικρής ανοχής εξαρτήματα.
- \* Υψηλής αντοχής ή αντοχής στην τριβή υλικών.

### **3.2 Σύγκριση με άλλες μεθόδους**

Για να κατανοήσουμε την χρήση των laser, είναι χρήσιμο να σκεφτούμε που διαφέρουν από τις άλλες μηχανικές μεθόδους. Το σημείο κλειδί που πρέπει να προσεχθεί, είναι ότι το laser συναγωνίζεται αποτελεσματικά ενάντια των ικανοτήτων μεγάλου εύρους διαδικασιών και τεχνικών, και αυτό επειδή έχει τρομερή ευελιξία.

#### **3.2.1 Θερμικές διαδικασίες**

Όπως με τη χρήση ενός laser, αυτές οι μέθοδοι εκπέμπουν μια πηγή θερμικής ενέργειας μη επαφής σε ένα μετακινούμενο τεμάχιο. Ωστόσο, οι εναλλακτικές αυτές μέθοδοι υστερούν στην ικανότητα να συγκεντρώνουν την θερμική ενέργεια σ' ένα τόσο μικρό σημείο όσο το laser. Γι' αυτό, τείνουν να παρέχουν υπερβολική θερμότητα στο μέταλλο, με αποτέλεσμα πλατιές εγκοπές, μεγαλύτερες θερμικά επηρεαζόμενες ζώνες και τελικά μεγαλύτερο ενδεχόμενο για θερμική παραμόρφωση του τεμαχίου. Αυτές οι θερμικές μέθοδοι συναγωνίζονται τα laser στην κοπή μεταλλικών εξαρτημάτων [πάχους μικρότερου από 25 mm (1")], αλλά το laser είναι το μόνο από τις θερμικές μεθόδους που παρέχει ικανοποιητικό αποτέλεσμα και για μη μέταλλα.

#### **3.2.2 Κοπή με O<sub>2</sub>(OFC)**

Αυτή η διαδικασία κοπής βασίζεται σε μια χημική αντίδραση μεταξύ του O<sub>2</sub> και του μετάλλου βάσης, το οποίο έχει θερμανθεί με φλόγα (τα κοινά αέρια είναι το ακετυλένιο και το προπάνιο) πάνω από τη θερμοκρασία ανάφλεξης του υλικού [π.χ. 870°C ή (1600°F) είναι η θερμοκρασία στην οποία ο σίδηρος αρχίζει να καίγεται παρουσία O<sub>2</sub>]. Αυτό περιορίζει την OFC να χρησιμοποιείται βασικά σε μαλακό χάλυβα, αν και η χρήση χημικής ή μεταλλικής σκόνης μπορεί να βοηθήσει να ξεπεραστεί η μειωμένη οξειδωση των προσθετικών, όπως το χρώμιο και το νικέλιο σε κράματα σιδήρου. Είναι εύχρηστο, έχει χαμηλό κόστος κεφαλαίου και η ικανότητα να κόβει ασάβι πάχους πάνω από 2mm κάνει την OFC ένα ευέλικτο εργαλείο

κοπής. Ωστόσο, εξαιτίας της υψηλής προσφοράς θερμότητας, έχει μικρή ακρίβεια στις διαστάσεις και χαμηλό ρυθμό μετακίνησης και έτσι σπάνια επιλέγεται για κοπή υλικών πάχους λιγότερο από 25 mm (1"). Το πλάτος των εγκοπών είναι πάντα παραπάνω από λίγα χιλιοστά.

### 3.2.3 Κοπή με πλάσμα (PAC)

Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει ένα τόξο υψηλής έντασης ρεύματος διαμέσου ενός ακροφυσίου από ένα ηλεκτρόδιο στο τεμάχιο. Οι υψηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται είναι ικανές να λιώσουν τα περισσότερα μέταλλα, ενώ το υψηλής ταχύτητας μερικώς ιονισμένο αέριο εκδιώχνει το τηγμένο μέταλλο από την εγκοπή. Ενώ οι ρυθμοί κοπής είναι αρκετά γρηγορότεροι από την OFC και είναι στο ίδιο μήκος κύματος με το υψηλής ενέργειας laser, συχνά χρειάζεται να λαμβάνονται προφυλάξεις για να διατηρείται μια καλή ποιότητα κοπής. Για παράδειγμα, απαιτείται η αντικατάσταση των καταναλισκόμενων τεμαχίων (π.χ. ακροφύσια) για να διατηρήσουμε μια καλή ποιότητα κοπής. Αυτό οδηγεί σε λειτουργικό κόστος το οποίο είναι υψηλότερο σε σύγκριση με την κοπή με laser. Επιπρόσθετα, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα προστασίας λόγω της παραγωγής υπεριώδους ακτινοβολίας από το τόξο.

Γενικά η κοπή με πλάσμα παράγει κοπή η οποία έχει φαρδύτερη εγκοπή και κυματοειδή μορφή κατά μήκος της ακμής, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ακρίβειας κοπής καθώς και τον περιορισμό των λεπτομερειών που μπορούν να κοπούν. Ακόμα ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της κοπής με πλάσμα υλικού με πάχος μεγαλύτερο των 6mm (0.25"), είναι για εγκοπή με λοξοτομή στην μια μόνο ακμή. Αυτό φυσικά δεν είναι δυνατόν να προσφερθεί από μία κοινή γραμμική κοπή (όπου μια ακμή κοπής είναι κοινή για δύο ή περισσότερα τεμάχια).

Η πρόσφατη ανάπτυξη της κοπής με πλάσμα (μερικές φορές αναφέρεται ως «υψηλής σαφήνειας», «ακρίβειας» ή «καθαρή» κοπή με πλάσμα), έχει κάνει υπολογίσιμες βελτιώσεις στην ποιότητα κοπής. Ωστόσο, η κοπή με πλάσμα απαιτεί όχι μόνο ένα υψηλό ρυθμό αντικατάστασης των καταναλισκόμενων, αλλά είναι και πολύ ευαίσθητη στην ποιότητα των καταναλισκόμενων. Αυτό τελικά επιδρά στην διαδικασία η οποία είναι δύσκολο να λειτουργήσει ανεξάρτητα. Η κοπή με πλάσμα είναι γενικά ανταγωνιστική προς τα laser για κοπή μαλακού χάλυβα πάχους μεγαλύτερου των 9,5mm (0,38") και κραμάτων αλουμινίου και ανοξείδωτου χάλυβα πάχους μεγαλύτερου των 6,4mm (0,25").

### 3.2.4 Μηχανικές ιδιότητες

Τα συστήματα κοπής με laser παρέχουν πλεονεκτήματα τα οποία υπερνικούν τα προβλήματα που σχετίζονται με την επαφή ενός τεμαχίου με μια κοφτερή ακμή. Τα μηχανικά

μέσα (όπως η διάτρηση, διάτμηση και το πριόνισμα) χαρακτηρίζονται από την ανάγκη ύπαρξης μιας ακίνητης σύνδεσης, δυσκολίας χειρισμού, σκληρών και ψαθυρών υλικών, παραμορφωμένες ή τραχιές ακμές, καθώς και την ανάγκη για συνεχές τρόχισμα ή αντικατάσταση των κοπτικών εργαλείων. Εάν αυτά τα προβλήματα είναι σημαντικά για τον χρήστη, τότε τα laser μπορούν να αποδειχτούν μια βιώσιμη εναλλακτική λύση.

### **3.2.5 Χάραξη**

Η χρήση των καλουπιών για την κοπή μεγάλων ποσοτήτων τεμαχίων επιφέρει τόσο ένα χαμηλό κόστος ανά τεμάχιο, όσο και ένα συντομότερο κύκλο παραγωγής (π.χ. υψηλός ρυθμός παραγωγής): Το καλούπιασμα ωστόσο δεν είναι τόσο ευαίσθητο στον σχεδιασμό αλλαγών, όσο τα προγραμματιζόμενα συστήματα laser. Ο υψηλός χρόνος προετοιμασίας και το υψηλό κόστος των νέων καλουπιών κάνουν το laser ανταγωνιστικό για μικρές ή μεγάλες παραγωγές. Επιπλέον, τα laser επιτρέπουν την λιγότερη απώλεια υλικού, ενώ το καλούπιασμα απαιτεί την καθαρότητα της περιοχής γύρω από το κάθε τεμάχιο.

### **3.2.6 Διάτρηση**

Ο εξοπλισμός της διάτρησης προσφέρει μεγάλη ευελιξία, αλλά είναι περιορισμένος σε χαμηλούς ρυθμούς παραγωγής. Καλύπτει το κενό για κατασκευή τεμαχίων τα οποία είναι πολύ μεγάλα για χρήση πρακτικών καλουπιών. Η εναλλαξιμότητα των εργαλείων επιτρέπει ακόμα και σύνθετα περιγράμματα, αλλά οι ακμές που προκύπτουν ίσως απαιτούν και δεύτερη προετοιμασία των ακμών.

Η διάτρηση από το εργαλείο δημιουργεί πλατιές εγκοπές σε σύγκριση με άλλες μηχανικές μεθόδους (όπως και των laser) και γι' αυτό δημιουργεί υπολογίσιμη ποσότητα αποβλήτων. Ακόμα απαιτείται κάποιος χρόνος προετοιμασίας ο οποίος μειώνει την ευελιξία.

### **3.2.7 Διάτμηση (ευθείες ακμές)**

Εκτός και αν υπάρχουν προφανή προβλήματα επαφής με το τεμάχιο ή προβλήματα με την επακόλουθη ακμή που παράγεται (στρογγυλεμένες άνω ακμές με διατμημένες σχισμές) τα laser δεν υπολογίζονται απ' ευθείας εναντίον των δυνατοτήτων της διάτμησης.

### **3.2.8 Πριόνισμα**

Καθώς αντιτίθενται στο laser, τα πριόνια και οι κοπτικοί τροχοί γενικά έχουν ρυθμούς κοπής που δεν εξαρτώνται από το πάχος του υλικού. Για λεπτά υλικά οι ταχύτητες είναι σημαντικά πιο μικρές από τα laser, αλλά το εύρος του πάχους το οποίο μπορούν να



χειριστούν είναι μεγαλύτερο. Το laser στην πραγματικότητα θεωρείται περιγραμματοκό εργαλείο, το οποίο μπορεί εύκολα να χειρίζεται προς όποια σχεδόν κατεύθυνση και από όποιο σημείο ενός τεμαχίου, ικανότητα η οποία συνήθως δεν απαιτείται κατά την αγορά ενός πριονιού (με την πιθανή εξαίρεση των πριονιών μορφοποίησης, για κοπή κάποιων μη μεταλλικών υλικών).

### 3.2.9 Κοπή με εκτοξευστήρες νερού

Το υψηλής πίεσης νερό (ή μίγμα νερού/ μέσου λείανσης) σε μια πίεση της τάξης των 2.700-5.000 bar (40.000-80.000 psi) εκτοξεύεται από μια τρύπα μικρής διαμέτρου για να επιφέρει το αποτέλεσμα της κοπής ενός εργαλείου για παραγωγή μεγάλης ποικιλίας μετάλλων ή μη μετάλλων. Όπως και το laser, δεν υπάρχει επαφή μεταξύ του ακροφυσίου και του τεμαχίου. Ωστόσο, η υδάτινη δέσμη εξασκεί δύναμη πάνω στην επιφάνεια προς κοπή (αρκετή για να παραμορφώσει μια λεπτή επιφάνεια), γιατί η δέσμη νερού κόβει λόγω διάβρωσης. Με μίγμα νερού και μέσου λείανσης, σκληρά κομμάτια από πυρίτιο, γρανίτη ή οξειδία του αλουμινίου με υψηλές ταχύτητες (περίπου 500m/sec ή 1500 ft/sec) διαβρώνουν το τεμάχιο.

Ο θόρυβος της κοπής είναι μεγάλος σε σχέση με την κοπή με laser, ακόμα και την υψηλής πίεσης κοπή με laser. Εξαιτίας του μεγαλύτερου πλάτους εγκοπών που επακολουθούν της δέσμης νερού (γενικά μεγαλύτερων των 2,0mm ή 0,08") η κοπή περίπλοκων τεμαχίων, δεν είναι δυνατή. Από την στιγμή που το μέσο λείανσης δεν μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί, αυτό προκαλεί ένα μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας της κοπής με δέσμη νερού, σε σχέση με την κοπή με laser. Μια ακόμη έννοια κατά την κοπή μετάλλων είναι η διάθεση του μίγματος μέσου λείανσης μετάλλου (ειδικά όταν περιλαμβάνει συγκεκριμένα βαριά μέταλλα).

Η δέσμη νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κοπή πλήθους υλικών σε στοίβες, ανόμοιων θερμικών διαδικασιών στα όποια η θερμότητα που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της κοπής μπορεί να συγκολλήσει τα στρώματα μεταξύ τους. Η κοπή με εκτοξευτήρες νερού είναι ιδανική για ινώδη και χοντρά αμέταλλα και τα συνθετικά τους (π.χ. αφρολέξ και υαλοβάμβακα). Ακόμα, όταν χειριζόμαστε τιτάνιο, η κοπή με εκτοξευτήρα νερού προσφέρει μια πολύ καλή εναλλακτική λύση. Η κοπή με εκτοξευτήρες νερού είναι καλή επιλογή, εάν η επανάτηση ή η ζώνη θερμικής επίδρασης (Θ.Ε.Ζ.) από την θερμική κοπή είναι μη αποδεκτή για κράματα αλουμινίου. Ωστόσο, η κοπή με εκτοξευτήρες νερού είναι πολύ πιο αργή από την κοπή με laser σε πάχη όπου οι δύο συναγωνίζονται (π.χ. πάνω από περίπου 16mm 0,6").

### 3.2.10 Ηλεκτρικές διαδικασίες

Η χρήση ηλεκτρικής κατεργασίας εκφόρτισης (EPM) της ηλεκτρομηχανικής κατεργασίας (ECM) είναι κοινή για επεξεργασία ακρίβειας σκληρομένων μετάλλων από την στιγμή που αυτές οι μέθοδοι, όπως τα laser, δεν έρχονται σε επαφή με το τεμάχιο. Χρησιμοποιεί την διάβρωση ή το διαλυτικό αποτέλεσμα μιας ηλεκτρικής εκφόρτισης για να χαράξουν την κοπή. Ενώ η ομαλότητα της ακμής είναι γενικά ανώτερη από αυτής του laser, για πάχος μεγαλύτερο των 3mm (0,12"), η ταχύτητα περιορίζεται σημαντικά. Από την άλλη, δεν έχουν βάθος εστίασης το οποίο αποκλείει τα laser από το να κόψουν χοντρά μέταλλα. Μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής είναι δυνατή σε ορισμένες περιπτώσεις με τεχνικές ηλεκτρικής εκκένωσης με τη χρήση πολλαπλών ηλεκτροδίων. Από την στιγμή που οι ταχύτητες κοπής είναι μεγαλύτερες και η ομαλότητα των ακμών είναι συγκρίσιμη, τα laser προτιμούνται για κοπή οπών σε μεταλλικά φύλλα εξαρτημάτων ή κατασκευή τουρμπίνων.

Στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η σύγκριση διαφόρων μεθόδων κοπής με την κοπή με laser.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1**

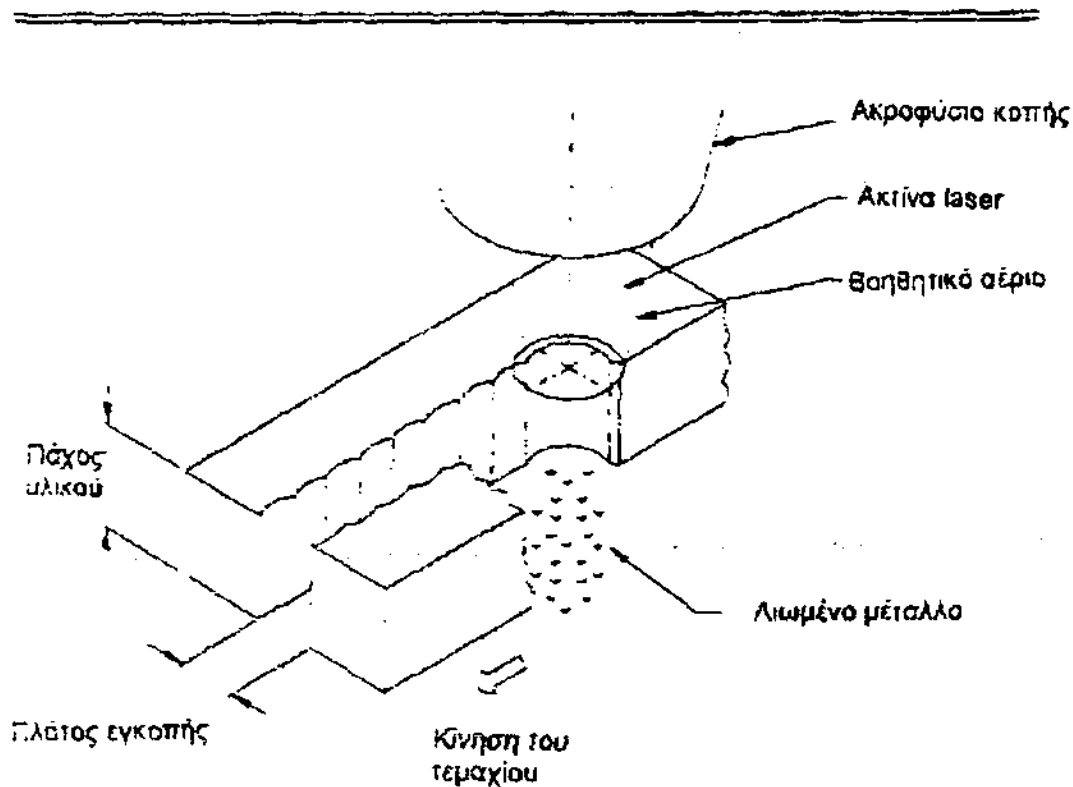
<b>ΜΕΘΟΔΟΣ</b>	<b>ΠΑΧΟΣ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΡΑΚΤΙΚΑ mm(inch)</b>	<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>
Κοπή με αέριο ή O <sub>2</sub>  OFC	1220(48)	Χαμηλό κόστος, φορητό, εύκολο στη χρήση	Αργή, όχι μεγάλη ακρίβεια, μεγάλες εγκοπές, μεγάλη Θ.Ε.Ζ, θερμική παραμόρφωση αναθυμιάσεις,μόνο μέταλλα
Κοπή με πλάσμα PAC	50(2)	Χαμηλό κόστος κεφαλαίου κτήση, φορητό	Περιορισμένη ακρίβεια, μεγάλες εγκοπές, μεγάλο Θ.Ε.Ζ, θερμική παραμόρφωση, θόρυβος, υπεριώδεις ακτίνες σκόνη και μέταλλα μόνο, υψηλό κόστος αναλώσιμων
LASER	20(0.75)	Υψηλή ταχύτητα και ακρίβεια, ευελιξία	Υψηλό κόστος κτήσεως, περιορισμός πάχους, αναθυμιάσεις,περιορισμός υλικών
Κοπή με εκτοξευτήρες νερού	150(6) μη μεταλλικά 25(1) μέταλλα	Κόβει οποιοδήποτε υλικό, όχι Θ.Ε.Ζ, όχι αναθυμιάσεις, όχι σκουριά, όχι επανάτηση, Κόβει σωρό από υλικά	Υψηλό κόστος λειτουργίας, Φθορά εργαλείων, μεγάλες εγκοπές, θόρυβος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκουριασμένα μέταλλα
Διάτρηση	13(0.5)	Το χαμηλότερο κόστος ανά τεμάχιο για μεγάλο όγκο παραγωγής,ακρίβεια, αξιοπιστία	Θορυβώδες,παραμόρφωση ακμών διάτμησης,απαιτεί μόνιμη σταθερή επεξεργασία και καλούπι
Χάραξη	3(0.12)	Γρήγορη, χαμηλό κόστος ανά τεμάχιο	Υψηλό κόστος αναστροφής και χρονοβόρο, μεγάλη ποσότητα αποβλήτων, μόνο μέταλλα
Σύρμα EDM	100(4)	Υψηλότερη ακρίβεια, Υψηλή ποιότητα ακμών, Όχι επαφή	Αργή, φθορά ηλεκτροδίων, μόνο μέταλλα, κόστος σύρματος

### 3.3 Θεωρία της διαδικασίας κοπής

Η ακτίνα laser περιλαμβάνεται σε μια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία είναι τόσο υψηλή μονοχρωματική (μονό μήκος κύματος) όσο και συνδεδεμένη (σε φάση). Η ικανότητα του laser είναι πρωταρχικά αποδιδόμενη σε αυτά τα δύο χαρακτηριστικά, τα οποία επιτρέπουν στην ακτίνα να εστιαστεί σ' ένα πολύ μικρό σημείο [χαρακτηριστικά 0,1mm (0,0004") έως 0,4mm (0,015")]. Από τη στιγμή που η ισχύς του laser συγκεντρώνεται σ' ένα σχετικά μικρό σημείο, η επακόλουθη πυκνότητα ισχύος (ο λόγος της ισχύος του laser προς την εστιαζόμενη περιοχή) στο κομμάτι είναι χαρακτηριστικά μεγαλύτερη από  $10^6 \text{ Watts/cm}^2$  ή  $6 \times 10^6 \text{ Watts/in}^2$ .

Σε περιπτώσεις πυκνότητας ισχύος αυτού του μεγέθους, συμβαίνει η ταχεία τήξη, η ατμοποίηση ή η αποσύνθεση πολλών υλικών, (αυτών που δεν ανακλούν, άγουν ή διαχέουν την ενέργεια από την εστιαζόμενη ακτίνα του laser), η οποία δημιουργεί οπές και επιτρέπει την εξαγωγή του λιωμένου υλικού (σχήμα 3.1). Καθώς το τεμάχιο κινείται ως προς την ακτίνα, το λιωμένο, ατμοποιημένο ή αποσυντιθεμένο υλικό μπορεί να εκβάλλεται συνεχώς, παρέχοντας ως εκ τούτου την πράξη της κοπής.

#### ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ ΜΕ LASER



Σχήμα 3.1: Αρχές της κοπής με laser.

Αυτή η διαδικασία κάνει δυνατή την κοπή για πάχος αρκετών εκατοστών.

Τα συστήματα κοπής με laser συνδυάζουν την ενέργεια (θερμότητα) της εστιαζόμενης ακτίνας, μαζί με ένα βοηθητικό αέριο το οποίο παρέχεται διαμέσου ενός ακροφυσίου ομοαξονικά με την εστιαζόμενη ακτίνα. Η υψηλής ταχύτητας δέσμη αερίου εξυπηρετεί ως εξής:

1. Βοηθά την απομάκρυνση υλικού εκκενώνοντας το ρευστό, ατμοποιημένο ή αποσυντεθειμένο υλικό διαμέσου της πίσω πλευράς του τεμαχίου.
2. Προστατεύει τους φακούς από τυχόν «πιτσιλίσματα» από την ζώνη κοπής Σε μερικούς συνδυασμούς υλικών και αερίων αυξάνεται ο ρυθμός κοπής.

### **3.4 Μελέτη των LASER**

#### **3.4.1 Γενικά**

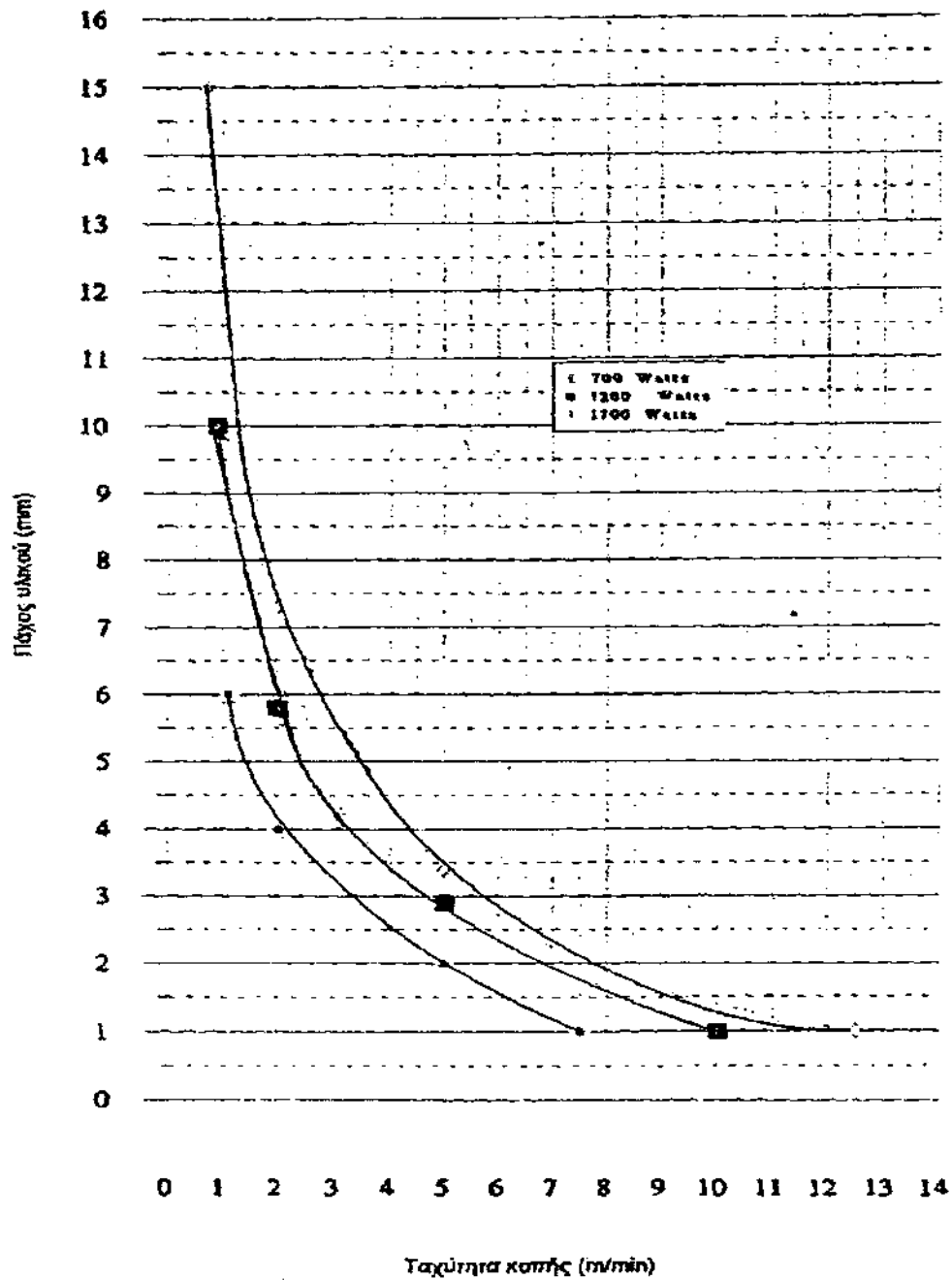
Αν και υπάρχουν πολλοί τύποι laser, μόνο τα laser CO<sub>2</sub> και Nd:YAG βρίσκονται συχνά σε βιομηχανικές εφαρμογές. Αντιπροσωπευτικές ταχύτητες κοπής για laser CO<sub>2</sub> και Nd:YAG σε διάφορα επίπεδα ενέργειας, παρουσιάζονται στα σχήματα 3.2, 3.3, 3.4 και 3.5. Η επιλογή του τύπου laser (μήκος κύματος) είναι χαρακτηριστική συνάρτηση του τύπου του υλικού που θέλουμε να κόψουμε (πόσο καλά απορροφά την ισχύ του laser ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος), καθώς και της γεωμετρίας του τεμαχίου, του πάχους του, της ποιότητας και ταχύτητας κοπής. Γενικά το μήκος κύματος του Nd:YAG απορροφάται καλύτερα από το μήκος κύματος του laser του CO<sub>2</sub>, από τα περισσότερα μέταλλα.

Η χρήση των οπτικών ινών για την παροχή της ακτίνας κατέχει την πιο σημαντική θέση για την ευελιξία σε σχέση με το χαμηλό κόστος της κοπής με laser σε τρεις διαστάσεις. Αρκετές από τις πρωταρχικές θεωρίες για την επιλογή μεταξύ Nd:YAG και CO<sub>2</sub> laser ακολουθούν παρακάτω.

#### **Χαρακτηριστικά των CO<sub>2</sub> laser**

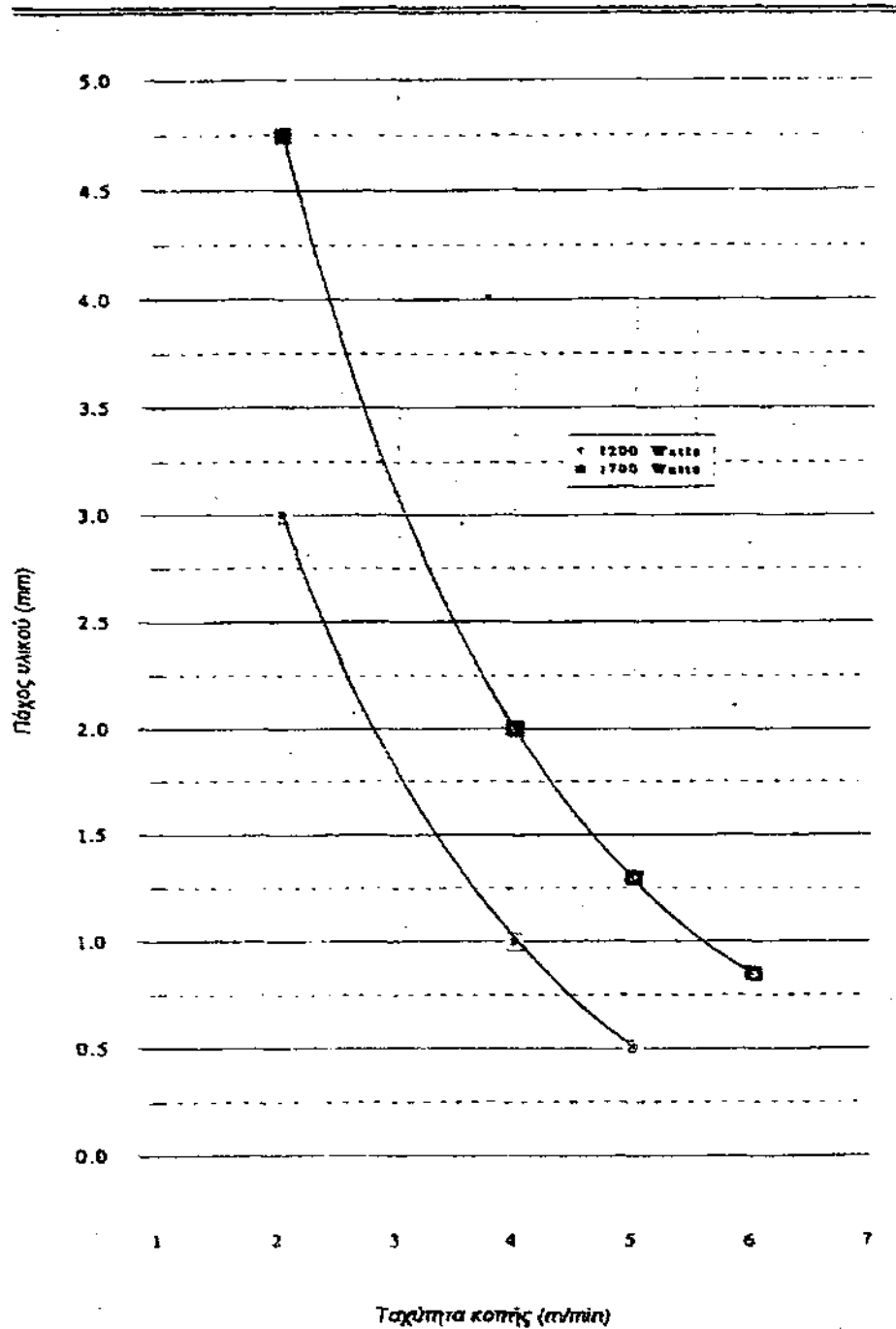
- A) Υψηλότερη ισχύ.
- B) Καλύτερη ικανότητα εστίασης (δηλ. ποιότητα ακτίνας), γενικά μικρότερες εγκοπές και ανώτερη ποιότητα κοπής.
- C) Υψηλότερες ταχύτητες κοπής σε υλικά που δεν ανακλούν το μήκος κύματος του CO<sub>2</sub>.
- D) Μεγαλύτερο πάχος υλικού για υλικά που δεν ανακλούν το μήκος κύματος του CO<sub>2</sub>.
- E) Μικρότερο κόστος μέτρων προφύλαξης με το CO<sub>2</sub>.
- F) Χαμηλότερο κεφάλαιο και κόστος λειτουργίας.

**Αντιπροσωπευτικές ταχύτητες κοπής με CO<sub>2</sub> laser για μαλακό χάλυβα με βοηθητικό αέριο οξυγόνο**



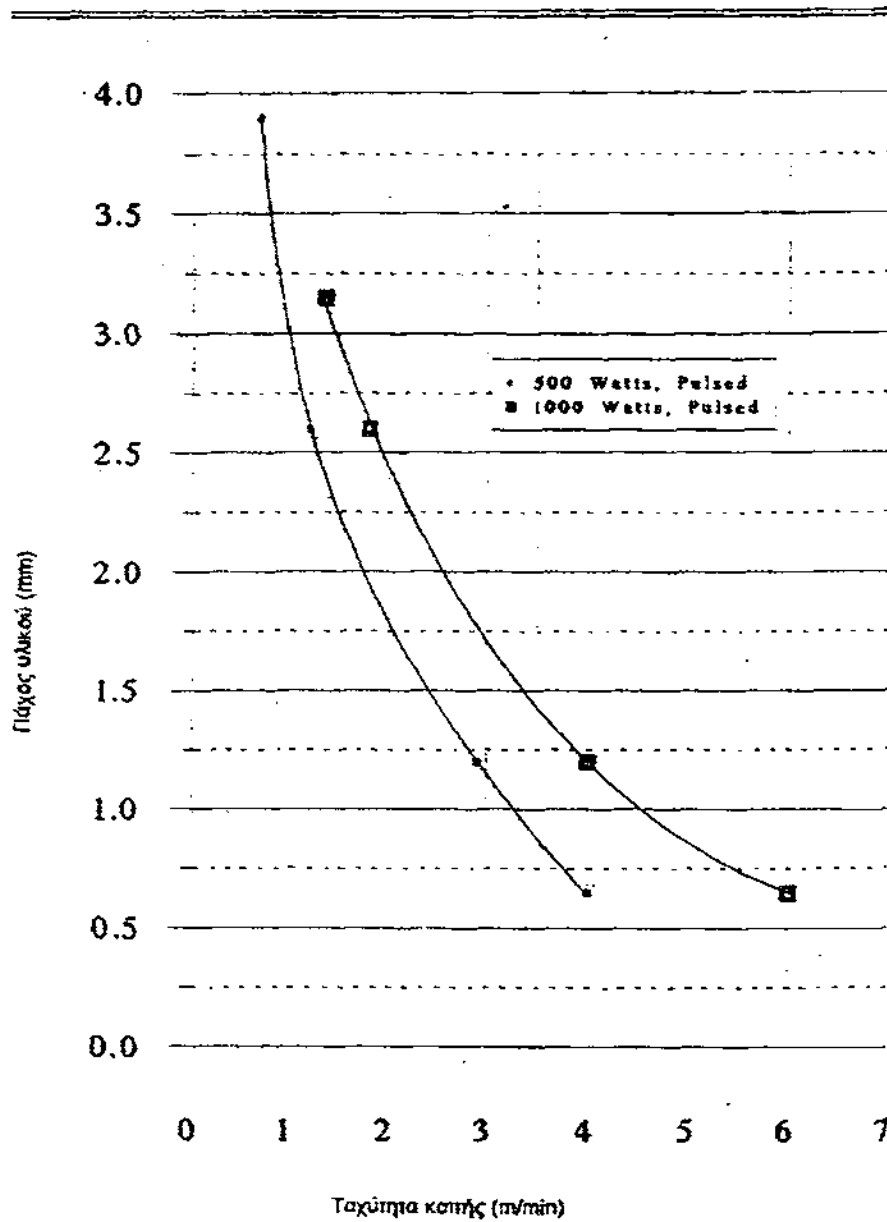
Σχήμα 3.2. Αντιπροσωπευτικές ταχύτητες κοπής με CO<sub>2</sub> laser για μαλακό χάλυβα με βοηθητικό αέριο οξυγόνο

**Αντιπροσωπευτικές ταχύτητες κοπής με CO<sub>2</sub> laser για ανοξείδωτο χάλυβα με βοηθητικό αέριο άζωτο**



Σχήμα 3.3. Αντιπροσωπευτικές ταχύτητες κοπής με CO<sub>2</sub> laser για ανοξείδωτο χάλυβα με βοηθητικό αέριο άζωτο

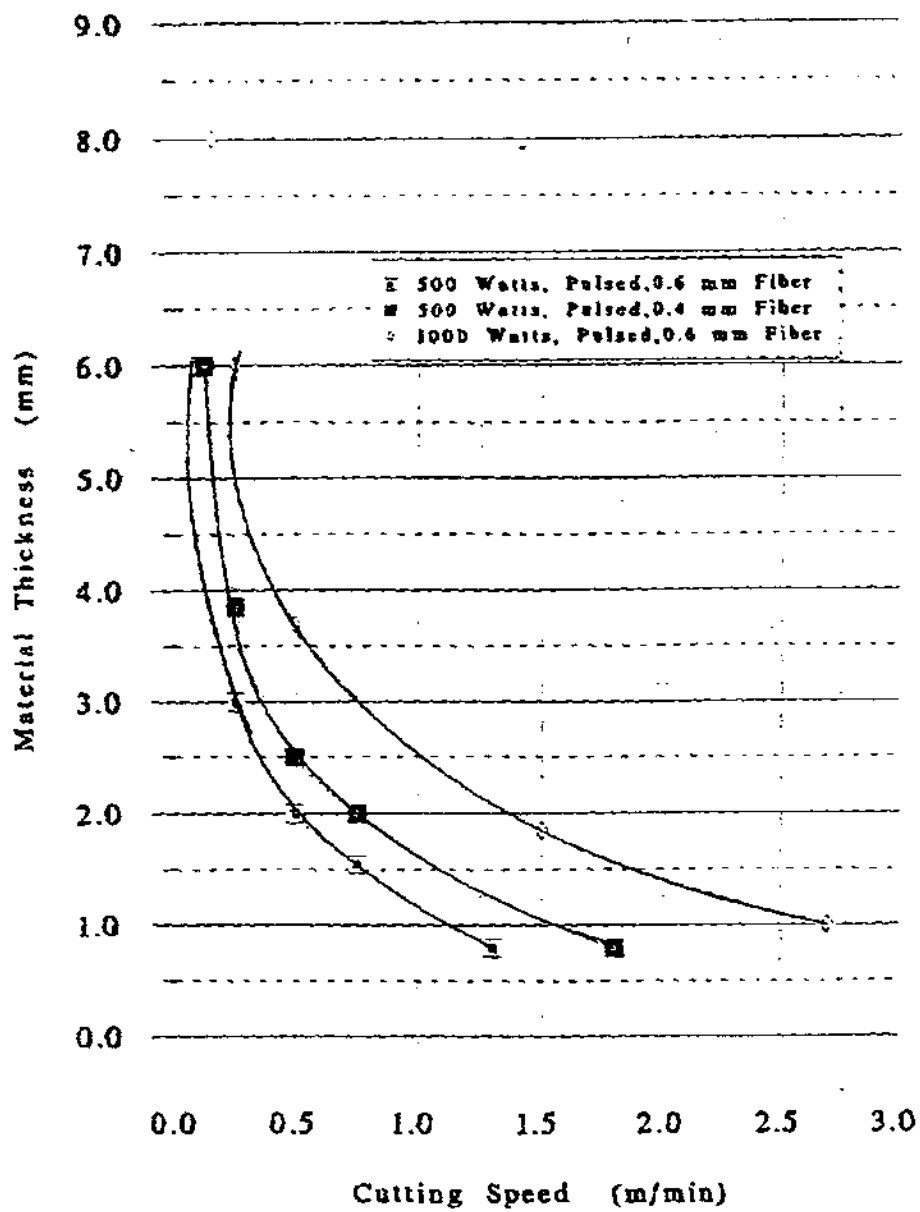
Αντιπροσωπευτικές ταχύτητες κοπής με Nd:YAG laser για χαλυβδοσίδηρο παρουσία οξυγόνου



Σχήμα 3.4. Αντιπροσωπευτικές ταχύτητες κοπής με Nd:YAG laser για χαλυβδοσίδηρο παρουσία οξυγόνου



Αντιπροσωπευτικές ταχύτητες κοπής με Nd:YAG laser για ανοξείδωτο χάλυβα παρουσία αζώτου



Σχήμα 3.5 Αντιπροσωπευτικές ταχύτητες κοπής με Nd:YAG laser για ανοξείδωτο χάλυβα παρουσία αζώτου

## **Χαρακτηριστικά των laser Nd:YAG (παροχή ακτίνας με οπτικές ίνες)**

- a) Παροχή οπτικής ίνας (ειδικά όσον αφορά εφαρμογή για ρομπότ).
- b) Υλικά που ανακλούν το μήκος κύματος του CO<sub>2</sub> μπορούν συχνά να κοπούν.
- c) Εύκολη ευθυγράμμιση της ακτίνας, εύκολος χειρισμός και διανομή της ακτίνας.
- d) Μικρής έκτασης και απλές συντηρήσεις του laser (συσκευές στέρεας κατάστασης) και του παροχέα της ακτίνας,
- e) Μικρότερος χώρος για laser με παροχέα ακτίνας,
- f) Μεγάλα και διάφορα μήκη ινών τα οποία δεν επιδρούν στη διαδικασία.
- g) Υψηλά σημεία ισχύος με υψηλή ενέργεια ανά παλμό.

### **3.4.2 Ισχύς παλμικού και συνεχούς κύματος**

Η κοπή είναι πρωταρχικά μια συνάρτηση της ισχύος του laser. Ωστόσο, η ποιότητα κοπής εξαρτάται ισχυρά από το πως αυτή η ισχύ μεταδίδεται στο προς κοπή τεμάχιο. Η ισχύς του laser μπορεί να παραχθεί τόσο με παλμικό τρόπο όσο και ως συνεχή ακτίνα [η οποία αναφέρεται ως συνεχές κύμα (C.W.)]. Η κοπή CW υψηλής ισχύος μεταφέρει ένα σημαντικό ποσό θερμότητας στα τοιχώματα της εγκοπής, προκαλώντας χειροτέρευση της ποιότητας κοπής και θέρμανση του τεμαχίου. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ιδιαίτερα δύσκολο να ξεπεραστεί σε παχύτερα υλικά, που απαιτείται ελάχιστο πλάτος εγκοπής και όπου η θέση του τεμαχίου δεν επιτυγχάνεται με σταθερή ταχύτητα. Ακόμη, όταν κόβουμε υλικά που αντιδρούν με το O<sub>2</sub> χρησιμοποιώντας O<sub>2</sub> ως βοηθητικό αέριο, υπάρχει η πιθανότητα ανάφλεξης [ειδικά όταν η θερμότητα του ξεπερνά τους 95° C (200° F)].

Η παλμική ισχύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να εξομαλύνονται τέτοια προβλήματα, και να παράγει κοπή καλύτερης ποιότητας κάτω από αυτές τις περιστάσεις. Στην παλμική, η ισχύς του laser κινείται κυκλικά μεταξύ ενός υψηλής ισχύος μικρού χρόνου του παλμού και του μηδενός. Εξαιτίας αυτού του κύκλου η «μέση ισχύς» από την CW ισχύ χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την ισχύ του laser. Η μέση ισχύ είναι απλά η ισχύ του laser πολλαπλασιασμένη επί του χρόνου απόδοσης του παλμού για κανονική παλμική λειτουργία (όπου κύκλος απόδοσης είναι ο λόγος του χρόνου στο on προς τον ολικό χρόνο). Κατά τη διάρκεια του παλμού υψηλής ισχύος το υλικό λειώνει, ατμοποιείται ή αποσυντίθεται και εκβάλλεται. Κατά τη διάρκεια του νεκρού χρόνου, επιτρέπεται στο υλικό να ψύχεται καθώς το υλικό ή η διαμόρφωση περιμένουν τον επόμενο υψηλής ισχύος παλμό.

Όπως είναι φανερό, ο ρυθμός επανάληψης του παλμού είναι κρίσιμος και άμεσα συνδεδεμένος με την ταχύτητα κοπής. Εάν υπάρχει πολύ μεγάλος χρόνος μεταξύ των παλμών (ο ελάχιστος χρόνος ότι περιορίζεται από την τροφοδοσία του laser, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μια συνεχή κοπή. Αυτή η κατάσταση είναι χαρακτηριστικά απροσδόκητη στο laser CO<sub>2</sub>. Εάν υπάρχει πολύ μικρός χρόνος μεταξύ των παλμών η ισχύ του laser πλησιάζει τα επίπεδα της συνεχούς ισχύος και γι αυτό τα προβλήματα που περιγράφησαν παραπάνω είναι πιθανά.

### 3.4.3 Τρόπος, σταθερότητα ισχύος και σκόπησης

Η κοπή υψηλής ποιότητας εξασφαλίζεται μόνο από την εφαρμογή σταθερής ενέργειας από το laser. Γι' αυτό η σταθερότητα της εξόδου του laser είναι ένα κλειδί για την κοπή. Αυτό συμπεριλαμβάνει σταθερότητα ισχύος, σταθερή ποιότητα ακτίνας (τρόπος σταθερότητας) και αμετάβλητη συγκέντρωση ενέργειας (σταθερότητα στόχευσης). Αν η ισχύς αυξάνεται και μειώνεται για λίγο επί τοις % για σύντομες χρονικές διαδικασίες, η ποιότητα της ακτίνας ταλαντεύεται μεταξύ ενός πολυτροπικού προφίλ και ενός προφίλ κατανομής Γκάους, ή η τοποθεσία της διεύθυνσης της ακτίνας περισσότερο από λίγα δέκατα ενός मिलιράντ, θα έχουν ως αποτέλεσμα αξιοπρόσεκτες αλλαγές στην διαθέσιμη πυκνότητα ισχύος για κοπή, και μια επακόλουθη αλλαγή στην ποιότητα κοπής.

### 3.44 Εγκάρσιος ηλεκτρομαγνητικός τρόπος

Η δυνατότητα εστίασης της ακτίνας του laser είναι μια συνάρτηση του εγκάρσιου ηλεκτρομαγνητικού τρόπου [συνήθως αναφέρεται ως TEM [(Transverse Electromagnetic Mode), ή πιο απλά «τρόπος»]. Είναι βασικά ένας τρόπος για να περιγραφεί το πως η ισχύς διανέμεται μέσα στην ακτίνα. Είναι συγκρίσιμος με το βαθμό αιχμηρότητας ενός κοπτικού εργαλείου. Μια κωδωνοειδή μορφή (Gauss) της διανομής της ισχύος είναι ο καλύτερος τρόπος εστίασης (επίσης αναφέρεται ως TEM<sub>00</sub>). Τρόποι που πλησιάζουν αυτή τη διανομή ισχύος μπορούν να εστιαστούν κάτω από το θεωρητικά μικρότερο μέγεθος σημείου. Ο τρόπος TEM<sub>00</sub> παρέχει την πιο συγκεντρωμένη πυκνότητα ισχύος, η οποία επιφέρει την ταχύτερη δυνατή κοπή το μικρότερο πλάτος εγκοπής σε ελάσματα υλικών. Ωστόσο, εξαιτίας της συγκεντρωμένης πυκνότητας ισχύος, πρέπει να λαμβάνεται προσοχή ώστε να εξασφαλιστεί

θερμική σταθερότητα του εσωτερικού και εξωτερικού (παροχέα της ακτίνας) οπτικών. Από την σκοπιά του σχεδιασμού των οπτικών εξαρτημάτων, αυτό συμπεριλαμβάνει στοιχεία όπως:

1. Κατάλληλη επιλογή υλικών για τα οπτικά (ανακλαστικότητα ή μεταδοτικότητα).
2. Μάζα οπτικών εξαρτημάτων (θερμομηχανική σταθερότητα).
3. Επαρκή ψύξη των οπτικών εξαρτημάτων (συνήθως απαιτείται ψύξη νερού πάνω από 1500 W).

Από την πλευρά της συντήρησης, αυτό περιλαμβάνει έναν υψηλό βαθμό καθαριότητας των οπτικών τόσο από προληπτική πλευρά όσο και από την πλευρά της συντήρησης (πολύ καλή επιθεώρηση και πρόγραμμα καθαρισμού).

Ο τρόπος του laser χαρακτηρίζεται από μια τιμή η οποία αναφέρεται ως  $M^2$ . Η γωνία απόκλισης της πρωτογενούς ακτίνας ( $\varphi$ ) συνδέεται άμεσα με την τιμή του  $M^2$  και το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) και αντιστρόφως αναλογικά με την μέση διάμετρο της πρωτογενούς ακτίνας του laser ( $D_0$ ), όπως παρακάτω:

$$\varphi = M^2 (4\lambda / \pi D_0)$$

Γι αυτό υψηλότερη σειρά ή πολυτροπικά προφίλ (υψηλότερες τιμές του  $M^2$ ) χαρακτηρίζονται από μια τάση να απλώνουν την διανομή της ενέργειας μακριά από το κέντρο της ακτίνας. Το επακόλουθο σημείο εστίασης είναι μεγαλύτερο, το οποίο επιφέρει μια μικρότερη πυκνότητα ισχύος ή συγκέντρωσης.

Επίσης τα προφίλ υψηλότερων ακτινών μπορεί να έχουν διαφορετική (ασύμμετρη) διανομή της ισχύος σε δύο άξονες. Αυτό συμβαίνει λόγω των διαφορετικών τρόπων διαμόρφωσης των δύο αξόνων. Η απόκλιση επηρεάζει το που θα προσπίπτει η εστιαζόμενη ακτίνα σε σχέση με τον εστιακό φακό (σημειώνεται ότι η εστιακή απόσταση  $f$  ενός εστιακού φακού είναι μέρος του εστιαζόμενου σημείου για μια τέλεια ευθυγραμμισμένη ακτίνα). Γι αυτό ακτίνες με ασυμμετρικούς τρόπους επιδρούν σε διαφορετικό σημείο εστίασης για κάθε άξονα. Αυτή η κατάσταση καλείται αστιγματισμός, και επιφέρει μια ποιότητα κοπής (π.χ. πλάτος και τήξη εγκοπής, και γεωμετρία εγκοπής) η οποία είναι ασυνεπής και εξαρτάται μόνο από τη διεύθυνση κοπής. Γενικά, οι συμμετρικοί ακτινωτοί τρόποι που πλησιάζουν τα TEM<sub>00</sub> και TEM<sub>01</sub> και TEM<sub>10</sub> (δηλαδή  $1 < M^2 < 3$ ) χρησιμοποιούνται για κοπή CO<sub>2</sub> ενώ τα αρκετά υψηλότερα, εξασφαλίζονται με συστήματα παροχής ακτίνων με οπτικές ίνες [(η τιμή  $M^2$  τόσο ψηλά όσο 300, αντισταθμίζεται γιατί το μήκος κύματος των Nd:YAG είναι το ένα δέκατο (1/10) του CO<sub>2</sub>)].

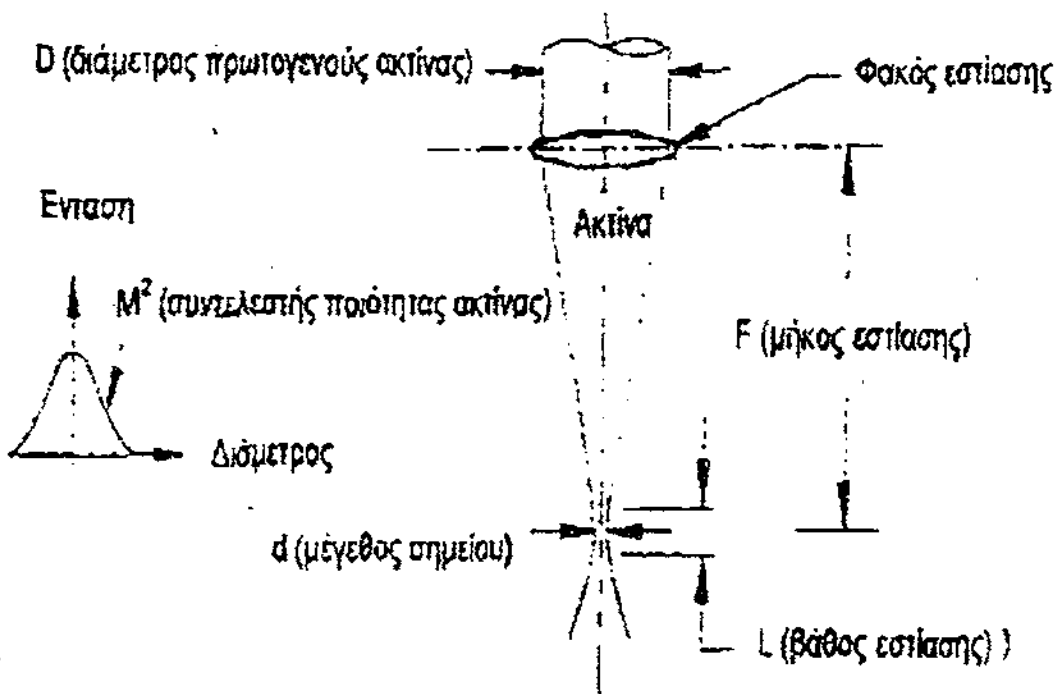
### 3.4.5 Διάμετρος του εστιασμένου σημείου

Είναι το μέγεθος μίας εστιαζόμενης ακτίνας, σε μια δεδομένη ισχύ, το οποίο υπαγορεύει την πυκνότητα ισχύος στο τεμάχιο, και ελέγχει την ταχύτητα κοπής, το πάχος του υλικού και το πλάτος της εγκοπής. Είναι γι' αυτό χρήσιμο να πάρουμε υπόψη τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν το γεγονός της εστιαζόμενης ακτίνας.

#### Παροχή ανακλούμενης/μεταδιδόμενης ακτίνας.

Οι παράμετροι του laser που προσδιορίζουν το μέγεθος της διαμέτρου του εστιαζόμενου τόξου ( $a$ ) όταν εστιάζουμε μια πρωτογενή ακτίνα laser είναι: το μήκος κύματος ( $\lambda$ ), ο τρόπος και η ευκολία εστίασης της ακτίνας ( $M^2$ ), η εστιακή απόσταση ( $f$ ) και η διάμετρος της πρωτογενούς ακτίνας στον φακό εστίασης ( $D$ ) (σχήμα 3.6).

### Παράμετροι εστίασης {Παροχή ακτίνας με μετάδοση / ανάκλαση}



Σχήμα 3.6: Παράμετροι εστίασης (Παροχή ακτίνας με μετάδοση/ανάκλαση)

Το μήκος κύματος εξαρτάται από τον τύπο του laser (π.χ. CO<sub>2</sub> ή Nd:YAG κ.λ.π.) Το μήκος κύματος ενός laser CO<sub>2</sub> είναι 10,6 μικρά (ή 0,0106mm), ενώ ενός Nd:YAG είναι 1,06 μικρά (0,00106mm). Η ευκολία εστίασης μιας ακτίνας laser είναι μια συνάρτηση του εγκάρσιου ηλεκτρομαγνητικού τρόπου. Για μια τέλεια κωδωνοποιημένη μορφή διανομής το M<sup>2</sup> =1 (αναφέρεται σε υψηλή ποιότητα ακτίνας) ενώ για άλλους τύπους διανομής M<sup>2</sup> >1 (αναφέρεται σε χαμηλή ποιότητα ακτίνας).

Στο σχήμα 3.7 μπορούμε να δούμε τιμές του M<sup>2</sup> για αρκετούς κυκλικούς συμμετρικούς τρόπους. Η εστιακή απόσταση προσδιορίζει την απόσταση από τον φακό εστίασης ως το επίπεδο εστίασης. Σημειώνεται ότι είναι η διάμετρος της ακτίνας στον φακό εστίασης που προσδιορίζει το μέγεθος του σημείου εστίασης, παρά η διάμετρος της ακτίνας που εξέρχεται από την κεφαλή του laser. Αυτό είναι σημαντικό διότι οι ακτίνες των laser δεν είναι τελείως ευθυγραμμισμένες. Η πρωτογενής ακτίνα είτε συγκλίνει σε μια «μέση» περιοχή και μετά αποκλίνει, είτε σε κάποια laser, απλώς αποκλίνει από την έξοδο της κεφαλής του laser.

Σημειώνεται ότι η «μέση» περιοχή μπορεί να μετακινηθεί από την θερμοκρασία φακών εξόδου (π.χ. ισχύ του laser και οπτική απορρόφηση). Μια αλλαγή στη θέση της «μέσης» περιοχής επηρεάζει το μέγεθος της πρωτογενούς ακτίνας στον φακό εστίασης.

Αυτές οι παράμετροι συνδέονται με το μέγεθος της διαμέτρου της εστίασης με την παρακάτω εξίσωση:

$$d=M^2 (4\lambda f/\pi D)$$

Μια εναλλακτική μέθοδος για να περιγραφεί η ευκολία εστίασης είναι με τον όρο «F», ο οποίος προσδιορίζεται ως ο λόγος, της εστιακής απόστασης (f) προς τη διάμετρο πρωτογενούς ακτίνας στον φακό εστίασης (D). Γι αυτό όσο μικρότερος ο αριθμός «F», τόσο μικρότερη και η διάμετρος του σημείου εστίασης, όπως φαίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$d=M^2 (F\#) (4\lambda/\pi)$$

Για την πρωτογενή ακτίνα του laser Nd:YAG ο συντελεστής της ποιότητας ακτίνας (BQ) είναι πιο συχνά καθορισμένος παρά η τιμή M<sup>2</sup>. Η τιμή M<sup>2</sup>, ωστόσο μπορεί να υπολογισθεί από την τιμή της ποιότητας της ακτίνας (με την B<3 εκφραζόμενη σε mm-mrad) από τα παρακάτω:

$$M^2=(\varphi\pi D_0)/(4\lambda 1000)=(4BQ\pi)/4\lambda$$

$$M^2=(\pi BQ)/1000\lambda=(3.14BQ)/1000(0.00106)=(2.96)BQ$$

$$M^2=3BQ$$

γι' αυτό:

$$d =3BQ(4\lambda f/\pi D)$$

Συντελεστές ποιότητας της ακτίνας για διάφορους τύπους

---



$$M^2 = 1 \text{ (TEM}_{00}\text{)}$$



$$M^2 = 2 \text{ (TEM}_{01}\text{)}$$



$$M^2 = 3 \text{ (TEM}_{02}\text{)}$$



$$M^2 = 4 \text{ (TEM}_{10}\text{)}$$



$$M^2 = 5 \text{ (TEM}_{11}\text{)}$$

Σχήμα 3.7: Συντελεστές ποιότητας της ακτίνας για διάφορους τύπους.

## Παροχή ακτίνας με οπτική ίνα

Στα συστήματα παροχής της ακτίνας με οπτικές ίνες η τιμή  $M^2$  που χρησιμοποιείται στα συστήματα ανάκλασης και μεταφοράς αντικαθίστανται από την μέτρηση της ποιότητας ακτίνας (BQ, η οποία εκφράζεται σε mm-mrad. Η ποιότητα ακτίνας είναι το γινόμενο της μέσης γωνίας της απόκλισης της ακτίνας σε mrad ( $\Theta = \phi/2$ ) mm της ακτίνας της πρωτογενούς ακτίνας του laser σε mm (D/2). Μπορεί ακόμα να οριστεί από την ακτίνα της πρωτογενούς ακτίνας του laser (D/2), την εστιακή απόσταση του όποιου φακού εστίασης σε mm (fi) και της ακτίνας της εστιασμένης ακτίνας για το συγκεκριμένο μήκος εστίασης σε mm (di/2), ή σαν όρος από την ημιγωνία του εστιασμένου κώνου της ακτίνας ως εξής :

$$BQ = (\Theta)(D/2)$$

$$BQ = 1000(\Theta_i)(di/2)$$

$$BQ = (1000\pi/180) \{ \tan^{-1} [(D/2)/fi] \} (di/2)$$

$$\Theta_i = (BQ)/(1000)(di/2)$$

Σ' ένα σύστημα παροχής με οπτικές ίνες η πρωτογενής ακτίνα εστιάζεται μέσα στην οπτική ίνα. Η ικανότητα της ίνας να μεταδίδει την εισερχόμενη ακτίνα εξαρτάται από την «αριθμητική σπή» της ίνας και την ποιότητα της ακτίνας (δηλ. την ικανότητα εστίασης) της πρωταρχικής ακτίνας. Η «αριθμητική σπή» ορίζει την γωνία του κώνου («αποδεκτού κώνου») στην οποία η εστιαζόμενη εισερχόμενη ακτίνα πρέπει να μείνει μέσα, με σκοπό να συσχετιστεί επιτυχώς με την ίνα. Η «αριθμητική σπή» (N.A.) ορίζεται ως η ημιγωνία ( $\Theta$ ) του αποδεκτού κώνου. Με άλλα λόγια η γωνία του κώνου της εστιασμένης ακτίνας ( $2\Theta_i$ ) πρέπει να είναι μικρότερη από τον αποδεκτό κώνο της οπτικής ίνας ( $2\Theta$ ) για επιτυχή μετάδοση με οπτική ίνα.

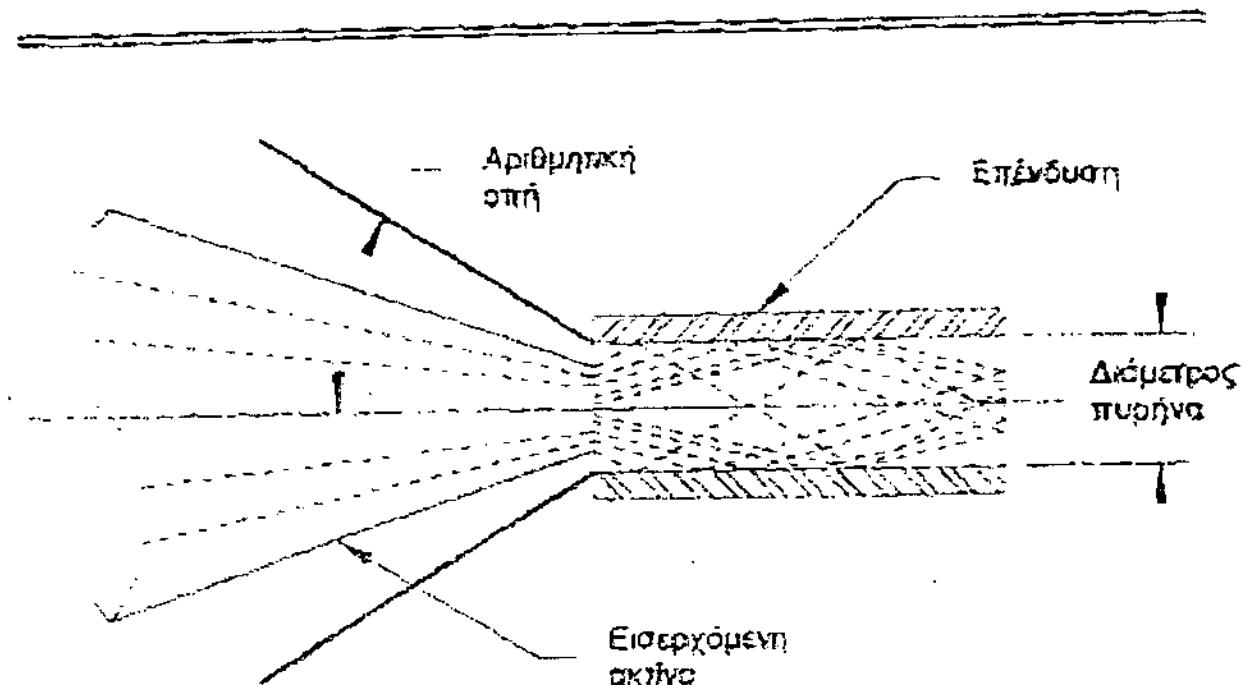
Επιπλέον, εάν η διάμετρος του εστιαζόμενου σημείου της εισερχόμενης ακτίνας στην οπτική ίνα είναι το 70% του πυρήνα της διαμέτρου [το 30% για να εναρμονίσει την μη ευθυγράμμιση και την οπτική παραμόρφωση (διαταραχή)], τότε η ελάχιστη διάμετρος του πυρήνα της οπτικής ίνας ( $\Phi_c \text{ min}$ ), για μια δεδομένη ποιότητα ακτίνας και αριθμητική σπή της ίνας, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Phi_c \text{ (min)} = 2.86(BQ)/N.A.$$

Μέσα στην οπτική ίνα η ακτίνα μεταδίδεται διαμέσου των εσωτερικών ανακλάσεων στον πυρήνα της ίνας (σχήμα 3.8).



## Μετάδοση με οπτική ίνα

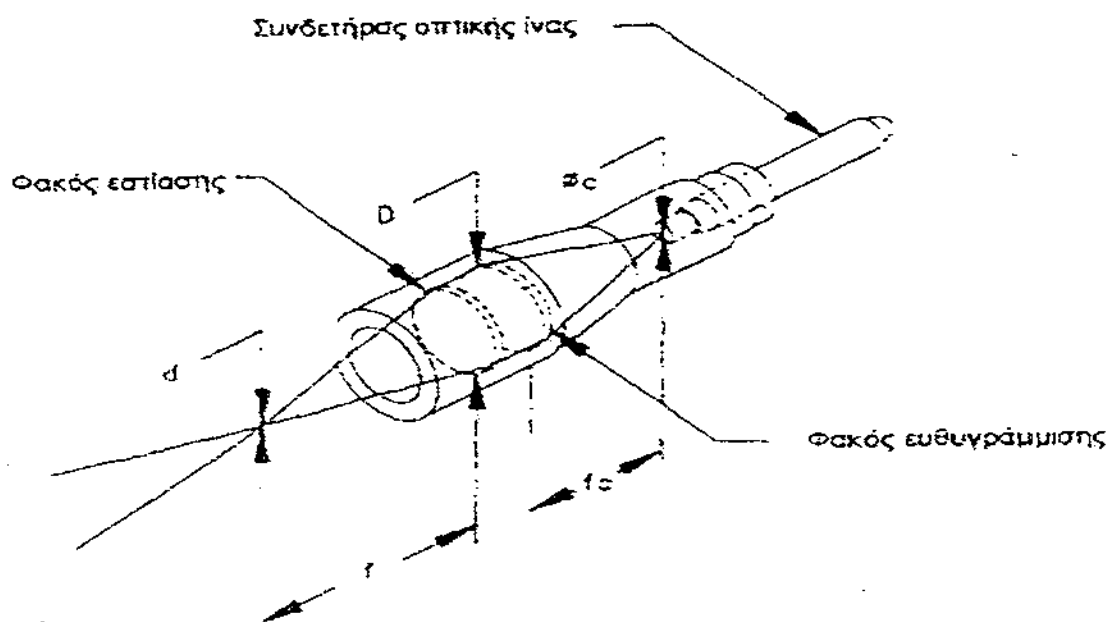


Σχήμα 3.8: Μετάδοση με οπτική ίνα

Χαρακτηριστικές διαμέτροι του πυρήνα είναι από 0,4-1,0mm. Η ακτίνα εξέρχεται της οπτικής ίνας με μια γωνία η οποία αρχικά προσδιορίζεται από το N.A. της οπτικής ίνας. Η εξερχόμενη ακτίνα εστιάζεται στη συνέχεια από έναν ή περισσότερους φακούς (χαρακτηριστικά από έναν φακό ευθυγράμμισης και ένα φακό εστίασης) σ' ένα πολύ μικρό σημείο. Οι παράμετροι που προσδιορίζουν το μέγεθος του εστιαζόμενου σημείου (d) όταν εστιάζουμε μια ακτίνα laser η οποία παρέχεται από μια οπτική ίνα είναι:

1. Η διάμετρος του πυρήνα της οπτικής ίνας ( $\Phi_c$ ).
2. Την εστιακή απόσταση του φακού ευθυγράμμισης ( $f_c$ ).
3. Την εστιακή απόσταση (f) του φακού εστίασης (σχήμα 3.9).

### Παράμετροι εστίασης (Παροχή ακτίνας με οπτική ίνα)



Αυτοί οι παράμετροι συνδέονται με το μέγεθος του σημείου εστίασης με την ακόλουθη εξίσωση:

$$d = (f/f_c) \Phi_c$$

Σημειώνουμε ότι όσο μικρότερη η διάμετρος του πυρήνα της ίνας τόσο μικρότερη και η διάμετρος του εστιαζόμενου σημείου. Ωστόσο, η μείωση της διαμέτρου του πυρήνα περιορίζεται από την ποιότητα της εισερχόμενης ακτίνας. Η εστιακή απόσταση μπορεί επίσης να μειωθεί, για να μειώσει το μέγεθος του σημείου, αλλά ταυτόχρονα μειώνεται και το βάθος της εστίασης.

#### 3.4.6 Βάθος εστίασης

Άλλο ένα χαρακτηριστικό του σημείου εστίασης είναι το βάθος εστίασης (L), το οποίο καθορίζει την πλήρη έκταση στην οποία το μέγεθος του εστιαζόμενου σημείου δεν αυξάνει παραπάνω από ένα προκαθορισμένο ποσοστό επί τοις εκατό (π.χ.  $\rho=0,05$  για 5%).

Πρακτικά, το βάθος εστίασης προσδιορίζει το εύρος στο οποίο το πλάτος της εγκοπής κατά την κοπή δεν αυξάνει σημαντικά. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι το βάθος εστίασης είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη σταθερότητα της κοπής, και είναι άμεσα συνδεδεμένο με τον χρόνο εγκατάστασης (όσο μεγαλύτερο το βάθος εστίασης, τόσο μικρότερο το χρονικό διάστημα που απαιτείται).

### Παροχή ανακλούμενης / μεταδιδόμενης ακτίνας

Το βάθος εστίασης μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση από την παρακάτω σχέση:

$$L=[(\rho+1)^2-1]^{1/2}(\pi d^2)/2\lambda M^2$$

**Προσοχή:** Για πρωτογενείς ακτίνες ενός laser Nd:YAG, η τιμή της ποιότητας ακτίνας μπορεί να αντικατασταθεί θέτοντας όπου:

$$M^2=3BQ$$

Χαρακτηριστικά η τιμή του  $\rho$  παίρνεται ως 5% (0,05), το οποίο μειώνει την εξίσωση σε :

$$L_{5\%}=d^2/2\lambda M^2$$

Με την τιμή του « $\rho$ » ορισμένη σε 5% η πυκνότητα ισχύος στο βάθος της εστίασης δεν μειώνεται παραπάνω από 9,3%.

### Παροχή ακτίνας με οπτικές ίνες

Το βάθος εστίασης για ένα σύστημα παροχής ακτίνας με οπτική ίνα με το « $\rho$ » ορισμένο στο 5% μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$L_{5\%}=[2\Phi c(f)^2]/\pi Dfc$$

$$L_{5\%}=[2(d)^2 fc]/(\pi D\Phi c)$$

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι, εξαιτίας της μεγάλης μείωσης της ποιότητας της ακτίνας ενός συστήματος Nd:YAG η οποία μεταδίδεται διαμέσου μιας οπτικής ίνας, το βάθος της εστίασης για ένα δεδομένο σημείο είναι πολύ μικρότερο αυτού από όταν παρέχεται με ένα σύστημα ανάκλασης ή μετάδοσης της ακτίνας. Προσέξτε επίσης ότι το βάθος της εστίασης

εξαρτάται από την ποιότητα της εξερχόμενης ακτίνας (η οποία εξαρτάται από το βαθμό N.A. της ίνας και τη διάμετρο του πυρήνα) και την διάμετρο του σημείου όπως φαίνεται και παρακάτω.

$$L_5\% = 1000[(d^2)/(\pi)(N.A.)(\Phi_c)]$$

Γι' αυτό, εάν η αριθμητική τιμή του λόγου ( $f/f_c$ ) παραμένει σταθερή, δεν έχει επίδραση ούτε στην διάμετρο του σημείου, ούτε στο βάθος εστίασης. Έχοντας αυτό υπόψη, ένα σύστημα παροχής της ακτίνας με οπτική ίνα που έχει  $f=60\text{mm}$  και  $f_c=60\text{mm}$ , έχει το ίδιο μέγεθος σημείου και το ίδιο βάθος εστίασης, μ' ένα σύστημα που έχει  $f=120\text{mm}$  και  $f_c=120\text{mm}$

Στον πίνακα 3.11 που ακολουθεί φαίνεται η αλληλεξάρτηση μεταξύ βάθους εστίασης και μεγέθους σημείου.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.11**  
**ΑΛΛΗΛΕΞΑΡΤΗΣΗ ΒΑΘΟΥΣ ΕΣΤΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΗΜΕΙΟΥ**

Παράμετροι διαδικασίας	Μικρή εστιακή απόσταση	Μεγάλη εστιακή απόσταση
<b>Μέγεθος σημείου</b>	<u>Μικρότερο</u> Υψηλότερη ταχύτητα κοπής Μικρότερη εισερχόμενη Θερμότητα, μικρότερες εγκοπές, λεπτότερα υλικά	<u>Μεγαλύτερο</u> Μικρότερη ταχύτητα Κοπής, υψηλότερη Εισερχόμενη Θερμότητα, Μεγαλύτερες εγκοπές, χοντρότερα υλικά
<b>Βάθος εστίασης</b>	<u>Κοντότερο</u> Υψηλότερη ανοχή τεμαχίου, υψηλότερη ανοχή επεξεργασίας, μεγαλύτερος χρόνος για να επιτύχουμε την εστίαση, λεπτότερα υλικά	<u>Μακρύτερο</u> Χαμηλότερη ανοχή τεμαχίου, χαμηλότερη ανοχή επεξεργασίας, μικρότερος χρόνος για να επιτύχουμε την εστίαση, χοντρότερα υλικά
<b>Συντήρηση του φακού εστίασης</b>	<u>υψηλότερη</u>	<u>χαμηλότερη</u>

### 3.4.7 Πυκνότητα ισχύος, πυκνότητα ενέργειας και ενέργεια κοπής

#### Πυκνότητα ισχύος

Η πυκνότητα ισχύος ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του laser προς την επιφάνεια του εστιασμένου σημείου και είναι άμεσα συνδεδεμένο με το πάχος του υλικού το οποίο μπορεί να κοπεί. Είναι κρίσιμο, γι αυτό περικλείει τόσο την ισχύ του laser, όσο και την περιοχή στην οποία είναι συγκεντρωμένη. Τόσο η υψηλής ισχύος ανεστίαστη ακτίνα όσο και η χαμηλής ισχύος εστιασμένη ακτίνα δεν χρησιμοποιούνται πολύ στην κοπή. Η πυκνότητα ισχύος ( $P_d$ ) είναι συνδεδεμένη με την ισχύ του laser ( $P$ ) και με την περιοχή του εστιασμένου σημείου ( $d$ ) από την παρακάτω σχέση (υποθέτοντας ότι το εστιασμένο σημείο είναι κυκλικό:

$$P_d = 4P/\pi d^2$$

Παρατηρούμε, ότι διπλασιάζοντας την διάμετρο του εστιασμένου σημείου (διπλασιάζοντας π.χ. την εστιακή απόσταση) αλλάζει μόνο κατά 1/4 η πυκνότητα ισχύος, Ωστόσο, διπλασιάζοντας την εστιακή απόσταση επιφέρεται αύξηση στο βάθος εστίασης κατά 4 φορές. Αυτή η ανταλλαγή μεταξύ μεγέθους σημείου και βάθους εστίασης είναι στο κέντρο των επιλογών για όλους τους φακούς εστίασης όταν μελετούμε το πλάτος εγκοπής, την εκροή λειωμένου υλικού και το πάχος υλικού.

#### Πυκνότητα ενέργειας

Η πυκνότητα ενέργειας σχετίζεται με την ταχύτητα με την οποία η πυκνότητα ισχύος μεταδίδεται στο υλικό που θέλουμε να κόψουμε. Μια υψηλή ταχύτητα κοπής ενός λεπτού υλικού μεταδίδει λιγότερη ενέργεια στο τεμάχιο απ' ότι μια χαμηλής ταχύτητας κοπή ενός χοντρότερου υλικού, για μια δεδομένη πυκνότητα ισχύος, Η διαθέσιμη πυκνότητα ενέργειας είναι απ' ευθείας ανάλογη στην πυκνότητα ισχύος ( $P_d$ ) και στο μήκος κοπής ( $w$ ) και αντιστρόφως ανάλογη στην ταχύτητα κοπής ( $V$ ):

$$E_d = w P_d / V$$

## Ενέργεια κοπής

Η πυκνότητα ενέργειας μαζί με την αποδοτική συσχέτιση (την ικανότητα του υλικού προς κοπή να απορροφά την ενέργεια της εστιασμένη ακτίνας), προσδιορίζει την ενέργεια κοπής του laser. Η ενέργεια κοπής από το laser μαζί με την εξωθερμική ενέργεια της κοπής με οξυγόνο (όπου εφαρμόζεται) αποδεικνύει την απαιτούμενη ταχύτητα καθώς για ένα επιθυμητό πάχος κοπής (παρέχοντας την απαιτούμενη ελάχιστη εγκοπή για ικανοποιητική απόρριψη). Η ικανοποιητική συσχέτιση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μερικοί από αυτούς είναι: ο τύπος του laser, η πυκνότητα ισχύος, η αγωγιμότητα και η ανακλαστικότητα του υλικού, η κατάσταση της επιφάνειας του υλικού και το ποσό των πτητικών συστατικών μέσα ή πάνω στην επικάλυψη του υλικού.

Η συνολική ενέργεια κοπής (του laser και του αντιδρώντος αερίου) είναι υπεύθυνη για την δημιουργία του λιωμένου (ατμοποιημένου ή αποσυντιθεμένου) υλικού, το οποίο πρέπει να εκρέει από την εγκοπή. Αυτό δημιουργεί την πιο βασική σχέση της κοπής με laser, η οποία είναι:

**Παραγόμενο λιωμένο / ατμοποιημένο / αποσυντιθεμένο υλικό = Απορριπτόμενο λιωμένο / ατμοποιημένο / αποσυντιθεμένο υλικό.**

Μια καλή κοπή με laser συνεπάγεται την προσαρμογή των παραμέτρων για να εξασφαλίσει αυτήν την ισορροπία. Πολλές από τις παραμέτρους ωστόσο επηρεάζουν τόσο την δημιουργία όσο και την εκροή ταυτόχρονα (πίνακας 3.III). Γι αυτό, η προσαρμογή των παραμέτρων στην κοπή με laser δεν είναι συχνά απλή.

Αυτή η πολυπλοκότητα επηρεάζει ακόμη τη λύση των προβλημάτων, γιατί για πολλά από τα προβλήματα μπορεί να υπάρχει παραπάνω από μία αιτία.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.III**  
**ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ**

<u>Δημιουργία λιωμένου υλικού</u>	<u>Απόρριψη λιωμένου υλικού</u>
Ισχύς του laser	Ταχύτητα κοπής
Πυκνότητα ισχύος	Τύπος βοηθητικού αερίου
Πλάτος εγκοπής	Πίεση βοηθητικού αερίου
Τύπος βοηθητικού αερίου	Γεωμετρία ακροφυσίου
Ροή βοηθητικού αερίου	Πλάτος εγκοπής
Ταχύτητα κοπής	Τύπος υλικού
Τύπος υλικού	Πάχος υλικού
Πάχος υλικού	
Επιφάνεια υλικού	
Θερμοκρασία υλικού	

Τελικά από ενεργειακή σκοπιά, τα παρακάτω ενεργειακά ισοζύγια δείχνουν μερικά από τα πρόσθετα πολύπλοκα απροσδόκητα κατά την κοπή με laser.

ΕΙΣΕΡΧΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ=ΕΞΕΡΧΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

<p>(Η ενέργεια που εισέρχεται στην ζώνη κοπής)</p> <p>laser (ηλεκτρομαγνητική ενέργεια)</p> <p>+</p> <p>αέρια αντίδρασης (χημική/ εξωθερμική ενέργεια)</p> <p>+</p> <p>δυναμική αερίων (κινητική ενέργεια)</p>	<p>= (ενέργεια που χρησιμοποιείται για να παράγει κοπή)</p> <p>θερμότητα ατμοποίησης και τήξης</p> <p>+</p> <p>εκβαλλόμενο υλικό και βοηθητικό αέριο</p>	<p>+(Απώλεια ενέργειας από την ζώνη κοπής)</p> <p>ακτινοβολούμενο και ανακλώμενο φως (συμπεριλαμβανομένου του πλάσματος)</p> <p>+</p> <p>Μεταδιδόμενο φως(δια μέσω εγκοπής)</p> <p>+</p> <p>Μεταδιδόμενη θερμότητα</p> <p>+</p> <p>θόρυβος</p>
--	--	--



Στον πίνακα 3.IV που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα τυπολόγιο των παραμέτρων κοπής:

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.IV**  
**ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ LASER**

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	ΠΑΡΟΧΗ ΑΚΤΙΝΑΣ ΜΕ ΑΝΑΚΛΑΣΗ/ΜΕΤΑΔΟΣΗ	ΠΑΡΟΧΗ ΑΚΤΙΝΑΣ ΜΕ ΟΠΤΙΚΗ ΙΝΑ
Μέγεθος σημείου	$d = m^2 (4\lambda f/nD = m^2 (F4)(4\lambda/\pi)$ $d = 3BQ(4\lambda f/\pi D)$	$d = (f/fc)\Phi_c$
Βάθος κοπής	$L_{5\%} = d^2 / 2\lambda m^2$	$L_{5\%} =$ $[2(d)^2 fc]/(\pi Dd)$  $L_{5\%} =$ $1000[(d^2)/(\pi)(N.A.)(\Phi_c)]$
Πυκνότητα ισχύος	$Pd = 4P/\pi d^2$	$Pd = 4P/\pi d^2$
Πυκνότητα ενέργειας	$Ed = w Pd/V$	$Ed = w Pd/V$

### 3.5 Θεωρία συστήματος

#### 3.5.1 Βασικά στοιχεία

Ας ξαναθυμηθούμε ότι το laser είναι μια συσκευή η οποία παράγει μια σχεδόν ευθύγραμμη ακτίνα φωτός. Το laser από μόνο του έχει εξαιρετικά περιορισμένες δυνατότητες. Ωστόσο, όταν η ακτίνα κατευθύνεται, χειρίζεται και εστιάζεται προς το τεμάχιο και έχει μια σταθερότητα η οποία είναι ιδανικά ταιριαστή για αυτόματες διαδικασίες.

### 3.5.2 Σύστημα παροχής ακτίνα

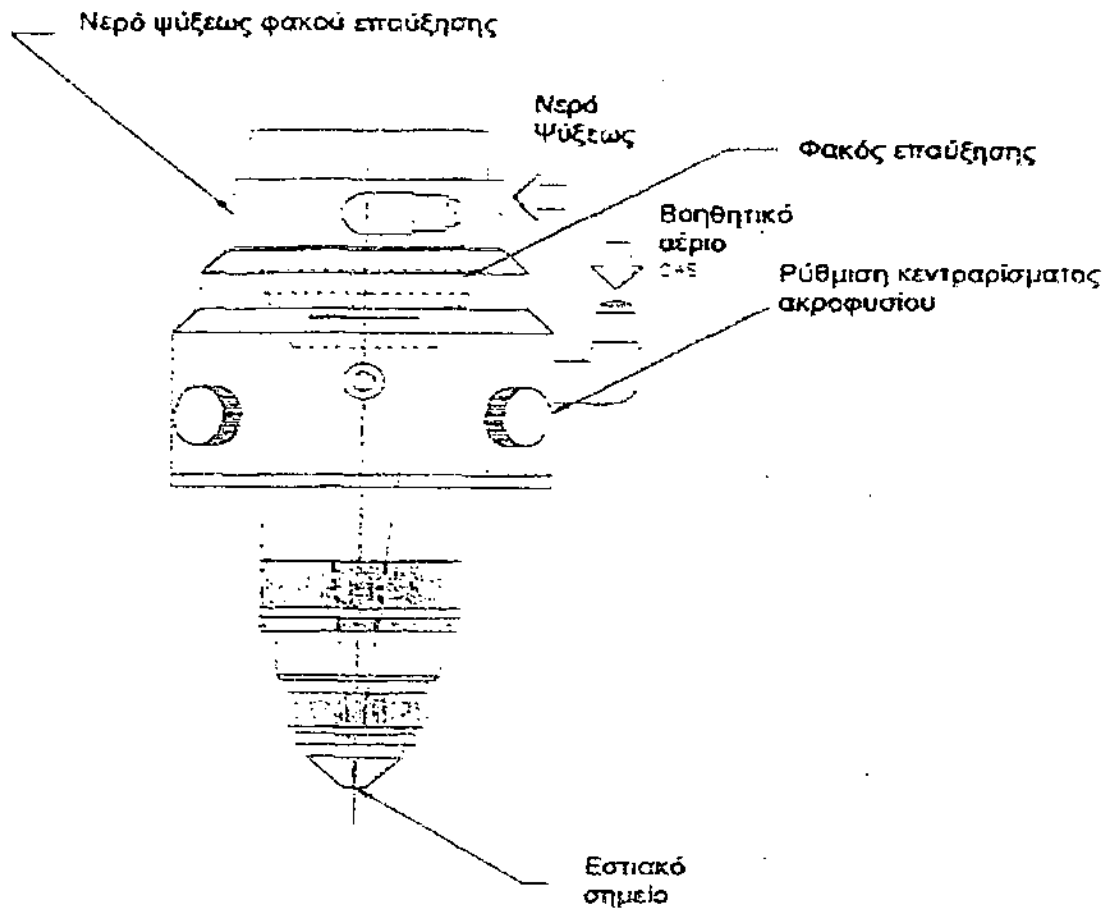
Το σύστημα παροχής ακτίνας περιλαμβάνει τέτοια στοιχεία τα οποία δέχονται την ακτίνα από το laser και την εμπεριέχουν κατευθείαν στο τεμάχιο, και την ρυθμίζουν σε μια χρήσιμη μορφή ενέργειας. Αυτό γενικά περιλαμβάνει : α) καθρέφτες λυγισμού της ακτίνας, αλληλοσυνδεόμενους σωλήνες προστασίας της ακτίνας και ίσως να συμπεριλαμβάνουν έναν ευθυγραμμιστή για μετακινούμενη ακτίνα ή ένα σύστημα παροχής μακριάς ακτίνας για ένα σύστημα αντανάκλασης ή β) ένα ζευγάρι μετρητών, ένα καλώδιο οπτικής ίνας και έναν ευθυγραμμιστή σε σύστημα παροχής με οπτική ίνα. Επιπρόσθετα και τα δύο συστήματα απαιτούν έναν μετρητή εστίασης με φακούς και ένα ακροφύσιο αερίου.

Οι μετρητές εστίασης παρέχουν περίβλημα των φακών εστίασης. Αυτές οι συναρμολογήσεις γενικά παρέχουν ένα μέσο ρύθμισης της θέσης εστίασης σχετικά με το τεμάχιο ενώ διατηρούμε ένα επιθυμητό κενό. Ακόμα, παρέχουν χαρακτηριστικά τις ρυθμίσεις που απαιτούνται για το κεντράρισμα της ακτίνας, διαμέσου του στομίου εκροής του ακροφυσίου.

Οι μετρητές εστίασης του laser Nd:YAG χαρακτηριστικά χρησιμοποιούν φθηνά, αναλώσιμα και διαφανή καλύμματα των φακών ώστε να προστατεύουν τον φακό εστίασης από «πιτσιλίσματα» και καπνούς από την διαδικασία κοπής. Με τα laser CO<sub>2</sub> δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα διάφανα καλύμματα των φακών, και τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοστίζουν σχεδόν όσο και ο φακός εστίασης, και γι' αυτό το λόγο γενικά δεν χρησιμοποιούνται. Οι αισθητήριες συσκευές ύψους μπορούν να ενσωματώνονται ώστε αυτόματα να διατηρείται η σωστή θέση εστίασης, του κυματισμού της επιφάνειας του τεμαχίου.

Οι συναρμολογήσεις του ακροφυσίου (σχήμα 3.10) γενικά ολοκληρώνονται κάτω από τους φακούς, με σκοπό να καθοδηγήσουν το επιθυμητό βοηθητικό αέριο στο σημείο κοπής. Ένας κατάλληλος τρόπος σχεδίασης του ακροφυσίου είναι πολύ σημαντικός στην διαδικασία κοπής. Μπορεί να μεγιστοποιήσει την ποιότητα κοπής με την ελάχιστη κατανάλωση αερίου.

## Παράδειγμα ακροφυσίου εκροής αερίου



Σχήμα 3.10: Παράδειγμα ακροφυσίου εκροής αερίου

### 3.5.3 Σύστημα κίνησης

Τα laser πρέπει να θεωρούνται ως τμήματα ενός μεγαλύτερου συστήματος. Επιπρόσθετα στο laser, περιέχονται τα στοιχεία του συστήματος παροχής της ακτίνας, η μέθοδος χειρισμού των υλικών και το σύστημα ελέγχου να επηρεάζει τη δράση του. Η σχετική κίνηση της εστιασμένης ακτίνας του laser με προσοχή στο υλικό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την κίνηση της ακτίνας, την κίνηση του τεμαχίου ή με συνδυασμό των δύο. Αυτή η επιλογή είναι κάπως εξαρτώμενη από τη φύση του υλικού που θα κοπεί. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετακινήσουν το υλικό σχεδόν ελεύθερα, η συναρμολόγηση φακών σε θέση πάνω από ένα κινούμενο τραπέζι σε άξονες X-Y είναι μια αποτελεσματική και αξιόπιστη προσέγγιση. Το εύρος των συστημάτων κίνησης κυμαίνεται από τα απλά όπου το υλικό κινείται ευθεία κάτω από μια σταθερή ακτίνα, έως τα πιο περίπλοκα με κίνηση σε πολλούς άξονες που

χρησιμοποιούνται για περιμετρική κοπή σε 3 διαστάσεις. Τα συστήματα κοπής σε 2 άξονες ακολουθούν στις παρακάτω 3 διαμορφώσεις:

1. Σταθερή ακτίνα (όπου το σύστημα παροχής της ακτίνας παραμένει σταθερό).
2. Κινούμενη ακτίνα (όπου το τεμάχιο παραμένει σταθερό).
3. Υβριδικό σύστημα (όπου κινούνται ένας άξονας της ακτίνας και ένας της τράπεζας).

Όλες οι διαμορφώσεις έχουν πλεονεκτήματα και αδυναμίες τα οποία θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να σταθμίζονται.

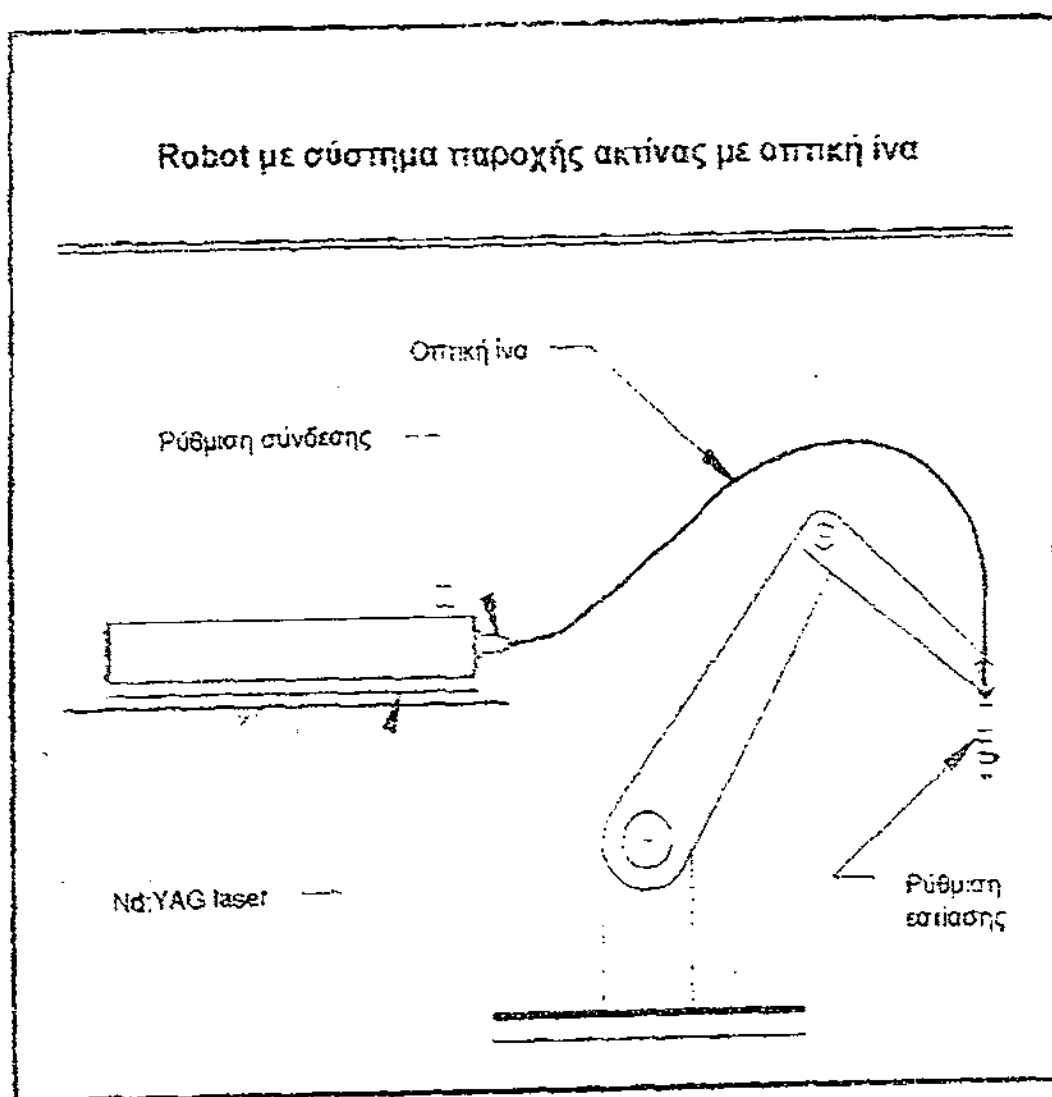
Στον πίνακα 3.V που ακολουθεί παρουσιάζονται μερικά από τα πιο σπουδαία χαρακτηριστικά για τα συστήματα κοπής σε 2 διαστάσεις.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.V**

**ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ**

Παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά την σχεδίαση	Σταθερή Καθορισμένη ακτίνα (κίνηση σε x-y)	Υβριδική (x-τράπεζα,y-φακοί)	Κινούμενη Ακτίνα (x-y φακοί)
κόστος	χαμηλότερο	μέσο	υψηλότερο
Χρόνος ευθυγράμμισης της ακτίνας	μικρότερος	μέσος	μεγαλύτερος
Επηρεασμός της απόκλισης στη κοπή	κανένας	κάποιος	Πιο πολύς
Χρόνος χειρισμού των υλικών	υψηλότερος	υψηλότερος	χαμηλότερος
Επηρεασμός της ακρίβειας και της ταχύτητας από την αδράνεια(και των κραδασμών)	υψηλότερος	μέσος	χαμηλότερος
Περιορισμός βάρους του υλικού	υψηλότερος	μέσος	χαμηλότερος
Αποτύπωμα	μεγαλύτερο	μέσο	μικρότερο
Απαιτήση σύσφιξης	υψηλότερη	μέση	χαμηλότερη

Τα συστήματα περιγραμματικής κοπής 3 διαστάσεων παρουσιάζουν διόρθωση λιγότερο από 10% της εγκαταστημένης βάσης. Τα συστήματα κοπής 3 διαστάσεων περιλαμβάνουν πρωταρχικά 2 τύπους των 5 (ή 6) αξόνων γερανοφόρων συστημάτων. Ο ένας τύπος έχει όλες τις κινήσεις για τα οπτικά, ενώ ο άλλος έχει μια τράπεζα η οποία κάνει όλες τις κινήσεις, η οποία επιτρέπει το ευκολότερο φόρτωμα και ξεφόρτωμα των τεμαχίων. Για κοπή 3 διαστάσεων χρησιμοποιούνται ακόμα και robots. Ωστόσο, πρακτικά είναι περιορισμένα στα laser τύπου Nd:YAG με σύστημα παροχής της ακτίνας με οπτική ίνα (σχήμα 3.11). Η σταθερότητα και η ακρίβεια των robots πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μαζί με τα κύρια χαρακτηριστικά του laser (π.χ. την επίδραση του μήκους κύματος στην αλληλεπίδραση των υλικών, και την επίδραση των οπτικών ινών στο μέγεθος του σημείου και το πλάτος της εγκοπής).



Σχήμα 3.11: Robot με σύστημα παροχής ακτίνας με οπτική ίνα

Το laser είναι ικανό να παρέχει συνεχώς μια σταθερή ενέργεια φωτός η οποία κατευθύνεται στο τεμάχιο. Η αλληλεπίδραση της ακτίνας με το υλικό συμβαίνει μ' ένα αναμενόμενο ρυθμό. Για να επιτύχουμε σταθερή κοπή, πρέπει το εστιαζόμενο σημείο να μετακινείται μαλακά με σταθερή ταχύτητα παντού στο επιθυμητό περίγραμμα κοπής. Οποιαδήποτε επιτάχυνση ή επιβράδυνση κατά την διάρκεια της κοπής με σταθερή ενέργεια θα έχει ως επίδραση την ασυνεχή ,εγκοπή ή και την σκουριά. Γι αυτό εάν δεν μπορεί να επιτευχθεί μια σταθερή ταχύτητα κοπής από το σύστημα κίνησης ή το σύστημα ελέγχου είναι απαραίτητη η μείωση της ισχύος ή του παλμού κατά την μετάπτωση των ταχυτήτων. Σ' αυτό το σημείο τίθεται το πιο σημαντικό πρόβλημα της διατήρησης της ολικής ακρίβειας του συστήματος κοπής. Αυτό αφορά τη δυναμική αντίδραση στην κίνηση του συστήματος τοποθέτησης.

Ανεπαρκής κωδικοποιητής καθώς και μηχανικές ελλείψεις όπως μικρή ροή στρέψης, υπερβολική διαδρομή, υπερβολική αδράνεια και ανεπαρκής μηχανική σταθερότητα μπορούν να συνεισφέρουν στην ακανόνιστη κοπή. Τα συστήματα υψηλής ακρίβειας αξιοποιούν την συμβατότητα των μηχανικών εξαρτημάτων με τις προβλεπόμενες αλλαγές στην αδράνεια του συστήματος. Χρησιμοποιούν εξαρτήματα ακριβείας όπως μικρής αδράνειας υψηλής στρεπτικής ροπής, σερβομηχανισμούς, υψηλής ανάλυσης κωδικοποιητές, μικρής μάζας πακτωμένα δομικά στοιχεία.

#### **3.5.4 Συστήματα παροχής αερίου**

Τα αέρια του laser (εάν απαιτούνται) και τα αέρια κοπής, πρέπει να παρέχονται στα ακροφύσια του laser και του αερίου προσεκτικά. Οι φιάλες αερίου και τα δοχεία υγρού αερίου είναι αξιοποιήσιμα. Μερικά από τα πολλά χαρακτηριστικά όταν καθορίζουμε ένα σύστημα παροχής αερίου είναι:

##### **Χαρακτηριστικά παροχής αερίου για το laser**

- 1) Κανονισμοί πίεσης.
- 2) Ρυθμίσεις πίεσης.
- 3) Ανιχνευτής πίεσης (π.χ. ανιχνεύει αν η πίεση είναι χαμηλή).

##### **Χαρακτηριστικά παροχής βοηθητικού αερίου**

- 1) Κανονισμοί και ρυθμίσεις πίεσης (π.χ. διαμέσου προγραμμάτων CNC και σερβοβαλβίδας).
- 2) Υψηλή πίεση και επιλογή εξαρτημάτων ροής (π.χ. σωληνοειδή, σωλήνες των φακών εστίασης).
- 3) Διευθυντήρες πίεσης (π.χ. ανιχνεύουν όταν η πίεση είναι χαμηλή).
- 4) Έλεγχος πίεσεως και ροής στην κεφαλή κοπής.

- 5) Χαρακτηριστικά του κύκλου ζωής των σωληνοειδών και ο ρυθμός κύκλου (π.χ. σφαιροβαλβίδες μπορεί να είναι απαραίτητες για απαιτήσεις υψηλών κύκλων).
- 6) Προμήθεια σωληνωτών υλικών, τα οποία μπορούν να αντέξουν την ανακλώμενη ισχύ, ειδικά όταν κόβουμε υλικά που έχουν υψηλή ανακλαστικότητα, όπως το αλουμίνιο.

### 3.5.5 Σύστημα εξαγωγής

Ένα σύστημα εξαγωγής για να μετακινεί το ατμοποιημένο ή αποσυντιθεμένο υλικό είναι απαιτούμενο. Όταν κόβουμε τοξικά υλικά όπως τα πλαστικά ή ο μόλυβδος (Pb) , οι αναθυμιάσεις πρέπει να συλλέγονται και να φιλτράρονται και τα φίλτρα πρέπει να χειρίζονται με

ασφάλεια και να διατίθενται σωστά. Ο πίνακας στοιχείων ασφάλειας του υλικού [Material safety data sheet (MSDS)], μπορεί να φανεί χρήσιμος για την αναγνώριση των κινδύνων. Ομοσπονδιακοί, κρατικοί και τοπικοί νόμοι πρέπει να ερευνηθούν για κανονισμούς που αφορούν στον χειρισμό των αναθυμιάσεων. Επιπρόσθετα, οι χρήστες πρέπει να συνεργάζονται στενά με τους κατασκευαστές των συστημάτων κοπής με laser για τον σχεδιασμό ενός κατάλληλου συστήματος μετακίνησης των αναθυμιάσεων για όλα τα υλικά που σκοπεύουμε να κόψουμε με το laser.

### 3.5.6 Ψυγείο

Τα laser και πολλά από τα εξαρτήματα των συστημάτων παροχής της ακτίνας απαιτούν ψύξη με νερό για να διατηρήσουν την σταθερότητα της λειτουργίας. Η χρήση του νερού της πόλης έχει απαγορευτικό κόστος, γι αυτό ένας βιομηχανικός ψύκτης νερού είναι απαραίτητος. Ο ψύκτης μπορεί να είναι είτε υδρόψυκτος (χρησιμοποιώντας το νερό της πόλης ή έναν πύργο ψύξης είτε αερόψυκτος χρησιμοποιώντας αναπόσπαστους ανεμιστήρες).

Το laser και το σύστημα παροχής της ακτίνας ίσως απαιτούν νερό ψύξης σε δυο θερμοκρασίες ώστε να αποφύγουμε την συμπύκνωση της υγρασίας σε ευαίσθητα εξαρτήματα, σε κάθε περίπτωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ένας ψύκτης διπλού κυκλώματος, είτε ένας ψύκτης και ένας βοηθητικός.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά για κατάλληλη επιλογή και εγκατάσταση ψύκτη αναφέρονται παρακάτω.

### 3.5.6 Ροή ψυχρού νερού

Ο ρυθμός ροής ισούται ή είναι μεγαλύτερος από τον ελάχιστο συνολικό ρυθμό ροής που έχει προδιαγραφεί όπως το laser να ήταν μόνο του. Αν τα εξαρτήματα προς ψύξη (εξαρτήματα ρύθμισης της εστίασης, εξαρτήματα της κατεύθυνσης της ακτίνας) είναι ενοποιημένα στο σύστημα, θα απαιτείται ρυθμός ροής μεγαλύτερος από τον συνολικό ελάχιστο ρυθμό που έχει προδιαγραφεί για επαρκή ψύξη. Εγκαθιστώντας έναν μετρητή στην γραμμή παροχής του ψύκτη θα βοηθηθεί η αναγνώριση τυχόν απαιτήσεων συντήρησης (δηλ. αντικατάσταση φίλτρων, καθαρισμός ψυγείου κ.α.). Σημειώνεται ότι τα πρόσθετα του νερού μπορεί να αυξήσουν το ιξώδες και έτσι να αλλάζουν τις απαιτήσεις για την αντλία του ψύκτη. Επιπρόσθετα, τα χειροκίνητα συστήματα by-pass επιφέρουν μείωση της ροής του νερού στο σύστημα. Αυτόματα συστήματα by-pass (τα οποία ανοίγουν μόνο κατά τη διάρκεια της τρέχουσας κατάστασης) είναι προτιμότερα αλλά είναι πιο ακριβά.

### 3.5.7 Πίεση παροχής της αντλίας

Η πίεση παροχής (όχι στατική) ισούται ή είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα της μέγιστης ολικής πτώσης πίεσης κατά μήκος του laser ( $\Delta P_{\text{laser}}$ ), συν την πτώση πίεσης από τον ψύκτη ως την είσοδο του laser ( $\Delta P_{\text{γραμμή παροχής}}$ ) συν την πτώση πίεσης από την έξοδο του laser ως τον ψύκτη ( $\Delta P_{\text{γραμμή επιστροφής}}$ ), και πρέπει να είναι διαθέσιμη στον ψύκτη [( $\Delta P_{\text{παροχής}}$ ) να μην ξεπερνά την μέγιστη πίεση παροχής που επιτρέπεται στην είσοδο του laser ( $P_{\text{μέγιστη laser}}$ )]. Οι συμβουλές του κατασκευαστή του ψύκτη για την πτώση της πίεσης στη γραμμή παροχής (συμπεριλαμβανομένων και των φίλτρων) και την πτώση πίεσης στη γραμμή επιστροφής είναι απαραίτητες, ώστε να βεβαιώνουν την επάρκεια της πίεσης παροχής του ψύκτη. Σημειώνουμε ότι η πτώση πίεσης στις γραμμές παροχής και επιστροφής εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, μερικοί από τους οποίους είναι:

1. Ο ρυθμός ροής.
2. Τα πρόσθετα του νερού.
3. Τα υλικά των γραμμών, η εσωτερική διάμετρος και το μήκος τους.
4. Η ποσότητα και η γεωμετρία όλων των εξαρτημάτων (γωνίες, κ.τ.λ.)
5. Η ποσότητα των φίλτρων και το μέγεθος τους.
6. Η ευθύτητα του σωλήνα (εάν χρησιμοποιείται).

$P_{\text{παροχής}} > \Delta P_{\text{laser}} + \Delta P_{\text{γραμμή παροχής}} + \Delta P_{\text{γραμμή επιστροφής}} < P_{\text{μέγιστη laser}}$



### 3.5.8 Έλεγχος θερμοκρασίας

Σημειώνουμε ότι μια αύξηση στην θερμοκρασία του νερού που παρέχεται στο laser επιφέρει μια μείωση στην μέγιστη ισχύ εξόδου του laser. Π' αυτό είναι σημαντικό να λειτουργεί, στην ονομαστική θερμοκρασία νερού, και ενδιάμεσα στην σταθερή θερμοκρασία που έχει προδιαγραφεί για το laser. Η σταθερότητα της θερμοκρασίας, πρέπει να διατηρείται ανεξάρτητα από το θερμικό φορτίο του laser και των τμημάτων. Αυτή μπορεί να βρίσκεται μεταξύ 10-100% από τις μέγιστες απαιτήσεις ψύξης. Η ρύθμιση της θερμοκρασίας ελέγχου του ψύκτη (και του κυκλώματος για μοντέλα που απαιτείται διπλό κύκλωμα ψύξης) προτείνεται ώστε να αποφεύγουμε λειτουργία σε συνθήκες κάτω από το σημείο δρόσου.

### 3.5.9 Ποιότητα του νερού

Χαρακτηριστικά, ένας καθαρός κρουνός μπορεί να χρησιμοποιείται για να γεμίζει το ψύκτη (παρέχοντας την ποιότητα του νερού που προδιαγράφεται για κάθε laser). Μερικές φορές προδιαγράφεται αποσταγμένο ή απιονισμένο νερό. Στην γραμμή παροχής πρέπει τα φίλτρα να μειώνουν τα μολυσματικά στοιχεία (το μέγεθος των φίλτρων δίνεται για κάθε laser). Τα φίλτρα και τα σουρωτήρια πρέπει να καθαρίζονται και να αντικαθίστανται κάθε τόσο ώστε να αποφεύγεται ο περιορισμός της ροής. Προτείνεται μια θυρίδα όρασης για επιβεβαίωση της ποιότητας του νερού. Το σύστημα του νερού πρέπει να αδειάζει και να ξαναγεμίζει τακτικά.

### 3.5.10 Εγκατάσταση σωληνώσεων

Μη διαβρωτικά υλικά (π.χ. CPVC, PVC, χαλκός και ανοξείδωτος χάλυβας) πρέπει να χρησιμοποιούνται για όλες τις επιφάνειες που βρέχονται μέσα στον ψύκτη και στα εξαρτήματα του δικτύου σωληνώσεων. Δεν χρησιμοποιούνται ανθρακούχος χάλυβας, ή γαλβανισμένοι σωλήνες εξαιτίας του υψηλού ενδεχομένου σκουριάς και διάβρωσης η οποία θα επιφέρει τυχόν ζημιές στα εξαρτήματα του laser. Ελέγχονται οι απαιτήσεις των σωληνώσεων μεταξύ του laser και του ψύκτη με τον κατασκευαστή του ψύκτη ώστε να βεβαιώνεται η ελάχιστη πτώση πίεσης και ο κατάλληλος ρυθμός ροής. Λαμβάνεται υπόψη ότι καθώς η απόσταση μεταξύ του laser και του ψύκτη αυξάνει, και καθώς ο ρυθμός παροχής αυξάνει, η εσωτερική διάμετρος των σωληνώσεων που ενώνουν το laser με τον ψύκτη πρέπει επίσης να αυξάνουν. **Σημείωση:** Για laser CO<sub>2</sub> εάν χρησιμοποιούνται σταθερές σωληνώσεις (π.χ. PVC ή χαλκός) απαιτείται μια ευέλικτη σύνδεση ώστε το laser να μπορεί να κινηθεί για να γίνει η ευθυγράμμιση της ακτίνας.

### 3.5.11 Εξαρτήματα ψύξεως

Γενικά, τα υδρόψυκτα εξαρτήματα του συστήματος παροχής της ακτίνας ψύχονται διαμέσου του βιομηχανικού ψυγείου που χρησιμοποιείται για την ψύξη του laser. Τα εξαρτήματα θα πρέπει να συνδέονται παράλληλα με το κύριο κύκλωμα ψύξης σε μονού κυκλώματος συστήματα ψύξης και να συνδέονται παράλληλα με το ανοικτό κύκλωμα ψύξης όταν έχουμε διπλά κυκλώματα ψύξης. Για συστήματα που απαιτούν ψύξη για πολλά εξαρτήματα και για εξαρτήματα που απαντούν διαφορετικούς ρυθμούς παροχής, ίσως είναι απαραίτητες αρκετές διακλαδώσεις για να επιτευχθούν οι απαιτούμενοι ρυθμοί παροχής. Ένας μετρητής παροχής και ένας διακόπτης θα πρέπει να εγκαθίστανται σε κάθε παράλληλο κύκλωμα έτσι ώστε ο ρυθμός ροής να μπορεί να ελέγχεται τόσο οπτικά, όσο και μέσω του ελεγκτή του συστήματος. Ακόμα, το υλικό για τον εύκαμπτο σωλήνα που βρίσκεται κοντά στην κεφαλή κοπής θα πρέπει να εκλέγεται ώστε να αντέχει την αντανακλώμενη ισχύ, ειδικά όταν κόβουμε υλικά με υψηλή αντανακλασιμότητα όπως το αλουμίνιο (π.χ. σωλήνα με πλεκτή επένδυση ανοξειδωτού χάλυβα).

## 3.6 Έλεγχος του συστήματος

Όλο το σύστημα κοπής πρέπει να βρίσκεται από την καθοδήγηση ενός κεντρικού ελεγκτή ικανού να κινεί το laser σε συντονισμό με το σύστημα κίνησης. Είναι ουσιώδες ο ελεγκτής να έχει επαρκώς υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας, αποτελεσματικά μοιρασμένο με τα κωδικοποιημένα σήματα, έτσι ώστε να διατηρήσει ακρίβεια και ομαλότητα στην κίνηση. Για την επεξεργασία πληροφοριών σε υψηλές ταχύτητες για ομαλή συνεχή κίνηση, ο ελεγκτής θα πρέπει να μπορεί να προ-διαβάζει εμπόδια ή πληροφορίες του προγράμματος ώστε να προσδιορίσει την απαιτούμενη επιτάχυνση ώστε να διατηρηθεί σταθερή ταχύτητα κατά την διάρκεια αλλαγής της κατεύθυνσης.

### 3.6.1 Δυναμικός έλεγχος ισχύος

Όταν συμβεί να μην μπορεί να διατηρηθεί σταθερή η ταχύτητα σ' όλη τη διάρκεια της κοπής (π.χ. κατά το περίγραμμα της κοφτερής ακτίνας), μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα που εμπλέκει ένα κλιμακωτό σύστημα laser αλληλεπίδρασης. Αξιοποιώντας την συχνότητα διαμορφώσεως των παλμών της προκαθορισμένης παλμικής ενέργειας (π.χ. ένα δεδομένο μέγιστο σημείο και το μήκος του παλμού, και μιας σταθερής πυκνότητας ισχύος), η

λειτουργία κοπής του laser μπορεί να ταιριάζει με τον πραγματικό ρυθμό μέσω μιας γραμμικής σχέσης. Από την στιγμή που αυτή η σχέση βεβαιώνεται για ένα δεδομένο υλικό πάχος, η τεχνική αυτή αφήνει το προγραμματιστή ελεύθερο να θέσει το ρυθμό παραγωγής απόλυτα βάση της μηχανής και της ζητούμενης ακρίβειας για το προς κοπή τεμάχιο.

Για πολυποικίλες διαδικασίες τα συστήματα κοπής τείνουν να χρησιμοποιούν CNC. Αυτές οι συσκευές παρέχουν ευελιξία για έλεγχο σε πολλούς άξονες. Τα χαρακτηριστικά στοιχεία του υπολογιστή που βοηθούν γενικά τον προγραμματισμό περιλαμβάνουν οθόνη CRT, πληκτρολόγιο, χειροκίνητο έλεγχο των αξόνων και ένα πλήθος από συσκευές εισόδου / εξόδου όπως δισκέτες, συνδέσεις DNC και άλλα συστήματα ενδοσύνδεσης.

Ενώ τα χαρακτηριστικά του προγραμματισμού τείνουν να διαχωρίζουν τον έναν ελεγκτή από τον άλλον, τα περισσότερα παρεχόμενα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν : γραμμική και κυκλική παρεμβολή, προγραμματισμό σε ίντσες ή μετρά, απόλυτη και προσαυξημένη διαστασιολόγηση, αξονική περιστροφή, υπόρουτινες, είναι μια ισχυρή τάση ελέγχου σε πραγματικό χρόνο όλων των χαρακτηριστικών παραμέτρων συστήματα υπολογισμού και δυνατότητες εισαγωγής επεξεργασίας και διαγραφής αποθηκευμένων τμημάτων προγραμμάτων.

Αυτή της κοπής από τμήματα προγραμμάτων ενός CNC. Αυτά περιλαμβάνουν αλλά δεν είναι περιορισμός τα : 1) ισχύ του laser 2) σχέση ισχύος, ρυθμού παραγωγής (π.χ. Δυναμικός έλεγχος ισχύος), 3) τύπος αερίου κοπής, 4) πίεση αερίου κοπής. Αυτό αφήνει μόνο την εστιακή απόσταση, την θέση εστίασης, την απόσταση και την διάμετρο του ακροφυσίου να οριστούν χειροκίνητα.

### 3.6.2 Πόλωση

Όπως προείπαμε, το φως του laser περιλαμβάνεται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Αυτά σημαίνει ότι η ακτίνα του laser κατέχει ηλεκτρικά και μαγνητικά συστατικά (π.χ. διανύσματα) που είναι σε ορθές γωνίες το ένα με το άλλο και είναι κάθετα στην κατεύθυνση της ακτίνας του laser. Είναι ο προσανατολισμός του ηλεκτρικού διανύσματος που προσδιορίζει την κατεύθυνση της πόλωσης της ακτίνας.

Η σημασία του προσανατολισμού της πόλωσης σχετίζεται με τον ρόλο που παίζει στον σχετιζόμενο βαθμό απορρόφησης της ενέργειας του laser σε κάποια υλικά, κυρίως στο ειδικό μέταλλο και τα κεραμικά προς κοπή που γίνεται παράλληλα στην πόλωση της ακτίνας παράγει στενές εγκοπές με κοφτερές ίσιες ακμές. Όσο η κατεύθυνση της ακτίνας σχηματίζει γωνία με αυτήν της πόλωσης, εμφανίζεται μια μείωση της απορρόφησης ενέργειας. Επιπρόσθετα, η ταχύτητα κοπής μειώνεται, οι εγκοπές γίνονται πιο πλατιές, και οι ακμές τείνουν να γίνουν

τραχύτερες και όχι ευθείες με την επιφάνεια του υλικού.

Όταν η κατεύθυνση της ακτίνας γίνει κάθετη μ' αυτήν της πόλωσης οι ακμές δεν είναι πλέον κεκλιμένες αλλά η ταχύτητα μειώνεται ακόμα πιο πολύ, οι εγκοπές γίνονται πιο πλατιές και η ποιότητα κοπής χειροτερεύει.

Ενώ στη θεωρία είναι επιθυμητό, δεν έχει βρεθεί ακόμα εφικτός τρόπος να διατηρήσουμε τον προσανατολισμό της πόλωσης παράλληλα με την κατεύθυνση της ακτίνας για πολύπλοκες γεωμετρίες. Προτιμότερη η κυκλική πόλωση της ακτίνας η οποία έχει επιτυχώς καταφέρει να αναιρέσει τα μη ευνοϊκά χαρακτηριστικά της γραμμικά πολωμένης ακτίνας, και γι' αυτό επιτρέπουν στον χρήστη να εξασφαλίσει σταθερά υψηλή ποιότητα αδιαφορώντας για την κατεύθυνση της κοπής.

Χαρακτηριστικά, τα laser CO<sub>2</sub> εκπέμπουν γραμμικά πολωμένο φως, το οποίο πρέπει να μετατραπεί σε κυκλικά πολωμένο φως. Εάν το επίπεδο του γραμμικά πολωμένου φωτός βρίσκεται σε 45° (σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο), τότε η κυκλική πόλωση επιτυγχάνεται κανονικά διά μέσου ενός εξωτερικού καθρέπτη, ο οποίος έχει μια ειδική επικάλυψη. Όταν επιτύχουμε την κυκλική πόλωση, πρέπει να λάβουμε όλα τα μέτρα για να διατηρήσουμε αυτή την κατάσταση.

Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση οπτικών εξαρτημάτων που επιφέρουν μια ελάχιστη αλλαγή της πόλωσης (0° εκτροπές φάσης) στην ανακυκλώσιμη ή μεταδιδόμενη ακτίνα. Τα laser Nd:YAG παράγουν υψηλότερους τρόπους λειτουργίας με τυχαίες πολώσεις, όπου στις περισσότερες περιπτώσεις δεν απαιτείται κυκλική πόλωση ειδικά λόγω του υψηλού κόστους που απαιτείται για να παραχθεί η κυκλική πόλωση.

### **3.7 Χαρακτηριστικά παροχής ακτίνας για ανακλώμενη ή μεταδιδόμενη ακτίνα**

#### **3.7.1 Ευθυγράμμιση ακτίνας**

Η αλλαγή κατεύθυνσης της ακτίνας γίνεται μέσω καθρεφτών σε 45° οποίοι επαναευθυγραμμίζουν την μη εστιασμένη πρωτογενή ακτίνα σε ορθή γωνία με τον προσπίπτων άξονα. Χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται από 1 έως 4 τέτοιοι καθρέφτες, ο καθένας προσθέτοντας περισσότερη ελευθερία ρύθμισης με κάποια απώλεια ισχύος και με αύξηση του χρόνου ευθυγράμμισης.

Ο τελευταίος καθρέφτης χαρακτηριστικά προβάλλει την ακτίνα κατακόρυφα προς τα κάτω μέσω των εξαρτημάτων εστίασης. Εάν δεν απαιτείται από το σημείο κοπής, ο κατακόρυφος προσανατολισμός ελαχιστοποιεί τις ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια της ακτίνας και απλοποιεί την ασφάλεια ενάντια στους κινδύνους από την στιγμή που η ακτίνα οδηγείται προς τα κάτω και μπορεί να απορροφηθεί και διωχθεί ανακλώμενη από το κουτί ή το

υποστηριζόμενο εργαλείο. Ο κάθετος προσανατολισμός απλοποιεί ακόμα την ανάλυση του λωμένου υλικού που εκβάλλει μέσα από την κοπή. Λανθασμένη ευθυγράμμιση της ακτίνας επιφέρει μείωση της ποιότητας κοπής. Υπάρχουν δύο βασικά αποτελέσματα της λανθασμένης ευθυγράμμισης που μειώνουν την ποιότητα κοπής. Το πρώτο είναι ότι, εάν η ευθυγράμμιση της ακτίνας είναι τέτοια ώστε η ακτίνα να εμποδίζεται ή ανακόπτεται η ισχύς στο σημείο κοπής θα μειώνεται (με μια επακόλουθη απώλεια της πυκνότητας ισχύος) και γι' αυτό υπάρχει η πιθανότητα τα εξαρτήματα παροχής της ακτίνας να πάθουν ζημιά από την μη ευθυγραμμισμένη ισχύ του laser.

Η ακτίνα μπορεί να εμποδιστεί από τους καθρέπτες αλλαγής και τα στοιχεία εστίασης ή από το ακροφύσιο του βοηθητικού αερίου. Απώλεια ισχύος λόγω ανακοπής γενικά επιδρά στην μείωση της ταχύτητας κοπής. Λανθασμένη ευθυγράμμιση και ανακοπή στο στόμιο εκροής του ακροφυσίου μπορεί να παράγει επιπρόσθετα συνεχή σκουριά ή κοπή με γωνία. Ακόμα και αν η ανακοπή της ισχύος δεν είναι σημαντική, η παρεμβολή δειγμάτων τα οποία μπορεί να προκληθούν από την ανάκλαση της εστιασμένη ακτίνας στον εσωτερικό κώνο του ακροφυσίου έχουν ως αποτέλεσμα ένα μεγαλύτερο μέγεθος σημείου από το ελάχιστο και μια ανάλογη απώλεια πυκνότητας ισχύος στο σημείο κοπής.

Δεύτερον, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του μεγέθους του σημείου (και συνεπώς την ελαχιστοποίηση των εγκοπών και την μεγιστοποίηση της ταχύτητας), η ευθυγράμμιση της ακτίνας μέσω των φακών εστίασης απαιτεί ότι η συνεπαγόμενη ακτίνα θα είναι παράλληλη με τον οπτικό άξονα. Για μεταδιδόμενη οπτική εστίαση, απαιτείται χαρακτηριστικά η συνεπαγόμενη ακτίνα να είναι παράλληλη και γενικά κεντραρισμένη (π.χ. ομοαξονική) στον οπτικό άξονα, και για ανακλώμενη οπτική εστίαση απαιτείται η συνεπαγόμενη ακτίνα να είναι κάθετη και κεντραρισμένη με τον οπτικό άξονα.

Εάν αυτές οι συνθήκες δεν συντρέχουν το αποτέλεσμα είναι ένα παραμορφωμένο ή ένα επιμηκυμένο σημείο εστίασης το οποίο μειώνει την πυκνότητα ισχύος στο τεμάχιο. Ένα αυξημένο μέγεθος σημείου, αυξάνει το πλάτος της εγκοπής και την σκουριά, και μειώνει την ταχύτητα κοπής. Ακόμα μπορεί να εμφανιστεί κοπή με κλίση.

Για μετακινούμενα συστήματα ακτίνας όπου η ακτίνα δεν είναι παράλληλη με τον οπτικό άξονα του συστήματος παροχής της ακτίνας (ειδικά στον φακό εστίασης), είναι δύσκολο, εάν όχι ακατόρθωτο, να έχουμε την εστιασμένη ακτίνα κεντραρισμένη διαμέσου του στομίου εκροής του ακροφυσίου σε όλες τις θέσεις της κεφαλής κοπής μέσα στον φάκελο εργασίας του συστήματος παροχής της ακτίνας.

### 3.7.2 Σταθερότητα παροχής της ακτίνας

Άλλος ένας παράγοντας που επηρεάζει την ευθυγράμμιση της ακτίνας είναι η σταθερότητα των δομών υποστήριξης του laser και του συστήματος παροχής της ακτίνας. Εάν το laser και το σύστημα παροχής της ακτίνας δεν βρίσκονται πάνω σε ένα στέρεο, σταθερό δάπεδο ή σε μια μόνιμη στερεή υπερδομή, μπορεί να εμφανιστεί μη ευθυγράμμιση της ακτίνας. Πρέπει να αποφεύγονται οι διακλαδώσεις κατά μήκος των ενώσεων επέκτασης (μεταξύ της γεννήτριας του laser και του συστήματος) καθώς επίσης και τοποθέτηση των συστημάτων σε περιοχές με σημαντικές δονήσεις. Χαρακτηριστικά εάν τοποθετούμε συστήματα σε άμεση εγγύτητα με πηγές δόνησης (π.χ. κοντά σε περιοχή πίεσης) η δόνηση επάγεται μη ευθυγράμμιση η οποία επηρεάζει δυσμενώς την διαδικασία και την ποιότητα. Αδυναμία να ακολουθήσουμε αυτές τις απαιτήσεις μπορεί να επιφέρει είτε «φτωχή» ευθυγράμμιση στον φακό εστίασης είτε διακοπή.

### 3.7.3 Καθαρισμός του συστήματος παροχής

Τα συστήματα παροχής της ακτίνας θα πρέπει να είναι καλά σφραγισμένα. Σωλήνες αλουμινίου και άλλα μεταλλικά καλύμματα ασφάλειας χρησιμοποιούνται γενικά γι' αυτόν τον σκοπό. Αυτό ελαχιστοποιεί το ποσό της μόλυνσης που μπορεί να εισέλθει στα οπτικά εξαρτήματα, ενώ ταυτόχρονα παρέχει κάλυμμα ασφαλείας για την αόρατη ακτίνα του laser. Επιπρόσθετα σε αυτό, το σύστημα παροχής της ακτίνας πρέπει να καθαρίζεται με ένα εσωτερικό αέριο (όπως το άζωτο) ή καθαρός ξηραμένος αέρας. Αυτό διατηρεί μια θετική πίεση μέσα στο σφραγισμένο σύστημα η οποία μειώνει την είσοδο της μόλυνσης του περιβάλλοντος χώρου (σταγονιδίου λαδιού, εξατμισθέντος νερού, καπνού, σκόνης, αναθυμιάσεων μέσα στο σύστημα παροχής της ακτίνας).

Ο καθαρισμός βοηθάει στο να κρατιούνται τα εξαρτήματα του συστήματος καθαρά και στεγνά πριν και κατά τη λειτουργία. Η μόλυνση από ξένα σώματα και σωματίδια των οπτικών εξαρτημάτων, έχει δύο βασικά επιζήμια αποτελέσματα. Πρώτον, κάθε σωματίδιο (σκόνη ή λάδι για παράδειγμα) που μολύνει κάποια από τις επιφάνειες των οπτικών, απορροφά ισχύ από την ακτίνα του laser. Δεύτερον, καθώς η επιφάνεια θα απορροφά ισχύ θα παραμορφώνεται εξαιτίας αυτού του θερμικού φορτίου. Οι φακοί εστίασης επίσης είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στην θερμική φόρτιση επειδή είναι γενικά μικρότεροι (λιγότερη θερμική μάζα) από τους φακούς εξόδου και τους καθρέφτες παροχής της ακτίνας και έχουν μεγάλη ευαισθησία στην μόλυνση (ιδιαίτερα από την διαδικασία κοπής). Παραμορφώνεται εξαιτίας του θερμικού φορτίου η οποία

θα προκαλέσει την παρέκκλιση της θέσης εστίασης. Αυτό επιδρά στην αύξηση του μεγέθους του σημείου στο σημείο κοπής και μια συνδεδεμένη απώλεια της πυκνότητας ισχύος. Η ανεπαρκής ψύξη των εξαρτημάτων παροχής της ακτίνας, ειδικά των φακών εστίασης μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα παρόμοια φαινόμενα.

Επιπρόσθετα, εάν η μόλυνση ή η υγρασία παρεμβαίνει στην πορεία της ακτίνας μέσα στο σύστημα παροχής της ακτίνας, μπορεί να εμφανιστεί μια κατάσταση λεπτού θερμικού στρώματος. Αυτό το θερμικό στρώμα συμβαίνει όταν ξένα σώματα (π.χ. σωματίδια λαδιού ή υδρογονάνθρακες όπως η ακετόνη και το οινόπνευμα) στην πορεία της ακτίνας απορροφούν μερική από την ενέργεια της ακτίνας και γι αυτό το λόγο θερμαίνεται. Η αύξηση της θερμοκρασίας ακολουθείται από μια αλλαγή στον δείκτη ανάκλασης του αέρα, η οποία προκαλεί απόκλιση της ακτίνας επιδρώντας στην εσωτερική ακτίνα (με την επακόλουθη απώλεια ισχύος και πυκνότητα ισχύος) στο σημείο κοπής) και ενδεχόμενη ζημιά στα εξαρτήματα του συστήματος παροχής.

#### **3.7.4 Μέγεθος πρωτογενούς ακτίνας**

Η πρωτογενής ακτίνα έχει διαφορετικά μεγέθη μέσα στο σύστημα παροχής της ακτίνας, και γι' αυτό επιδεικνύει μια διαφορετική ικανότητα εστίασης βασισμένη στο πως είναι τοποθετημένος ο φακός εστίασης. Το μέγεθος της πρωτογενούς ακτίνας στον φακό εστίασης είναι αντιστρόφως ανάλογο στο μέγεθος του σημείου εστίασης. Γι αυτό το λόγο για κινούμενα συστήματα ακτίνας ή για συστήματα όπου η ακτίνα διαιρείται μεταξύ δύο ή περισσότερων σταθμών εργασίας, μια διαφορά στην διαδικασία κοπής μπορεί να είναι προφανή από την μια θέση (ή σταθμό) στην άλλη. Ομοίως, όσο η θερμοκρασία του φακού εξόδου αυξάνει, ο δείκτης ανάκλασης του φακού και η γεωμετρία αλλάζουν. Αυτό αλλάζει τη θέση της «μέσης» περιοχής, και γι' αυτό αλλάζει το μέγεθος της πρωτογενούς ακτίνας (π.χ. τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης). Γενικά, η απόκλιση της ακτίνας είναι μεγαλύτερη μ' έναν «κρύο» φακό από ότι μ' έναν «ζεστό» φακό. Μια αύξηση της θερμοκρασίας του φακού συμβαίνει με: 1) αύξηση της ισχύος, 2) με αύξηση της απορροφικότητας του φακού (π.χ. εάν ο φακός εξόδου γίνει βρώμικος ή πάθει ζημιά), 3) με μείωση της ψύξης του φακού. Για παράδειγμα ένα γέμισμα από σωματίδιο (αποθέσεις άνθρακα για παράδειγμα), ή βλάβες (ρωγμές ή κοιλότητες) στον τελικό φακό μπορούν να προκαλέσουν την απορρόφηση πρόσθετης ενέργειας και την αύξηση της θερμοκρασίας και γι' αυτό το λόγο επιφέρουν την θερμική παραμόρφωση και θερμικό εστιασμό της εξερχόμενης ακτίνας. Ανεπαρκής ψύξη (π.χ. μικρός ρυθμός ροής ή υψηλότερη θερμοκρασία του νερού ψύξης) του φακού εξόδου μπορεί να προκαλέσει το ίδιο φαινόμενο. Ο θερμικός εστιασμός της πρωτογενούς ακτίνας θα επιφέρει ένα μέγεθος ακτίνας στον φακό

εστίασης, το οποίο μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετικό από αυτό της πρωτογενούς ακτίνας η οποία δεν έχει εστιαστεί θερμικά, η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα μια ασυνεπή ποιότητα κοπής. Επιπρόσθετα, η θερμική εστίαση δεν επηρεάζει μόνο το μέγεθος του σημείου της εστιαζόμενης ακτίνας, αλλά εξαιτίας της αλλαγής της απόκλισης της πρωτογενούς ακτίνας κατά την θερμική εστίαση το επίπεδο εστίασης μετατοπίζεται. Μια συγκλίνουσα πρωτογενή ακτίνα θα προκαλέσει την κίνηση του επιπέδου εστίασης προς τον φακό εστίασης, ενώ μια αποκλίνουσα πρωτογενή ακτίνα θα επιφέρει μετακίνηση του επιπέδου εστίασης μακριά από τον φακό εστίασης.

Πρακτικά, όλες οι πρωτογενείς ακτίνες του laser περνούν μέσα από κύκλους θερμικής εστίασης (από όταν ο φακός εξόδου είναι καινούργιος έως όταν απαιτεί αντικατάσταση). Τα διαστήματα αντικατάστασης προσδιορίζονται από την ποιότητα του φακού, την έκθεση σε μόλυνση, την ισχύ, και την ευαισθησία της διαδικασίας κοπής στην αύξηση του μεγέθους του σημείου. Ο ρυθμός της φθοράς μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με σωστές και στην ώρα τους συντηρήσεις του φακού εξόδου (επιθεώρηση και καθαρισμός) και βεβαιώνοντας την ακεραιότητα του φακού εξόδου και τον καθαρισμό του συστήματος παροχής της ακτίνας. Σημειώνεται ότι η μόλυνση πάνω ή η ανεπαρκής ψύξη του φακού εστίασης μπορεί να επιδράσει στο μέγεθος σημείου και στην μετακίνηση του επιπέδου εστίασης. Από την στιγμή που το μέγεθος του σημείου εστίασης σχεδόν πάντα αυξάνει καθώς ο φακός εξόδου «γερνάει», είτε η ισχύ του laser θα πρέπει να αυξάνει, είτε η ταχύτητα κοπής θα μειώνεται με σκοπό να διατηρηθεί μια διαμήκη κοπή.

Ίδια αποτελέσματα μπορούν να συμβούν και στο laser Nd:YAG. Επομένως, η πρωτογενή ακτίνα στην κεφαλή του laser έχει διαφορετική ποιότητα ακτίνας, σε σχέση με την ισχύ και γι' αυτό τον λόγο διαφορετικές διαμέτρους των σημείων εστίασης στο σημείο κοπής σε σχέση με την ισχύ.

### **3.7.5 Σημείο δρόσου**

Εάν η υγρασία είναι παρούσα πάνω στις οπτικές επιφάνειες, η βίαιη ατμοποίηση του νερού καθώς η ακτίνα προσκρούει πάνω μπορεί να προκαλέσει επιφανειακές ζημιές (παρόμοια με τις συνθήκες σπηλαιώδους διάβρωσης). Αυτή η κατάσταση είναι χαρακτηριστικά συνδεδεμένη με τα υδρόψυκτα εξαρτήματα που ψύχονται σε θερμοκρασίες κάτω του σημείου δρόσου. Όταν λειτουργεί κάτω από αυτές τις συνθήκες, το νερό να συμπυκνώνεται πάνω στην επιφάνεια που είναι εκτεθειμένη σε τέτοιο περιβάλλον. Για να αποφύγουμε αυτήν την κατάσταση θα πρέπει: 1) ο καθαρισμός του συστήματος να είναι καλός και μικρός και να εμποδίζεται η είσοδος υγρασίας στο σύστημα παροχής και 2) τα υδρόψυκτα εξαρτήματα του



συστήματος που είναι εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα (όπως η πλευρά προς τα ακροφύσια του φακού εστίασης), θα πρέπει να ψύχονται σε θερμοκρασίες πάνω από το σημείο δρόσου.

### 3.8 Χαρακτηριστικά του συστήματος παροχής με οπτική ίνα

#### 3.8.1 Τύπος ίνας και διαμέτρου σημείου

Προς το παρόν υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ινών που χρησιμοποιούνται για υψηλής ισχύος μετάδοση στα laser Nd:YAG. Η πρώτη (step-index ίνα) περιλαμβάνει ένα υλικό του πυρήνα (χαρακτηριστικά χαλαζία) και ένα εξωτερικό υλικό. Σε μια τέτοια ίνα όλες οι εσωτερικές ανακλάσεις της μεταδιδόμενης ακτίνας συμβαίνουν στην κοινή επιφάνεια του πυρήνα και της επένδυσης. Η αριθμητική ποιότητα μιας εξερχόμενης ακτίνας (BQ exit), η οποία έχει περάσει διαμέσου μιας τέτοιας ίνας, μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αριθμητική ποιότητα της πρωτογενούς εισερχόμενης ακτίνας (BQ input). Η επακόλουθη εξερχόμενη ακτίνα έχει μια κατανομή ισχύος η οποία είναι γενικά ομοιόμορφα κατανεμημένη και λιγότερο εστιασμένη. Η πραγματική ποιότητα της εξερχόμενης ακτίνας εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως:

1. Το μήκος της οπτικής ίνας.
2. Τον αριθμό των κόμβων της ίνας.
3. Την διάμετρο του πυρήνα της οπτικής ίνας (μικρότερες διαμέτροι πυρήνα διατηρούν την ποιότητα της εισερχόμενης ακτίνας καλύτερα από μεγάλες διαμέτρους). Γενικά ωστόσο, η ποιότητα της εξερχόμενης ακτίνας μπορεί να προσεγγιστεί γνωρίζοντας την ακτίνα του πυρήνα ( $\Phi_c/2$ ) και την αριθμητική οπή της οπτικής ίνας (N.A.).

$$BQ_{(exit)} = (\Phi_c/2)(N.A.)$$

Η δεύτερη οπτική ίνα (graded-index ίνα) περιλαμβάνει έναν πυρήνα και αρκετά στρώματα επένδυσης. Οι εσωτερικές ανακλάσεις συμβαίνουν με τέτοιο τρόπο ώστε η ποιότητα της εισερχόμενης ακτίνας που ευθυγραμμίζεται σωστά μέσα στην ίνα διατηρείται δύσκολα. Αυτές οι ίνες χρησιμοποιούνται σπάνια σε laser υψηλών ισχύων γιατί:

- 1) Είναι ακριβές στην κατασκευή.
- 2) Είναι πολύ ευαίσθητες στην ευθυγράμμιση της εισερχόμενης ακτίνας στην ίνα.
- 3) Εξαιτίας του ότι τα laser Nd:YAG έχουν χαρακτηριστικά πολύ μικρή ποιότητα ακτίνας, αυτές οι ίνες επιφέρουν μονάχα οριακές βελτιώσεις της διαμέτρου και του βάθους εστίασης σε σύγκριση με τις προηγούμενες.

### 3.8.2 Ευθυγράμμιση

Λανθασμένη ευθυγράμμιση μια εισερχόμενης εστιασμένης ακτίνας μέσα στην οπτική ίνα μειώνει την ισχύ που μεταδίδεται διαμέσου της ίνας και γι αυτό το λόγο μειώνει την διαθέσιμη

ισχύ στον ρυθμιστή εστίασης. Ακόμα, η μη ευθυγράμμιση στην είσοδο της ίνας μπορεί να προκαλέσει ζημιά και σε πολλές περιπτώσεις ζημιές στην οπτική ίνα μη επισκευάσιμες. Σχετιζόμενη με την ευθυγράμμιση, σημειώνουμε ακόμα ότι η εστιαζόμενη ακτίνα στο τεμάχιο μπορεί να εμποδιστεί στο ρυθμιστή εστίασης και στο ακροφύσιο του βοηθητικού αερίου ή στο στόμιο εκροής του ακροφυσίου.

### 3.8.3 Σταθερότητα συστήματος

Όπως και στα συστήματα παροχής με μετάδοση ή με αντανάκλαση, η σταθερότητα της δομής υποστήριξης για το laser Nd:YAG και τους σταθμούς της εργασίας επηρεάζει την ποιότητα κοπής. Εάν το laser βρίσκεται σε μια περιοχή με έντονες δονήσεις (π. χ. κοντά σε μια περιοχή πίεσης) μπορεί να συμβαίνουν τυχαίες μη ευθυγραμμίσεις στην εισερχόμενη ακτίνα στην οπτική ίνα. Παρομοίως, η δόνηση επιφέρει κίνηση του ρυθμιστή εστίασης και των εξαρτημάτων της κοπής και μπορεί να προκαλέσει μια κυκλική εκτός εστίασης κατάσταση, η οποία αλλάζει το μέγεθος του σημείου εστίασης στο τεμάχιο και επίσης επηρεάζει την ποιότητα κοπής. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο όταν αξιοποιούμε ένα ρομπότ για τον χειρισμό είτε τον ρυθμιστή εστίασης είτε του κομματιού που θα κόψουμε. Η σταθερότητα του robot (σε όλες τις κατευθύνσεις και με όλες τις αναμενόμενες ταχύτητες, επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις) πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη.

### 3.8.4 Συνέπειες της πρωτογενούς ακτίνας

Όπως προείπαμε, η πρωτογενής ακτίνα στην κεφαλή του laser έχει διαφορετική ποιότητα σε σχέση με την ισχύ για ένα Nd:YAG laser. Τα συστήματα παροχής της ακτίνας με μετάδοση ή με αντανάκλαση επηρεάζονται σημαντικά από αυτό γιατί μια αλλαγή στην ποιότητα ακτίνας έχει σαν αποτέλεσμα μια αλλαγή στο μέγεθος του σημείου εστίασης και κατά συνέπεια μια απώλεια στην πυκνότητα ισχύος. Ωστόσο στα συστήματα παροχής με οπτική ίνα, ιδιαίτερα σε αυτά με step index ίνες, αυτή η συνέπεια είναι συνήθως ασήμαντη. Ο λόγος είναι ότι το σύστημα παροχής με οπτική ίνα παράγει μια κατανομή ισχύος στην έξοδο της οπτικής ίνας ανεξαρτήτως της ποιότητας της εισερχόμενης ακτίνας. Και ενώ αυτό διατηρεί την

ποιότητα κοπής σταθερή, η κατανομή δεν έχει την ικανότητα εστίασης της πρωτογενούς ακτίνας. Γι' αυτό το λόγο η ποιότητα κοπής με ένα σύστημα παροχής με οπτική ίνα θα είναι μειωμένη σε σχέση με ένα σύστημα παροχής με μετάδοση ή αντανάκλαση. Η ευελιξία ωστόσο, της οπτικής ίνας, σε πολλές περιπτώσεις υπερτερεί αυτής της συνέπειας. Ωστόσο, εάν η θερμική παραμόρφωση από ένα Nd:YAG laser των φακών εξόδου, επιδρούν στο μέγεθος του σημείου κατά τέτοιο τρόπο που υπερπληρεί την διάμετρο του πυρήνα της οπτικής ίνας, η διαδικασία της κοπής θα επηρεαστεί. Αυτό συμβαίνει γιατί η υπερπλήρωση της οπτικής ίνας σημαίνει απορρόφηση της ακτίνας μέσα στην οπτική ίνα από το υλικό της επένδυσης, και κατά συνέπεια την απώλεια ισχύος και πυκνότητας ισχύος στο σημείο κοπής. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε εάν : 1) υπάρχει μια σημαντική θερμική επίδραση στην διαδικασία, όπου το μέγεθος του σημείου είναι κανονικά πολύ κοντά στην διάμετρο του πυρήνα της ίνας είτε 2) υπάρχει μια υπερβολική θερμική επίδραση στην διαδικασία όπου το μέγεθος του σημείου είναι κανονικά πολύ μικρότερο από την διάμετρο της οπτικής ίνας.

### **3.8.5 Διαμορφώσεις οπτικής ίνας**

Ένα από τα πολλά πλεονεκτήματα που προσφέρει η παροχή ακτίνας με οπτική ίνα είναι η δυνατότητα να μοιράζει την ακτίνα μεταξύ πολλών στοιχείων (θέσεων). Με τα συστήματα παροχής με μετάδοση ή με αντανάκλαση μόνο η λειτουργία αλλαγής τροχιάς είναι πρακτική, και μόνο μεταξύ δυο σταθμών. Ο χειρισμός της ευθυγράμμισης της ακτίνας καθώς και της απόκλισης είναι δυο βασικοί περιορισμοί. Ωστόσο, μ' ένα σύστημα παροχής με οπτική ίνα, το μήκος αυτής δεν έχει ουσιαστικά καμία επίδραση στην μεταδιδόμενη ισχύ ή στην ποιότητα της εξερχόμενης ακτίνας.

## **3.9 Περίληψη των επιδράσεων της παροχής της ακτίνας στην ενέργεια κοπής.**

### **3.9.1 Ενέργεια κοπής**

1. Η ενέργεια κοπής (μαζί με την αποδοτικότητα) προσδιορίζει το μέγιστο πάχος κοπής και είναι ευθέως ανάλογη στην πυκνότητα ισχύος και αντιστρόφως ανάλογη στην ταχύτητα κοπής.

2. Υπάρχει πάντα μια συναλλαγή μεταξύ της διαμέτρου του σημείου και του βάθους εστίασης με την εστιακή απόσταση.

3. Η πυκνότητα ισχύος μειώνεται όταν:

α) Η ισχύς μειώνεται μέσω των:

1) Αποκοπή της ακτίνας εξαιτίας της «φτωχής» ευθυγράμμισης ή λόγω εγκατάστασης σε μη σταθερή θέση.

2) Αποκοπή της ακτίνας εξαιτίας θερμικού σφάλματος (για συστήματα παροχής με μετάδοση ή αντανάκλαση).

3) Μόλυνση των φακών παροχής της ακτίνας ή χαλασμένων φακών.

4) «Πιτσιλίσματα» πάνω στον φακό εστίασης.

5) Όταν η θερμική παραμόρφωση των ράβδων του Nd:YAG ή των φακών οδηγεί σε υπερπλήρωση του πυρήνα της οπτικής ίνας (για συστήματα οπτικών ινών).

β) Η διάμετρος του σημείου αυξάνει μέσω των:

1. Λανθασμένης εστίασης.

2. Ευθυγράμμισης που δεν είναι ομοαξονική στον φακό εστίασης (για τα συστήματα παροχής με μετάδοση ή αντανάκλαση).

3. Μειωμένου μεγέθους πρωτογενούς ακτίνας, λόγω θερμικής εστίασης των φακών εξόδου ή της μετακινούμενης ακτίνας εξαιτίας των χαρακτηριστικών μετάδοσης της ακτίνας (συστήματα μετάδοσης ή αντανάκλασης).

4. Εκτροπής της θέσης του τεμαχίου έξω από την εστίαση λόγω της ανοχής του ή της επαναληψιμότητας ή σταθερότητας.

5. Θερμικής μετακίνησης του σημείου εστίασης εξαιτίας της ανεπαρκούς ψύξης ή της μόλυνσης πάνω στον φακό εστίασης.

### 3.9.2 Αποδοτικότητα

1) Η αποδοτικότητα προσδιορίζει πόση από την διαθέσιμη ενέργεια κοπής μεταφέρεται και απορροφάται στο σημείο κοπής (και γι' αυτό τον λόγο γίνεται ενέργεια κοπής).

2)Επηρεάζεται από τα παρακάτω:

- 1.Τύπος του laser(π.χ. μήκος κύματος).
- 2.Πυκνότητα ισχύος.
- 3.Αγωγιμότητα και ανακλασιμότητα του υλικού.

### 3.9.3 Ασφάλεια των laser

Ότι αφορά την ασφάλεια μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε πολλές κατηγορίες, μερικές από τις οποίες είναι:

1. Υψηλές εντάσεις ρεύματος και σχετιζόμενοι κίνδυνοι λόγω ηλεκτρισμού.
2. Κίνδυνοι από το laser για τα μάτια και το δέρμα.
3. Κίνδυνοι από την παραγωγή αναθυμιάσεων του laser.
4. Χειρισμός επικίνδυνων υλικών (π.χ. φίλτρα από το σύστημα εξαγωγής, φακοί και τις αντλίες κενού του λαδιού).
5. Κίνδυνοι φωτιάς και εκρήξεων.
6. Κίνδυνοι από τα επίπεδα θορύβου.
7. Κίνδυνοι που συνδέονται με τα συμπιεσμένα αέρια.

Ο κανονισμός για την ασφαλή χρήση των laser είναι το ANSI Z1361 και είναι εγκεκριμένος από το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Κανονισμών. Γενικά όλοι οι χρήστες laser θα πρέπει να καθορίζουν έναν υπεύθυνο ασφάλειας για τα laser ο οποίος θα αναλαμβάνει υπεύθυνα την εφαρμογή αυτού του κανονισμού (το οποίο απαιτεί όχι μόνο την αναγνώριση και εκτίμηση των κινδύνων αλλά και κριτήρια για τις μετρήσεις ελέγχου, την εκπαίδευση και την ιατρική επιτήρηση).

### 3.9.4 Λειτουργικό κόστος

Το λειτουργικό κόστος των συστημάτων κοπής με laser μπορεί να εκτιμηθεί εάν τα στοιχεία της εφαρμογής είναι γνωστά. Ένας τρόπος για να υπολογίσουμε το κόστος είναι να το υπολογίσουμε ανά ώρα (ή ανά μονάδα μήκους κοπής) ενώ θα πρέπει να αναχθούν μερικά από τα πιο σημαντικά έξοδα συντήρησης σε ωριαία νούμερα.

### 3.10 Μελέτη για την διαδικασία κοπής

#### 3.10.1 Κατάλληλα υλικά για κοπή με laser

Πολλά υλικά που περιέχουν σίδηρο και άλλα που δεν περιέχουν μπορούν να κοπούν με laser. Κάθε υλικό αντιδρά διαφορετικά στις επιδράσεις CO<sub>2</sub> και Nd:YAG laser, με αποτέλεσμα ορισμένα από αυτά να μην είναι κατάλληλα για κοπή με laser. Για αυτό ακριβώς το λόγο, η καταλληλότητα ενός υλικού στην κοπή με laser εξαρτάται από την ανταπόκριση που θα έχει στο μήκος κύματος και στην ενέργεια του laser. Αυτή η αλληλεπίδραση υλικού - laser εξαρτάται από τέσσερις παράγοντες - κλειδιά :

1.Ποιότητα επιφάνειας: πόσο καλά το υλικό απορροφά αρχικά την ενέργεια

2.Ιδιότητες της ροής θερμότητας : Οι δυνατότητες του υλικού για θερμική διάχυση και αγωγιμότητα.

3.Αναγκαίες μετατροπές της θερμότητας :Πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας επιφέρουν αλλαγές, όπως τροποποίηση υλικού, συγκεκριμένη παροχή θερμότητας και επιπλέον θερμότητα τήξης και εξαέρωσης.

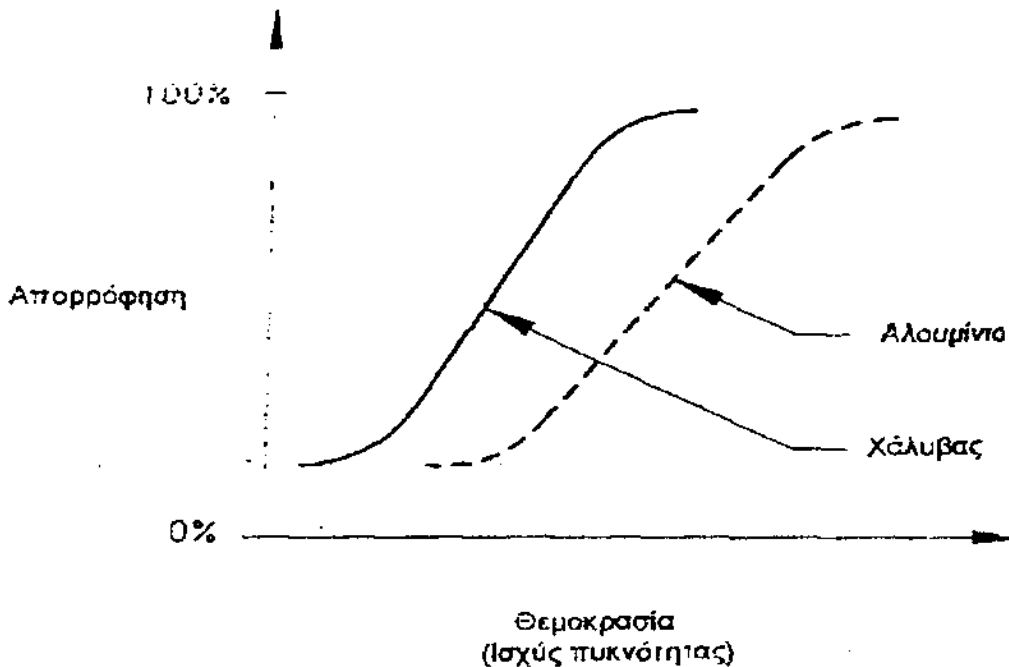
4.Αντανακλαστικότητα της ζώνης κοπής : αυτή εξαρτάται από πολλά πράγματα, περιλαμβάνοντας α) αντανακλαστικότητα υλικού στις εκάστοτε θερμοκρασίες β)λιωμένη γεωμετρική ζώνη κοπής (μακροσκοπικά) γ) λιωμένη γεωμετρική επιφάνεια (μικροσκοπικά) δ) φυσική κατάσταση του λιωμένου υλικού στη ζώνη κοπής (στερεά, υγρά, αέρια, πλάσμα), ε) χημική κατάσταση του υλικού στη ζώνη κοπής (π.χ. οξειδωμένο υλικό) και στ) θερμοκρασία και ομοιομορφία θερμοκρασίας της ζώνης κοπής.

Όμως εντάσεις υψηλών ισχύων (π.χ. υψηλή ισχύς, τέλεια ποιότητα ακτίνας, μικρή εστιακή απόσταση ή υψηλής τιμής παλμός) μπορούν να ξεπεράσουν τις ενεργειακές απαιτήσεις της 1) και 3) περίπτωσης που αναφέραμε παραπάνω, ακόμα και αν το υλικό μπορεί γενικά να μην προσαρμόζεται καλά με το μήκος κύματος του laser.Για παράδειγμα το αλουμίνιο δεν μπορεί να κοπεί σταθερά με τα περισσότερα CO<sub>2</sub> laser που λειτουργούν στα 500 Watts CW, με 127mm (5") εστιακή απόσταση. Όμως, εάν έχουμε 63,5mm (2,5") εστιακή απόσταση τότε η διαδικασία κοπής μπορεί να γίνει, επειδή η μειωμένη εστιακή απόσταση αυξάνει την ένταση της ισχύος της συγκεντρωμένης ακτίνας. Το ίδιο συμβαίνει και με την κοπή του χαλκού χρησιμοποιώντας 1000W σε CO<sub>2</sub> laser.Οι πληροφορίες που ακολουθούν αποσκοπούν στην παροχή οδηγιών για δυνατότητα κοπής στις πιο σημαντικές κατηγορίες υλικών, λαμβάνοντας υπόψη του παραπάνω παράγοντες.

### 3.10.2 Μέταλλα

Παρόλο που σε θερμοκρασία δωματίου σχεδόν όλα τα μέταλλα έχουν υψηλή ανακλαστικότητα στις υπέρυθρες ακτίνες ενέργειας, το CO<sub>2</sub> laser με 10,6 εκατομμυριοστά του μέτρου μήκος κύματος χρησιμοποιείται με επιτυχία σε πολλές εφαρμογές κοπής μετάλλων. Η αρχική απορροφητικότητα μπορεί να κυμανθεί από 10% έως το λιγότερο 0,5% της παρακείμενης ενέργειας. Όμως η συγκεντρωμένη ακτίνα του laser, που παρέχει εντάσεις ισχύος πάνω από 1 εκατομμύριο Watts ανά τετραγωνικό εκατοστόμετρο ( 6 εκατομμύρια ανά τετραγωνική ίντσα ) μπορεί να λιώσει αμέσως την επιφάνεια ενός μετάλλου (σε κλάσματα δευτερολέπτου). Η απορροφητικότητα των περισσότερων λιωμένων μετάλλων αυξάνεται ραγδαία με την θερμοκρασία, μεγαλώνοντας την απορροφητικότητα της ενέργειας από 80 - 100% (σχήμα 3.12).

Απορρόφηση σε σχέση με θερμοκρασία



Σχήμα 3.12: Απορρόφηση σε σχέση με την θερμοκρασία

## **Μαλακός και ανθρακούχος χάλυβας ( CO<sub>2</sub>=ιδανικό, Nd:YAG=ιδανικό)**

Τα κοινά ατσάλια μέχρι 20 mm(0,79") ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στην οξυγονούχο κοπή με laser. Οι εγκοπές είναι μικρές [τόσο μικρές όσο 0,1 (0,004") για λεπτό υλικό ] και οι επακόλουθες θερμικά επηρεασμένες ζώνες είναι αμελητέες, ειδικά για μαλακό χάλυβα και χάλυβα μικρής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Από την άλλη μεριά οι ακμές κοπής είναι απαλές, καθαρές και τετράγωνες. Σε ορισμένες σπάνιες περιπτώσεις, έχει διαπιστωθεί ότι η παρουσία ακαθαρσιών (όπως κομμάτια από άνθρακα, φώσφορο ή και θειάφι) μέσα σε μαλακό χάλυβα μπορεί να προκαλέσει μικροεκρήξεις, και γι' αυτό ακριβώς το λόγο σκληρότητα γύρω από την ακμή κοπής. Έτσι λοιπόν η χρήση όσο το δυνατόν λιγότερου ακάθαρτου ατσαλιού (π.χ. ψυχρής έλασης) θα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή βελτιωμένης ποιοτικά ακμής.

Όταν μέσα στο ατσάλι υπάρχει αρκετός άνθρακας, τότε η ποιότητα των ακμών κοπής είναι αρκετά καλή, αλλά σταδιακά θα καταλήξει σε σκλήρυνση αυτών των ακμών και σε μια αυξανόμενη HAZ (Θ.Ε.Ζ. = θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη). Αυτή η κατάσταση μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα, εάν το παραγόμενο κομμάτι από την κοπή με laser απαιτεί διαφορετική διαδικασία μηχανικής κοπής και εξειδικευμένους τρόπους σχηματισμού. Επιπλέον, η αυξανόμενη σκλήρυνση των ακμών κοπής αυξάνει και την πιθανότητα ραγίσματός τους, με αποτέλεσμα την αχρήστευση του παραγόμενου κομματιού. Η θέρμανση των μετάλλων και η κοπή τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ελαχιστοποίηση αυτών των προβλημάτων. Ακόμα και η συμβολή του άνθρακα μπορεί επίσης να μειώσει την ταχύτητα κοπής, καθώς και την υψηλή πυκνότητα υλικού, πράγμα που μπορεί να επιτευχθεί και με την βοήθεια του οξυγόνου.

Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι ότι η καύση του άνθρακα πραγματοποιείται στο ακροφύσιο οξυγόνου σχηματίζοντας διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) το οποίο με τη σειρά του διαλύει το οξυγόνο στο σημείο κοπής.

## **Ανοξειδωτο Ατσάλι ( CO<sub>2</sub> = Ιδανικό, Nd :YAG = Ιδανικό)**

Τα laser έχουν αποδειχτεί χρήσιμα εργαλεία κοπής για την κατασκευή μεταλλικών κομματιών φτιαγμένων από ανοξειδωτο ατσάλι. Η ελεγχόμενη θερμότητα της ακτίνας του laser επιτυγχάνει να ελαχιστοποιεί την Θ.Ε.Ζ. (θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη) γύρω από τις ακμές κοπής βοηθώντας με αυτό τον τρόπο το υλικό να διατηρήσει την διαβρωτική του αντίσταση. Δεδομένου ότι το ανοξειδωτο ατσάλι δεν αντιδρά τόσο καλά με το οξυγόνο όσο ο μαλακός



χάλυβας [ χάρη στο παθητικό στρώμα οξειδίου του χρωμίου ( $Cr_2O_3$ ), το οποίο βοηθά στην παραγωγή λιωμένου σιδήρου από την ροή οξυγόνου, δημιουργώντας εξωθερμική οξείδωση ], οι ταχύτητες κοπής για το ανοξειδωτο ατσάλι με την συμβολή οξυγόνου είναι ελαφρώς μειωμένες σε σχέση με τις συγκρινόμενες πυκνότητες κοινού ατσαλιού.

Όσον αφορά την επακόλουθη ποιότητα κοπής, τα μαρτενσιτικά και τα φεριτικά (σειρά 400) ανοξειδωτα ατσάλια παρέχουν καθαρές και ομαλές ακμές κατά την κοπή τους. Η παρουσία νικελίου μέσα στα ωστενιτικά (σειρά 300) ανοξειδωτα ατσάλια επηρεάζει την ενέργεια που παράγεται σε μεγάλο βαθμό και η οποία μεταφέρεται μέσα στο υλικό. Συγκεκριμένα, το υψηλό ιξώδες και η επιφανειακή τάση του λιωμένου νικελίου ή οξειδίων νικελίου / χρωμίου που παράγονται κατά τη διαδικασία κοπής τα εξαναγκάζει στη συνέχεια να μεταφερθούν και να προσκολληθούν σαν σκουριά στο πίσω μέρος του νέου κομματιού.

Καθώς η χρησιμοποίηση αερίων υψηλών ταχυτήτων μπορούν να απομακρύνουν αποτελεσματικά την σκουριά σε υλικά μέχρι 1.0mm (0,040") πάχος τα οξειδωμένα αποθέματα μέχρι 0.5mm (0,020") βρίσκονται συχνά σε παχύτερα διασταυρωμένα τμήματα, όταν η διαδικασία κοπής γίνεται με οξυγόνο. Επιπρόσθετα, ένα τμήμα χρωμίου και οξειδωμένου σιδήρου (δηλ. $Cr_2O_3$  και  $Fe_2O_3$ ) συναντάται στην ακμή κοπής του νέου παραγόμενου κομματιού. Επειδή το χρώμιο έχει την ικανότητα να οξειδώνεται, στη συνέχεια και αφού έχει τελειώσει η διαδικασία λιωσίματος, μεταφέρεται στην επιφάνεια για να αντιδράσει με το οξυγόνο. Όλη αυτή η πορεία καταλήγει σε μια επαναστεροποιημένη λιωμένη περιοχή, η οποία βρίσκεται ακριβώς κάτω από το οξειδωμένο τμήμα που έχει λιγότερο χρώμιο από το συνολικό υλικό. Τα μικρά σπασίματα στην σκληρή και εύθραυστη οξειδωμένη επιφάνεια μεταλλάσσουν αυτή την περιοχή που καταλήγει σε μια ακμή κοπής υλικού με λιγότερη διαβρωτική αντίσταση σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον.

Εάν τις ακμές κοπής τις συγκολλούσαμε, τότε τα οξειδία που δημιουργούνταν σε αυτό ακριβώς το σημείο του υλικού θα εγκλωβίζονταν στο συγκολλημένο μέταλλο και θα μπορούσαν να προκαλέσουν την μείωση της στατικής αντοχής καθώς και της αντοχής σε κόπωση του τεμαχίου. Εάν τώρα τις ακμές που προκύπτουν από την κοπή υλικών τις συγκολλούσαμε με διαμόρφωση επικάλυψης, τότε η σκουριά θα ερχόταν σε επαφή με διάφορα συνδεδεμένα μεταξύ τους κομμάτια. Εκτός από την αύξηση έως και 50% της ταχύτητας που χρειάζεται το οξυγόνο για να συμβάλλει στη διαδικασία κοπής, ένα επιπλέον εσωτερικό βοηθητικό αέριο (όχι εξωθερμική ενέργεια) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει: μία ολοκληρωμένη συγκόλληση, με οξειδωμένη και χωρίς σκουριά άκρη κοπής υλικού, που έχει την ίδια διαβρωτική αντίσταση, όπως το συγκεντρωμένο όλο μαζί υλικό.

Η διαδικασία κοπής με άζωτο σε υψηλή πίεση είναι πάρα πολύ γνωστή και παρόλο που δεν είναι εντελώς εσωτερική, μπορεί να παράγει ακμές κοπής υλικού υψηλής ποιότητας,

οξειδωμένες και χωρίς σκουριά με πάχος μέχρι 10mm (0,39"). Γενικά η διαδικασία κοπής αζώτου είναι πιο φτηνή από την κοπή ενός πραγματικού εσωτερικού αερίου, όπως είναι το αργόν. Η αυξημένη κατανάλωση αερίου και κόστους συνδέεται με την διαδικασία κοπής εσωτερικού αερίου υψηλής πίεσεως. Επιπρόσθετα, το ακροφύσιο αερίου, οι φακοί και τα εξαρτήματα παροχής του αερίου πρέπει να είναι κατάλληλα για υψηλές πιέσεις.

### **Κράμα ατσαλιού (CO<sub>2</sub> = Ιδανικό, Nd:YAG= Ιδανικό)**

Αν και διεξάγεται έλεγχος στην ποσότητα και διανομή των υλικών που περιέχουν κυρίως σίδηρο και γενικότερα επίσης στα κατώτερα αναμεμειγμένα επίπεδα υλικών, τα περισσότερα κράματα ατσαλιού θεωρούνται κατάλληλα για την διαδικασία κοπής με laser και παράγουν νέα κομμάτια καλύτερης ποιότητας, σε σχέση με τον ψυχρής ελάσεως ανθρακούχο χάλυβα. Τα αρχικά στοιχεία κράματος (π.χ. ο άνθρακας, το πυρίτιο, το μαγγάνιο, το χρώμιο, το νικέλιο και το μολυβδαίνιο) έχουν μόνο μια μικρότερη (και συνήθως θετική) επίδραση στην ποιότητα του νέου παραγόμενου κομματιού, αλλά γενικά επεμβαίνουν ενεργά σε ό,τι έχει σχέση με την αντίδραση οξείδωσης σιδήρου. Το συμπέρασμα λοιπόν που βγαίνει από όλα αυτά είναι ότι τα κράματα ατσαλιού- κόβονται με μικρότερο ρυθμό από ότι ο μαλακός χάλυβας. Η σκουριά είναι μερικές φορές εμφανής, αλλά σε γενική βάση λιγότερη από αυτήν που υπάρχει στα ανοξειδωτα ατσάλια.

Αρκετά συχνά προστίθεται πυρίτιο (μέχρι 4% περίπου) για να υπάρχει καλύτερη ηλεκτρική απόδοση (δηλ. μειώνει τις απώλειες των ρευμάτων eddy και αυξάνει την αντίσταση στην οξείδωση υψηλής θερμοκρασίας). Όμως, το πυρίτιο αποκλείει την οξείδωση σιδήρου και αυξάνει επίσης το ιξώδες του λιωμένου υλικού, επιφέροντας πιο αργές ταχύτητες κοπής και αυξημένη σκουριά.

Στην περίπτωση παρασκευής μετάλλων, τα οποία συγκεντρώνονται κατά ομάδες, η ανάπτυξη σκουριάς έχει αρνητικές επιπτώσεις. Η παλμική διαδικασία κοπής και τα βοηθητικά αέρια βοηθούν μείωση της εμφάνισης σκουριάς πάνω στα μέταλλα. Οι ομοαξονικοί εκτοξευτήρες αερίου είναι τοποθετημένοι κάτω από τη ζώνη κοπής και έχουν τοποθετηθεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η σκουριά να μεταφέρεται στην αχρηστευμένη πλευρά του νέου παραγόμενου κομματιού, διατηρώντας με αυτό τον τρόπο το ένα μέρος κοπής του προερχόμενου υλικού χωρίς σκουριά. Η πρόσθεση μαγγανίου, θείου και άνθρακα, με απώτερο σκοπό τη βελτίωση της ικανότητας μηχανοποίησης, επιδρά ελάχιστα στην διαδικασία κοπής όταν οι αναμειξεις είναι χαμηλές (Mn < 0,3%, S < 0,1% και C < 0,1%). Ωστόσο εάν τα μείγματα έχουν περίπου τις μέγιστες τιμές τους (Mn-1,5%, S-0,3% C-0,5%), οι

ταχύτητες κοπής μειώνονται, επειδή η δημιουργία των αερίων CO<sub>2</sub> και SO<sub>2</sub> διαλύει το οξυγόνο που βρίσκεται στην μπροστινή πλευρά του παραγόμενου κομματιού. Έτσι μ' αυτόν τον τρόπο μειώνεται η διαδικασία οξειδωσης του σιδήρου. Η σκουριά επίσης αυξάνεται, επειδή ταυτόχρονα μεγαλώνει και το ιξώδες του λιωμένου υλικού.

Τα υλικά που είναι πάρα πολύ ανθεκτικά, όπως το AISI-SAE 4130 (χρώμιομολυβδαινιούχος χάλυβας) και 4340 (χρωμιονικελιομολυβδαινιούχος χάλυβας) έχοντας υποβληθεί στην διαδικασία κοπής με laser, παράγουν εξαιρετικές ακμές κοπής, οι οποίες είναι τετράγωνες και καθαρές. Αντίθετα, τα κράματα ατσαλιού παράγουν μαρτενσιτικές ακμές, οι οποίες είναι εύθραυστες, αλλά γενικά δεν σπάνε.

### **Εργαλεία από ατσάλι (CO<sub>2</sub> = Ιδανικό, Nd:YAG= Ιδανικό)**

Δεδομένου ότι τα εργαλεία από ατσάλι μοιάζουν πάρα πολύ με τα κράματα ατσαλιού, τα περισσότερα από αυτά αντιδρούν ικανοποιητικά στην διαδικασία κοπής με laser. Εξαιρούνται τα εργαλεία κοπής με υψηλά επίπεδα βολφραμίου [ π.χ βολφράμιο υψηλών ταχυτήτων (Γκρουπ T) και βολφράμιο θερμών εργασιών (αποτελούν μέρος του Γκρουπ H)] τα οποία κρατούν την θερμότητα σε υψηλά επίπεδα, προκαλώντας μειωμένες ταχύτητες κοπής και παραγόμενα κομμάτια υλικών που έχουν καμένες ακμές και λίγη σκουριά.

### **Αλουμίνιο και Κράματα Αλουμινίου ( CO<sub>2</sub> = Μέτριο, Nd:YAG = Καλό)**

Χάρη στην υψηλή θερμική αγωγιμότητα και υψηλή αντανάκλαστικότητα που υπάρχει στο μήκος κύματος ενός CO<sub>2</sub> laser, το αλουμίνιο απαιτεί υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας laser για να μπορέσει να πραγματοποιήσει διαδικασίες κοπής συγκριτικά με τις ανάγκες του ατσαλιού. Αυτό σημαίνει την ανάγκη παροχής ποιοτικής ακτινοβολίας laser και ικανής για να προσφέρει τουλάχιστον 500W. Τα laser με 1-2KW περιορίζουν τις διαδικασίες κοπής για πάχος υλικών κάτω από 4 mm (0,16"). Παρόλο που οι πολύ υψηλές εντάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κοπή του αλουμινίου και των κραμάτων αλουμινίου, τα laser Nd:YAG υψηλών εντάσεων είναι περισσότερο κατάλληλα για το αλουμίνιο.

Κατά τη διάρκεια κοπής το βοηθητικό αέριο επιτυγχάνει πρωταρχικά να απομακρύνει το λιωμένο υλικό από τη ζώνη κοπής. Ακόμα και αν το οξυγόνο χρησιμοποιείται ως βοηθητικό αέριο, η οξειδωση του αλουμινίου σχηματίζοντας Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> εξαλείφεται, επειδή παράγει ένα αδιαπέραστο οξειδωτικό στρώμα που απομακρύνει την λιωμένη μεταλλική επιφάνεια από το οξυγόνο (παρατηρούμε ότι η ικανότητα του να οξειδώνεται, ακόμα και σε

θερμοκρασία δωματίου, είναι αυτή που δημιουργεί στο αλουμίνιο την διαβρωτική του αντίσταση, προερχόμενη από το σχηματισμό ενός διαφανούς παθητικού στρώματος οξειδίου).

Όμως, χάρη στην υψηλή επιφανειακή ένταση του λιωμένου υγρού εξαιτίας της ταχύτατης ψύξης που προκαλείται από την υψηλή θερμική αγωγιμότητα του αλουμινίου και την υψηλή θερμοκρασία στερεοποίησης περίπου 2017 °C (3663 °F), έχουμε τον σχηματισμό σκουριάς στις κατώτερες ακμές κοπής. Ένας τρόπος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να απομακρύνει την σκουριά προς την άχρηστη πλευρά κοπής. Ο αέρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτό τον σκοπό, αφού το αλουμίνιο δεν απαιτεί χημική διαδικασία. Η υψηλή πίεση αερίου κοπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελαχιστοποιήσει την σκουριά επειδή η απουσία του μειώνει την θερμοκρασία στερεοποίησης του λιωμένου αλουμινίου [το οποίο στερεοποιείται περίπου στους 659°C (1218°F)]. Ακόμα και χωρίς αυτές τις τεχνικές, η σκουριά μπορεί να απομακρυνθεί εύκολα (όπως τρίβοντας ή ξύνοντας την), αλλά είναι πολύ πιθανόν να παρουσιαστούν στην επιφάνεια κοπής διάφορα ραγίσματα. Η εμφάνιση αυτών των μικρών ραγισμάτων (και η μεγάλη Θ.Ε.Ζ που προκαλείται από την υψηλή θερμική αγωγιμότητα) εμποδίζει την χρήση laser για την κατασκευή δομικών συνθετικών κομματιών, όπως εκείνων που παράγονται στην αεροδιαστημική βιομηχανία.

### **Χαλκός και κράματα χαλκού (CO<sub>2</sub>=Δύσκολο, Nd:YAG=Μέτριο)**

Ο χαλκός έχει μικρότερη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας από το CO<sub>2</sub> laser. Με εξαίρεση το χρυσό και το ασήμι, ο χαλκός έχει μεγαλύτερη αγωγιμότητα και αντανάκλαστικότητα. Όμως ο χαλκός μπορεί να κοπεί με τα KW ισχύος των CO<sub>2</sub> laser τα οποία έχουν πολύ καλή ποιότητα ακτίνας. Το οξυγόνο κοπής χαλκού και κραμάτων χαλκού έχει περισσότερη επιτυχία από την ίδια την διαδικασία κοπής επειδή η οξειδωτική αντίδραση (CuO) παράγει περισσότερη ενέργεια κοπής και το οξειδωτικό στρώμα το οποίο καλύπτει τη ζώνη κοπής βελτιώνει την απορρόφηση. Τα συνηθισμένα κράματα χαλκού εμπεριέχουν μπρούτζο και ορείχαλκο. Ο μπρούτζος συναντάται σπάνια με τη μορφή λεπτού κομματιού και γι αυτό ακριβώς το λόγο δεν κόβεται γενικά με laser. Ο ορείχαλκος, από την άλλη μεριά, μπορεί να βρεθεί με τη μορφή λεπτού κομματιού. Η παρουσία του ψευδαργύρου κάνει τον ορείχαλκο περισσότερο κατάλληλο για κοπή με laser (εξαιρείται ο καθαρός χαλκός) αναφέρονται τρεις λόγους:

- I. Ο ψευδάργυρος μειώνει την θερμική αγωγιμότητα,
- II. Ο ψευδάργυρος μειώνει την αντανάκλαστικότητα και
- III. Τα οξείδια του ψευδαργύρου (ZnO) αυξάνουν την ενέργεια κοπής με οξυγόνο.

Τα κοινά laser κοπής κραμάτων χαλκού έχουν ως αποτέλεσμα η σκουριά να προσκολλάται στο πίσω μέρος της κοπής, με τη δημιουργία σκληρών ακμών κοπής (ακόμα και με τη χρησιμοποίηση ενός βοηθητικού αερίου). Τα laser Nd:YAG υψηλής ισχύος είναι γενικά περισσότερο κατάλληλα για την κοπή χαλκού και κραμάτων χαλκού.

### **Τιτάνιο (CO<sub>2</sub>=Καλό, Nd:YAG=Καλό)**

Το καθαρό τιτάνιο ανταποκρίνεται καλά στη συγκεκριμένη θερμική ενέργεια μιας εστιασμένης ακτίνας laser. Η χρησιμοποίηση του οξυγόνου ως βοηθητικού αερίου αποφεύγεται, επειδή υπάρχει μεγάλη πιθανότητα επικίνδυνης καύσης (η αντίδραση ανάμεσα στο τιτάνιο και στο οξυγόνο για τον σχηματισμό TiO<sub>2</sub> είναι τελείως εξωθερμική). Η χρήση του αργού και του αζώτου είναι τα πιο επικρατέστερα στοιχεία. Το άζωτο αντιδρά με το τιτάνιο για να σχηματίσει ψαθυρά κομμάτια πάνω στις ακμές κοπής. Το ήλιο ή το αργόν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποτρέψει αυτή την κατάσταση. Το ήλιο χρησιμοποιείται στην αεροδιαστημική βιομηχανία για να κόβει υλικά με πάχος μικρότερο από 6mm (0,24"), αλλά γενικά αποφεύγεται η χρήση του.

Η επεξεργασία της θερμότητα μπορεί να συμβάλλει για να ελαχιστοποιήσει οποιοδήποτε πρόβλημα σχετικά με την θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Παρόλο που το αέριο κοπής εμποδίζει το τιτάνιο από την οξειδωση με το βοηθητικό αέριο, οι θερμαινόμενες ακμές μπορούν ακόμα να οξειδωθούν, όταν εκτίθενται στον αέρα του περιβάλλοντος. Τα βοηθητικά αέρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ψύχουν τις θερμαινόμενες ακμές και να τις προστατεύουν από τυχόν μόλυνση οξυγόνου και αζώτου. Τα βοηθητικά αέρια έχουν επίσης τη δυνατότητα να σπρώχνουν τη σκουριά προς την άχρηστη πλευρά της κοπής.

### **3.10.3 Μη μέταλλα**

Γενικά, τα μη μεταλλικά υλικά απορροφάνε πολύ καλά την υπέρυθη ενέργεια, που παράγεται από τα CO<sub>2</sub> laser, αλλά δεν συμβαίνει και το ίδιο με την παραγόμενη ενέργεια από τα Nd:YAG laser. Το συμπέρασμα λοιπόν που βγαίνει είναι ότι τα αμέταλλα είναι κακοί αγωγοί της θερμότητας και έχουν σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες εξαέρωσης. Έτσι λοιπόν, η αυξημένη ενέργεια μιας εστιασμένης ακτίνας απορροφάται σχεδόν ολοκληρωτικά από αυτά τα υλικά σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Αυτή η απορρόφηση καταλήγει ουσιαστικά σε έναν από τους τρεις επόμενους μηχανισμούς κοπής για τα αμέταλλα που είναι οι εξής:

- I. Κοπή λιωμένου υλικού,
- II. Εξαέρωση και
- III. Χημική κατάλυση.

Ο επικρατέστερος μηχανισμός κοπής, σ' ένα μεγάλο ποσοστό καθορίζει την πιθανή ποιότητα των ακμών κοπής σ' ένα δεδομένο υλικό. Η κοπή λιωμένου υλικού περιγράφει την διαδικασία κοπής όπου του λιωμένο υλικό ελευθερώνεται διαρκώς από την εγκοπή με τη βοήθεια των βοηθητικών αερίων (τυπικά πρόκειται για αέρα). Αυτή η διαδικασία καταλήγει σε μια πολύ καλή ποιότητα ακμών κοπής με ορισμένες μικροσκοπικές πτυχώσεις που οφείλονται στα ρευστά, δυναμικά της πορείας του λιωσίματος ενός υλικού. Η εξαέρωση αποβλέπει στην παραγωγή πολύ υψηλών ποιοτικών ακμών κοπής (ανώτερες από τις αναφλεγόμενες εκλεπτυσμένες άκρες). Το ακρυλικό και το πολυακετυλένιο είναι τα κυριότερα υλικά που χρησιμοποιούνται συχνά κομμένα με εξαέρωση.

Στην χημική κατάλυση, η ενέργεια από την ακτινοβολία ξεπερνά τα χημικά όρια, καταλήγοντας στον πιο αργό και υψηλής θερμοκρασίας μηχανισμό κοπής που αναφέρθηκε παραπάνω. Οι ακμές κοπής που προκύπτουν είναι επίπεδες και απαλές, αλλά γενικά καλύπτονται με ένα εκλεπτυσμένο ανθρακικό κατάλοιπο.

#### 3.10.4 Οργανικά υλικά

##### Πλαστικά πολυμερή (CO<sub>2</sub>=Καλό-Ιδανικό, Nd:YAG=Ανεπαρκές)

Τα πιο πολλά καθαρά πλαστικά δεν κόβονται με Nd:YAG laser εξαιτίας της υψηλής τους διαπεραστικότητας στο μήκος κύματος του Nd:YAG. Τα CO<sub>2</sub> laser όμως, χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά σε πολλούς πλαστικούς μηχανικούς χειρισμούς επειδή έχουν την ικανότητα να κόβουν περίπλοκα σχήματα σε υψηλούς ρυθμούς χωρίς να έρχονται σε επαφή. Δεδομένου ότι το laser είναι μια δυναμική θερμική πηγή, χρησιμοποιεί την ενέργεια του για να λιώνει ή να εξαερώνει τους δεσμούς και αμέσως μετά από αυτό σπάζει τις αλυσίδες του πολυμερούς υλικού. Η προσφορά που μπορεί να έχει ένα laser εξαρτάται από τις δυνατότητες της θερμαινόμενης επιδραστικής ζώνης κοπής του.

Τα θερμοπλαστικά υλικά με σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες λιωσίματος χαρακτηριστικά παρουσιάζουν καθαρά κομμάτια με γυαλισμένες ακμές ως αποτέλεσμα του επαναστεροποιητικού λιωσίματος. Οι γυαλισμένες άκρες εμφανίζονται

συνήθως σε άμορφα θερμοπλαστικά πολυμερή που προορίζονται για κοπή με εξαέρωση (π.χ. ακρυλικό) απ'ότι σε κρυσταλλικά θερμοπλαστικά πολυμερή (πολυπροπυλένιο, πολυαιθυλένιο, πολυστυρόλιο), τα οποία κόβονται με τη διαδικασία κοπής λιωμένου υλικού. Ο έλεγχος της διαδικασίας κοπής μπορεί να μειώσει ή να εξαφανίσει το φούσκωμα και την παρουσία μικρών γρεζιών στο πίσω μέρος του παραγόμενου κομματιού. Όμως, ο σχηματισμός είναι μια λειτουργία της επιφανειακής έντασης του λιωμένου υγρού και της συμπύκνωσης του επαναστερεοποιημένου υλικού και γι αυτό ακριβώς το λόγο ορισμένες φορές είναι αναπόφευκτος. Οι γυαλισμένες ακμές, τυπικά παράγωγα της ακρυλικής κοπής, έχουν την τάση να σπάνε. Αυτό οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, αλλά κυρίως στις εντάσεις των καταλοίπων που συνδέονται με την επαναστεροποίηση. Η υψηλή πίεση κοπής μειώνει την τάση για το σπάσιμο των ακμών. Η θέρμανση μετάλλων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει την ευαισθησία σπασίματος.

Τα θερμοσταθερά πλαστικά αναφέρονται συχνά ως σύνθετες δομές και περιλαμβάνουν είτε πολυσύνθετα και πολυτμηματικά ελάσματα ή και ινώδη παρεμβύσματα (πχ. φαινολική ή εποξική ρητίνη και ελαστικά προϊόντα). Τα θερμοσταθερά πλαστικά είναι ανθεκτικά στη θερμοκρασία και γενικά αποσυνθέτονται (χημικά καταλύονται) παρά λιώνουν καταλήγοντας σε ανθρακικά κατάλοιπα πάνω στις ακμές κοπής (π.χ. κάρβουνο). Τα ανθρακικά κατάλοιπα μπορούν να απομακρυνθούν εάν θεωρηθεί αναγκαίο.

Τα προϊόντα αποσύνθεσης των πολυμερών που έχουν κοπεί με laser είναι επικίνδυνα [π.χ. το PVC εκπέμπει υψηλό ποσοστό τοξικού και διαβρωτικού υδροχλωρίου (HCl) το οποίο συνδυάζεται τέλεια με την υγρασία και μετατρέπεται σε υδροχλωρικό οξύ]. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην απομάκρυνση και διύλιση των επικίνδυνων διαβρωτικών ή εκρηκτικών αναθυμιάσεων που παράγονται ως αποτέλεσμα της καύσης ή της αποσύνθεσης.

### **Συνθετικά υλικά (CO<sub>2</sub>=Ανεπαρκές-Ιδανικό, Nd:YAG=Ανεπαρκές-Μέτριο)**

Τα καινούρια ενισχυμένα συνθετικά πολυμερή δεν μπορούν να κατεργαστούν εύκολα με τα κοινά εργαλεία κοπής. Αυτό έχει οδηγήσει πολλούς χρήστες να θεωρούν εξειδικευμένες τις ικανότητες κοπής ενός laser. Τα οργανικά συνθετικά υλικά (όπως οι συνθετικές ίνες Kevlar σε έναν εποξικό σχηματισμό) μπορούν να κοπούν μέχρι 6mm (0,25"). Τα ανόργανα συνθετικά υλικά (όπως το συνθετικό γυαλί ή ο γραφίτης) μέσα σ' ένα οργανικό εποξικό περιβάλλον είναι πιο δύσκολο να κοπούν με laser. Οι διαδικασίες ταχύτητας και τα πάχη εξαρτώνται από το συνθετικό υλικό, το οποίο επιφέρει συχνά την αποσύνθεση της εποξικής ρητίνης. Η συγκεκριμένη πορεία κοπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελαχιστοποιήσει την οποιαδήποτε δυσκολία σχηματισμού. Τα ανόργανα συνθετικά υλικά, όπως τα μεταλλικά σχηματισμένα συνθετικά υλικά, μπορούν να κοπούν πολύ εύκολα με CO<sub>2</sub> και Nd:YAG laser.

Δίνοντας προτεραιότητα στην κοπή λεπτών μετάλλων, παρατηρούμε ότι υπάρχουν εκλεπτυσμένες λωρίδες με πάχος μέχρι 0,5mm (0,020") οι οποίες μπορούν να κοπούν ή να σχηματιστούν σε ταχύτητες μέχρι 40m/min (1,600in/min), χωρίς το πρόβλημα της χρησιμοποίησης ενός εργαλείου κοπής. Η παραγόμενη θερμότητα από την διαδικασία κοπής του laser λιώνει τις άκρες, εμποδίζοντας την εμφάνιση τριβής των συνθετικών υλικών. Όσον αφορά υλικά με μεγαλύτερο πάχος και παραγόμενα συνθετικά υλικά, συγκεκριμένα βόριο και ανθρακικές ίνες, υπάρχει πιθανότητα καύσης, αποσύνθεσης και θερμικής καταστροφής στις ακμές κοπής, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την ικανότητα κοπής του laser σε δομικά υλικά. Σχετικά με την κοπή των πολυμερών, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην απομάκρυνση των αναθυμιάσεων.

### **Λάστιχο (CO<sub>2</sub>=Καλό, Nd:YAG=Ανεπαρκές)**

Η φυσική γόμμα και τα συνθετικά ελαστικά υλικά με πάχος μέχρι 20mm (0,79") αποσυντίθενται ή εξαερώνονται από την θερμότητα μιας εστιασμένης ακτίνας laser. Αυτό επιτρέπει τον σχηματισμό διαφόρων ειδικών αντικειμένων όπως είναι οι φλάντζες. Τα υλικά-με-συνθετική ή ατσάλινη ενίσχυση μπορούν να κοπούν με ένα laser με σχετικά μειωμένες ταχύτητες εξαιτίας της αυξημένης αναγκαίας ενέργειας που χρειάζεται το laser για να κόψει τα ατσάλινα μέρη ενός υλικού. Όμως, δεδομένου και ότι παρατηρούνται μικρές ταχύτητες, υπάρχει μια μεγάλη πιθανότητα να μην τελειώσει αποτελεσματικά η διαδικασία κοπής εξαιτίας των θερμικών επιδράσεων. Το πλεονέκτημα του laser κοπής είναι η απλότητα χειρισμού χωρίς να χρειάζεται να υπάρχει κάποια ανησυχία σχετικά με την επιμήκυνση ή την αλλαγή του υλικού εξαιτίας της επαφής ή της τριβής ενός εργαλείου κοπής. Τα καινούργια κομμάτια που παράγονται τείνουν να παρουσιάζουν ελαφρά ικανότητα συγκόλλησης γύρω από της ακμές κοπής και γι αυτό ακριβώς το λόγο απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην όλη διαδικασία χειρισμού.

Επιπρόσθετα, ορισμένα ελαστικά υλικά, συγκεκριμένα εκείνα που περιέχουν άνθρακα, απαιτούν μια διαδικασία καθαρισμού για να ξεπλύνουν κάθε ακμή κοπής που έχει υποστεί καύση. Δεδομένου ότι ο άνθρακας δεν λιώνει (αλλά αποσυντίθεται σε υψηλή θερμοκρασία) και επειδή ο άνθρακας αυξάνει την θερμική αγωγιμότητα του λάστιχου, οι ταχύτητες κοπής μειώνονται και οι ακμές κοπής καλύπτονται με ανθρακικά κατάλοιπα. Το λάστιχο σκληραίνει (προστίθεται και θειάφι) όταν το laser κοπής παράγει έναν έντονο, μαυρισμένο καπνό, ο οποίος έχει μια πολύ δυσάρεστη οσμή.



## **Ξύλο (CO<sub>2</sub>=Ιδανικό, Nd:YAG=Ανεπαρκές)**

Το laser προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα για την κοπή κυτταρικών ιστών βασικών υλικών (π.χ. ξύλο, κόντρα πλακέ και σανιδοκατασκευές). Συγκεκριμένα παρέχει μικρές εγκοπές των 0,3-1,0mm (0,01-0,04"), δεν δημιουργεί σκόνη, μπορεί να κόβει προς όλες τις κατευθύνσεις, είναι ανθεκτικό και προκαλεί ελάχιστο θόρυβο. Καθώς η χρήση ενός laser απομακρύνει τις σκληρές, φαγωμένες και παλιωμένες ακμές που συνδέονται με τις γνωστές τεχνικές διαχωρισμού, τα κομμάτια που προκύπτουν από την χρησιμοποίηση του laser πάνω στο ξύλο χαρακτηρίζονται ως «καμένες» άκρες (π.χ. ανθρακικά κατάλοιπα) οι οποίες είναι παράλληλες, επίπεδες, ομαλές και δεν σπάνε. Το ανθρακικό κατάλοιπο είναι συνάρτηση του πάχους και της πυκνότητας των κυτταρικών ιστών, τα οποία με τη σειρά τους μειώνουν την ταχύτητα κοπής, καθώς αυτά αυξάνονται.

Η αυξανόμενη πίεση βοηθητικού αερίου μειώνει την ποσότητα του άνθρακα που συγκεντρώνεται στις ακμές κοπής. Η ταχύτητα κοπής για ένα δεδομένο πάχος, είναι συνάρτηση της σύνθεσης. Το ξύλο αποτελείται κυρίως από κυτταρικούς ιστούς, νερό, λιγνίτη και εγκλωβισμένο αέρα. Εάν η πυκνότητα των κυτταρικών ιστών του λιγνίτη (π.χ. ενός συγκεκριμένου τύπου ξύλου ή κάτι διαφορετικού) ή του νερού αυξάνεται (π.χ. όταν υπάρχει υγρασία στο περιβάλλον), τότε οι ταχύτητες κοπής μειώνονται.

Καθώς τα laser χρησιμοποιούνται ως συσκευές κοπής σε ξύλινα καλούπια, σε πολλά ατσάλινα καλούπια χάραξης, καθώς και σε ορισμένες περιμετρικές εφαρμογές κοπής (όπως είναι πολύπλοκα και διακοσμητικά υλικά), δεν είναι κατάλληλα και για άλλες βιομηχανικές εφαρμογές εξαιτίας των περιορισμών τους και του σχετικά υψηλού αρχικού κόστους. Δεδομένου ότι η ενέργεια που παρέχεται από τα laser είναι λίγων KW, η ικανότητα των laser να κόβουν φτάνει μέχρι 75mm (3") χονδρικά για ξύλο και 25 mm (1") για σανιδοκατασκευές και κόντρα πλακέ. Χρησιμοποιώντας μερικά από τα πιο υψηλής ενέργειας laser που διατίθενται για αυτά τα πάχη, οι ρυθμοί κοπής μειώνονται στα 2,4 mm/ min και ακόμα περισσότερο.

## **Χαρτί, Δέρμα, Συνθετικά υφάσματα (CO<sub>2</sub>=Ιδανικό, Nd:YAG=Ανεπαρκές, Καλό)**

Τα προϊόντα χαρτιού και δέρματος, καθώς και τα φυσικά και συνθετικά υφάσματα, μπορούν εύκολα να κοπούν με ένα CO<sub>2</sub> laser. Η έλλειψη πάχους μαζί με την αρκετά υψηλή ικανότητα καύσης τους, μειώνει την εξερχόμενη ισχύ από ένα laser σε μερικές εκατοντάδες W. Σε πολλές περιπτώσεις, αρκετά από αυτά τα υλικά μπορούν να κοπούν ταυτόχρονα. Οι άκρες κοπής που προκύπτουν είναι καθαρές και χωρίς να έχουν φθαρεί από τις τριβές. Όμως, ένα μικρό ποσοστό καύσης μπορεί να κάνει την εμφάνιση του προκαλούμενο από την

αποσύνθεση του υδρογονάνθρακα. Κατά τη διαδικασία κοπής χαρτιού ή χαρτονιού δεν υπάρχει ο κίνδυνος να προκληθεί πυρκαγιά επειδή το υλικό εξαερώνεται από το laser, απομακρύνεται από την εγκοπή και διατηρείται κρύο με το βοηθητικό αέριο (το οποίο είναι συνήθως αέρας).

### **3.10.5 Ανόργανα υλικά**

#### **Χαλαζίας (CO<sub>2</sub>=Καλό-Ιδανικό, Nd:YAG=Αδύνατο)**

Δεδομένου ότι ο χαλαζίας έχει ένα σχετικά χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, ανταποκρίνεται θετικά στην διαδικασία κοπής που γίνεται με ένα CO<sub>2</sub> laser. Παρ' όλο που υπάρχει παρουσία ελάχιστης θερμικής επηρεαζόμενης ζώνης συνδεόμενης μ' ένα παραγόμενο κομμάτι, οι ακμές κοπής που προκύπτουν, σπάνια είναι σπασμένες και έχουν μια ομαλή εμφάνιση από την εφαρμογή χειρισμών καθαρισμού, όπως ακριβώς απαιτούν οι διαδικασίες κοπής με laser. Τα πάχη μέχρι 10mm (0,37") μπορούν να κοπούν με ταχύτητες εξαιρετικά αυξημένες και μάλιστα καλύτερες από αυτές που υπάρχουν στην απλή διαδικασία κοπής και χωρίς να χρησιμοποιείται επιπρόσθετη δύναμη για το νέο παραγόμενο κομμάτι. Μερικές φορές η σκλήρυνση αυτού του υλικού είναι αναγκαία (εάν προκληθεί κάποιο σπάσιμο το οποίο δεν αντιμετωπίζεται εύκολα) για να αποφεύγεται η πιθανότητα ρηγμάτωσης μετά την κοπή. Γενικά, η ρηγμάτωση είναι μια συνάρτηση της παρεχόμενης θερμότητας και γι αυτό ακριβώς το λόγο συνδέεται και εξαρτάται άμεσα από το πάχος του κάθε υλικού.

#### **Γυαλί (CO<sub>2</sub>=Δύσκολο, Nd:YAG=Αδύνατο)**

Αντίθετα με τον χαλαζία, οι περισσότεροι τύποι γυαλιού είναι επιρρεπείς στην επίδραση της θερμότητας και στις ρηγματώσεις κατά την στερεοποίηση και γι αυτό ακριβώς το λόγο το γυαλί δεν θεωρείται γενικά κατάλληλο για κοπή με laser. Όπως ο χαλαζίας, έτσι και το γυαλί έχει διαπεραστικότητα αποκλειστικά και μόνο στο 1,06 εκατομμυριοστό του μέτρου μήκος κύματος του Nd:YAG laser, αλλά απορροφά πολύ καλά το 10,6 εκατομμυριοστό του μέτρου μήκος κύματος από το CO<sub>2</sub> laser. Η διαδικασία κοπής με διαπεραστικότητα και η τεχνική χαρακτηριστικής πάνω στο γυαλί χρησιμοποιούνται ισομερώς. Σε πολλές περιπτώσεις, τα κομμάτια που προκύπτουν με την τεχνική της διαπεραστικότητας έχουν προκληθεί από πολλαπλές πραγματοποιήσιμες εν μέρει διαδικασίες για να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις της θερμότητας. Το γυαλί που είναι ανθεκτικό στη θερμότητα, όπως το πυρέξ, έχει πολύ λίγες πιθανότητες να σπάσει κατά τη διάρκεια της κοπής τους με laser. Όμως, οι πιο πολλοί τύποι γυαλιού (περιλαμβανομένου και του μίγματος νατρίου και υδροξειδίου του ασβεστίου) επηρεάζονται από τις επιπτώσεις της θερμότητας, οι οποίες προκαλούν ρωγμές στις ακμές

κοπής του υλικού. Επίσης, επειδή το λιωμένο γυαλί έχει υψηλό ιξώδες, θα υπάρχει σημαντικό επαναστερεοποιημένο υλικό, το οποίο προσκολλάται στις ακμές κοπής και στη βάση του νέου παραγόμενου κομματιού.

### **Κεραμικά (CO<sub>2</sub>=Μέτριο-Καλό, Nd:YAG=Μέτριο)**

Για τα περισσότερα κεραμικά υλικά η διαδικασία κοπής και χαρακτηριστικής όσον αφορά την ηλεκτρονική βιομηχανία γίνεται με CO<sub>2</sub> laser. Τα πιο γνωστά κεραμικά υλικά είναι η αλουμίνα (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), το ανθρακούχο βολφράμιο (WC), το νιτρίδιο του τιτανίου (TiN) και το ανθρακούχο τιτάνιο (TiC). Τα κεραμικά είναι σκληρά και εύθραυστα και γι' αυτό ακριβώς το λόγο είναι δύσκολο να κοπούν μηχανικά (ειδικά όσον αφορά τα περίπλοκα σχήματα). Η διαδικασία κοπής με διαπεραστικότητα δεν είναι υποχρεωτική σε πολλές περιπτώσεις και μάλιστα ιδιαίτερα όταν έχει σχέση με την παραγωγή ευθυγραμμισμένων κομματιών. Από την άλλη μεριά, στις περιπτώσεις που θεωρείται αναγκαία αποκλειστικά και μόνο η τεχνική της χαρακτηριστικής, οι ταχύτητες μπορεί να είναι αρκετά υψηλές [15m/min (600in/min) ή ακόμα περισσότερο],

Η διαδικασία κοπής με διαπεραστικότητα χρησιμοποιείται γενικά για περίπλοκες ή κυρτές περιοχές υλικών. Σε τέτοιες περιπτώσεις ρυθμίζεται ο κατάλληλος τρόπος κοπής για να επιτύχουμε την μείωση της θερμότητας στην περιοχή που περικλείεται το νέο παραγόμενο κομμάτι. Η τεχνική κοπής όσον αφορά τα περιγράμματα κεραμικών που χρησιμοποιούνται σε διάφορες διακοσμητικές εφαρμογές, γίνεται με CO<sub>2</sub> laser. Η δημιουργία αυξημένης ισχύος είναι αναγκαία, διότι μόνο αυτή μπορεί να λιώνει και να εξαερώνει το υλικό και να ελαχιστοποιεί την οποιαδήποτε ζημιά που μπορεί ενδεχομένως να προκαλείται στην γυαλιστερή επιφάνεια. Η υψηλή θερμοκρασία λιωσίματος των κεραμικών έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μειωμένων ταχυτήτων για την πραγματοποίηση της διαδικασίας κοπής με διαπεραστικότητα συνήθως λιγότερο από 0,5m/min (20in/min). Το Nd:YAG laser χρησιμοποιείται συχνά στα περισσότερα κεραμικά υλικά εκτός κι αν οι πυκνότητες ισχύος είναι εξαιρετικά υψηλές.

### **Πέτρα και βράχος (CO<sub>2</sub>=Ανεπαρκές, Nd:YAG=Ανεπαρκές)**

Ενώ η πέτρα και ο βράχος έχουν την τάση να απορροφούν την θερμική ενέργεια προερχόμενη από ένα laser, ο γρανίτης, ο τσιμεντόλιθος, ο βράχος, η πέτρα και διάφορα άλλα ορυκτά δεν είναι κατάλληλα για την διαδικασία κοπής με laser. Η εκρηκτικότητα που προκαλείται από την θερμαινόμενη εσωτερική κατάσταση αυτών των υλικών μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την πιθανότητα σπασίματος. Εκτός από την έλλειψη ομοιομορφίας στις δομές τους, η πέτρα και ο βράχος έχουν συνήθως πάχος μεγαλύτερο από 25 mm, το οποίο είναι υπερβολικό σε σύγκριση με το περιορισμένο όριο κοπής των laser.

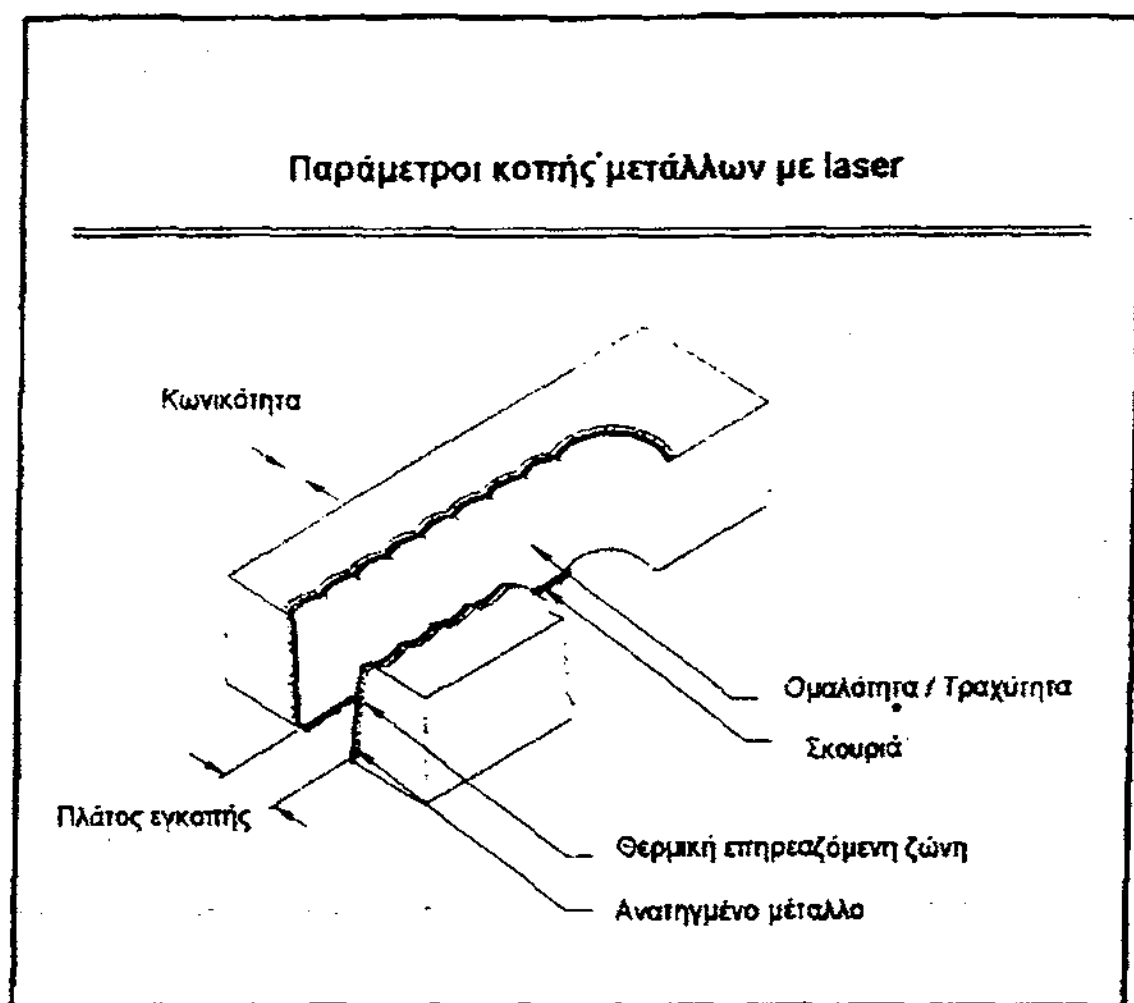
Στον παρακάτω πίνακα 3.VI παρουσιάζονται συνοπτικά οι δυνατότητες κοπής με laser διαφόρων υλικών.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.VI  
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ**

<b>ΥΛΙΚΟ</b>	<b>LASER CO<sub>2</sub></b>	<b>LASER Nd:YAG</b>
<b>ΜΕΤΑΛΛΑ</b>		
Μαλακός χάλυβας	ιδανικό	ιδανικό
Ανοξειδωτος χάλυβας	ιδανικό	ιδανικό
Κραματούχος χάλυβας	ιδανικό	ιδανικό
Χάλυβας εργαλείων	ιδανικό	ιδανικό
Αλουμίνιο και Κράματα αλουμινίου [(πάνω από 6mm(0.24")]	μέτριο	καλό
Χαλκός ή κράματα χαλκού	δύσκολο	Μέτριο
τιτάνιο	καλό	Καλό
Χρυσός και ασήμι	ανεπαρκές	δύσκολο
<b>ΑΜΕΤΑΛΛΑ,ΟΡΓΑΝΙΚΑ</b>		
Πλαστικά (πολυμερή)	Καλό-ιδανικό	Ανεπαρκές
Συνθετικά	Ανεπαρκές-ιδανικό	Ανεπαρκές-μέτριο
Λάστιχο	καλό	Ανεπαρκές
Ξύλο	ιδανικό	Ανεπαρκές
Χαρτί και χαρτόνι	ιδανικό	Ανεπαρκές-καλό
Δέρμα	ιδανικό	Ανεπαρκές-καλό
Συνθετικές ίνες	ιδανικό	Ανεπαρκές-καλό
<b>ΑΜΕΤΑΛΛΑ,ΑΝΟΡΓΑΝΑ</b>		
Χαλαζίας	Καλό-ιδανικό	Αδύνατη
Γυαλί	Δύσκολο	Αδύνατη
Κεραμικά	Μέτριο-καλό	Μέτριο
Πέτρα και βράχος	ανεπαρκές	ανεπαρκές

### 3.11 Ποιότητα κοπής για μέταλλα

Είναι συχνή απορία για το τι ακμές θα δημιουργηθούν μετά την κοπή. Η εκτίμηση συνήθως συνεπάγεται έναν υπολογισμό τόσο της τραχύτητας όσο και της οπτικής εμφάνισης των ακμών. Κάθε κομμάτι που έχει προέλθει από κοπή με συμβατικό εξοπλισμό παρέχει έναν σταθερό βαθμό ποιότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναφορά για συγκρίσεις με αποτελέσματα άλλων μεθόδων. Ετσι, η κοπή με laser μπορεί να ειπωθεί ότι δίνει ακμές ανάμεσα σ' αυτές των πριονισμένων ακμών και αυτών που προκύπτουν από την κοπή με EDM. Όταν αναφερόμαστε σε κοπή μετάλλων, η κοπή τους με laser έχει τα χαρακτηριστικά που ακολουθούν (σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13: Παράμετροι κοπής μετάλλων με laser.

### 3.11.1 Εγκοπή

Στα λεπτότερα υλικά, το πλάτος της εγκοπής μπορεί να είναι και 0.1mm (0,004"). Όσο το πάχος του υλικού αυξάνει, τόσο πιο πολύ υλικό αφαιρείται στη ζώνη κοπής. Έτσι τελικά, μπορούμε να πούμε ότι το πλάτος της εγκοπής είναι περίπου ευθέως ανάλογο του πάχους του υλικού. Μια εγκοπή πλάτους 0,15mm (0,006") είναι χαρακτηριστική για ατσάλι πάχους 3mm (0,12") ενώ ένα πλάτος εγκοπής 0,38mm (0,015") είναι αναμενόμενο για ατσάλι πάχους 19mm (0,75"). Το πλάτος της εγκοπής αυξάνεται σκόπιμα (μέσω λανθασμένης εστίασης ή μεγαλύτερης εστιακής απόστασης) για παχύτερα υλικά ώστε να επιτυγχάνει την εκροή του λιωμένου υλικού. Αυτό χρησιμοποιείται ειδικά για κοπή με O<sub>2</sub> ανθρακούχων χαλύβων, όπου η υψηλή πίεση και η ταχύτητα ροής που συνυπάρχουν επιφέρουν και υπερβολική θερμότητα. Γενικά το πλάτος των εγκοπών για κοπή μετάλλων με laser Nd:YAG μέσω ενός συστήματος παροχής με οπτική ίνα θα είναι μεγαλύτερο από το πλάτος που παράγει είναι laser τύπου CO<sub>2</sub>. Το πλάτος της εγκοπής θα πρέπει να ρυθμίζεται όταν σχεδιάζουμε και υπολογίζουμε ένα πρότυπο κοπής. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το πλάτος εγκοπής παρουσιάζονται στον πίνακα 3.VII που ακολουθεί.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.VII**  
**ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΠΛΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΓΚΟΠΗΣ**  
**(ΓΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΟ ΠΛΑΤΟΣ ΥΛΙΚΟΥ)**

<b>ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ</b>	<b>ΣΧΟΛΙΑ/ΒΑΣΙΚΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ</b>
Μέγεθος του σημείου	Να είναι ελάχιστο σε σχέση με την εκροή του λιωμένου υλικού και του βάθους της εστίασης
Ικανότητα εστίασης	Θυμηθείτε: $D=(f/f_c)\Phi_c$ για οπτική ίνα $d=M^2 (4lf/\pi D)$
Ποιότητα ακτίνας( $M^2$ )	Μικρές τιμές του $M^2$ είναι καλύτερες
Μήκος κύματος( $\lambda$ )	Αναλόγως του υλικού που θα κόψουμε και της Οπτικής ίνας
Εστιακή απόσταση (f)	Ελάχιστο: ισορροπία μεταξύ μεγέθους του σημείου και βάθους εστίασης
Διάμετρος πρωτογενούς ακτίνας (D)	Μεγάλη: ελαχιστοποιεί το μέγεθος του σημείου και την ποιότητα ισχύος στην οπτική ίνα
Διάμετρος οπτικής ίνας( $\Phi_c$ )	Ελάχιστη αναλόγως του τρόπου λειτουργίας
Θέση εστίασης	Απαιτείται τελειότητα
Ευθυγράμμιση ακτίνας	Θα πρέπει να είναι παράλληλη (και χαρακτηριστικά ομοαξονική )στον οπτικό άξονα και τους μηχανικούς άξονες και κάθετη στο τεμάχιο που επεξεργαζόμαστε
Θερμική εστίαση	Επηρεάζει την διάμετρο της πρωτογενούς ακτίνας
Πόλωση	Κυκλική για να αποφεύγεται απόκλιση του πλάτους της εγκοπής με την κατεύθυνση
Ταχύτητα μετακίνησης	Σταθερή και επαναλαμβανόμενη
Ισχύς	Η τελειότερη δυνατή σε σχέση με την δημιουργία λιωμένου υλικού
Πίεση/ροή αερίου	Η τελειότερη δυνατή σε σχέση με την εκροή λιωμένου υλικού
Γεωμετρία του ακροφυσίου	Η τελειότερη δυνατή σε σχέση με την εκροή λιωμένου υλικού

### 3.11.2 Κωνικότητα

Το αποτέλεσμα μιας εστιασμένης ακτίνας που χρησιμοποιείται για κοπή ενός υλικού, ελαχιστοποιεί την κωνικότητα της κοπής σε λιγότερο από 2 βαθμούς (συμπεριλαμβανομένης της στρογγύλευσης στην κορυφή της ακμής) η οποία εξαρτάται από τον τύπο του υλικού και την εστιακή απόσταση. Αυτό ισούται με τραχύτητα 0,2mm (0,008") για πάχος υλικού ίσου με 1/4". Γενικά μεγαλύτερη εστιακή απόσταση επιφέρει ακμές περισσότερο παράλληλες από μικρότερη εστιακή απόσταση.

### 3.11.3 Τραχύτητα και ομαλότητα

Μετρούμενη ως μέσος όρος της διαφοράς μεταξύ του υψηλότερου και του χαμηλότερου σημείου κατά μήκος μιας ακμής, η τάξη μεγέθους για κοπή με laser κυμαίνεται μεταξύ 0,8 έως 6,3μm (30 έως 250μm), με τους ανθρακούχους χάλυβες να έχουν καλύτερη ποιότητα απ' ό τι ίδιου πάχους ανοξειδωτοι χάλυβες σειράς 300 ή αλουμίνιο. Η κοπή ανοξειδωτου χάλυβα με βοηθητικό αέριο άζωτο παρέχει την μισή τραχύτητα απ' ό τι η κοπή με οξυγόνο. Ο έλεγχος των παραμέτρων της διαδικασίας όπως η ταχύτητα, ο τύπος και η πίεση του βοηθητικού αερίου, η συχνότητα των παλμών και η θέση εστίασης βοηθούν στο να βελτιστοποιηθεί η επιθυμητή ποιότητα. Για ένα δεδομένο υλικό, η ομαλότητα είναι χαρακτηριστική συνάρτηση του υλικού πάχους, βάθους, σύνθεσης και ποιότητας του υλικού (π.χ. κατηγορία του χάλυβα) και ποιότητα της επιφάνειας.

### 3.11.4 Σκουριά και επανάτηξη

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η κοπή με laser επιτυγχάνει την πλήρη απομάκρυνση του υλικού από την εγκοπή. Σε μερικά υλικά ωστόσο, μια εναπόθεση σκουριάς μπορεί να εμφανιστεί κατά μήκος της πίσω όψης της κοπής. Ο σχηματισμός αυτής της σκουριάς είναι βασικά μια συνάρτηση του ιζώδους και της αντίστασης στην οξειδωση του λιωμένου υλικού, το οποίο δεν είναι δυνατόν να απομακρυνθεί από το βοηθητικό αέριο. Επιπρόσθετα, από την στιγμή που γενικά η κοπή με laser είναι εκτεθειμένη στον αέρα, ένα λεπτό [συνήθως μικρότερο από 0,1mm (0,004")] στρώμα οξειδωσης μπορεί να εμφανιστεί κατά μήκος των ακμών του υλικού το οποίο αντιδρά με το οξυγόνο.

Η επανάτηξη στους μαλακούς χάλυβες είναι γενικά μικρότερη από 0,13mm (0,005") λόγω του ότι το ιζώδες του λιωμένου μετάλλου είναι μικρό, δίνοντας την ευκαιρία για καλή



εκροή του υλικού. Στα μη σιδηρούχα υλικά το ιζώδες είναι γενικά υψηλότερο, επιδρώντας έτσι στην φτωχότερη απόρριψη του λιωμένου υλικού. Αυτό συνδυάζεται με παχύτερες ζώνες επανάτηξης ειδικά όταν χρησιμοποιείται οξυγόνο ως βοηθητικό αέριο. Εάν χρησιμοποιηθεί άζωτο ή αργό, η επανάτηξη μπορεί να είναι μικρότερη από 0,13mm.

### 3.11.5 Θερμικός επηρεασμός

Τα υλικά τα οποία καίγονται, όπως το ξύλο και το χαρτί, η θερμική ενέργεια του laser μπορεί να απανθρακώσει τις ακμές κοπής.

Η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη στα μέταλλα γενικά περιέχεται ανάμεσα στα 0,13mm (0,005") της ακμής. Σαν γενικό κανόνα μπορούμε να πούμε ότι, όσο λεπτότερο είναι το υλικό ή όσο ταχύτερη η κοπή, τόσο λιγότερο και το ποσό της θερμικής επίδρασης. Η χρήση ενός μέσου ψύξης κατά τη διάρκεια της κοπής μπορεί να μειώσει την θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (Θ.Ε.Ζ.).

### 3.11.6 Επιφανειακή κατάσταση του υλικού Επιφανειακή επεξεργασία

Για υλικά υψηλής ανάκλασης (όπως: αλουμίνιο, χαλκός και χρυσός) με μια τέλεια επιφανειακή επεξεργασία η αρχική επίδραση της ενέργειας του laser μειώνεται. Σ' αυτά τα υλικά, εάν η επιφάνεια είναι εξαιρετικά ομαλή μπορεί να εμφανιστεί ασυνεχής ποιότητα κοπής. Για τέτοιες επιφάνειες θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ανακλώμενο φως μπορεί να προκαλέσει ζημιά:

- 1) Μέσα στην κοιλότητα του laser.
- 2) Στην πρωτογενή ακτίνα συστήματος παροχής της ακτίνας με οπτική ίνα.
- 3) Στην κεφαλή κοπής.
- 4) Στις γραμμές νερού και αερίου κοντά στην κεφαλή κοπής.
- 5) Στο προσωπικό.

Ειδικές επικαλύψεις των φακών, αισθητήρες ανάκλασης και συστήματα παροχής της ακτίνας χρησιμοποιούνται για να μειώσουμε το ενδεχόμενο ζημιάς μέσα στην κοιλότητα του συστήματος παροχής της ακτίνας. Μια επιφάνεια ελαφρώς ματ βοηθάει στη μείωση της ανακλαστικότητας. Μερικές φορές χρησιμοποιούνται ειδικές επικαλύψεις ώστε να αυξηθεί η απορροφητικότητα της επιφάνειας [π.χ. στοιχεία κεραμικής σκόνης ( $Al_2O_3$ ) αιωρούμενα σ' ένα υγρό, το οποίο μπορεί να πλυθεί μετά την κοπή].

## Χημικές και χρωματικές επικαλύψεις

Γενικά, το χρώμα αυξάνει την απορρόφηση του laser από το υλικό (ειδικά για υλικά με υψηλή ανακλαστικότητα όπως το αλουμίνιο), αλλά συχνά αφήνει άσχημα υπολείμματα στην τελειωμένη περιοχή κοπής. Επιπρόσθετα, το χρώμα κοντά στην ζώνη κοπής μπορεί να υποστεί φθορά. Η χρήση ενός μέσου ψύξης μπορεί να μειώσει αυτή τη συνέπεια. Μερικά χρώματα που αντέχουν στη θερμότητα (π.χ. χρώματα βασισμένα σε κεραμικά) εμποδίζουν την κοπή. Μερικά χρώματα αναφλέγονται όταν χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο ως βοηθητικό αέριο και γι' αυτό το λόγο σ' αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται αέρας.

Το αλουμίνιο είναι συχνά ανοδιωμένο (μαύρο ή λευκό - ασημί είναι τα πιο κοινά) για λόγους αντοχής, σκληρότητας, αντίστασης στη διάβρωση ή αισθητικούς. Το αναδιδόμενο αλουμίνιο μπορεί να διαπεραστεί και να κοπεί πιο εύκολα και γρήγορα από το γυμνό αλουμίνιο επειδή η αναδιδόμενη επιφάνεια απορροφά την ενέργεια του laser καλύτερα από το γυμνό αλουμίνιο. Αν και η ανοδιωμένη επιφάνεια απορροφά σχεδόν όλη την ισχύ ενός laser CO<sub>2</sub> (συγκρινόμενη με την μόλις 2% μιας γυμνής επιφάνειας), η ταχύτητα για την κοπή κυμαίνεται μόνο κατά 30% σε σχέση με τη γυμνή επιφάνεια γιατί η ανακλαστικότητα του ρευστού υλικού δεν αλλάζει με την ανοδίωση. Επιπρόσθετα, η αύξηση της επιφανειακής απορροφητικότητας του ανοδιωμένου αλουμινίου έχει ως αποτέλεσμα μια διαδικασία λιγότερο ευαίσθητη στην απόκλιση των παραμέτρων της διαδικασίας. Ωστόσο, η ανοδίωση είναι αρκετά ακριβή (και γι' αυτό το λόγο δεν χρησιμοποιείται για να βελτιωθεί μόνο η ευκολία κοπής) και το ανοδιωμένο αλουμίνιο δεν μπορεί εύκολα να μορφοποιηθεί ή να συγκολληθεί (έτσι σε πολλές περιπτώσεις η ανοδίωση γίνεται αφού το τεμάχιο ή το εξάρτημα έχει ολοκληρώσει τις όποιες διαδικασίες).

Η επικάλυψη ψευδαργύρου του μαλακού χάλυβα γίνεται για ανοχή στη διάβρωση. Ο ψευδάργυρος απλώνεται στην επιφάνεια μέσω της διαδικασίας της γαλβανοποίησης ή μέσω εμβάπτισμού σ' αυτή. Ενώ ο γαλβανισμένος χάλυβας έχει ένα σταθερό στρώμα ψευδαργύρου ελάχιστου πάχους, ο εμβάπτισμένος έχει συχνά ένα σημαντικό πάχος το οποίο απλοποιεί την επιφάνεια του χάλυβα με ασυνέχειες. Η επικάλυψη με θερμή εμβάπτιση που είναι μεγαλύτερη μερικών μικρών μπορεί να προκαλέσει μείωση της ποιότητας κοπής. Ακόμα πρέπει να σημειωθεί ότι οι αναθυμιάσεις του ψευδαργύρου είναι βλαβερές. Η επιμετάλλευση του χάλυβα με κάδμιο έχει ως αποτέλεσμα της καλής κοπής, αλλά όπως και ο ψευδάργυρος, οι αναθυμιάσεις του είναι βλαβερές.

## **Προστατευτικές στρώσεις**

Τα ελάσματα ανοξειδωτου χάλυβα, αλουμινίου και ακρυλικών που χρησιμοποιούνται για διακοσμητικούς σκοπούς, έχουν συχνά στρώσεις από πλαστικό ή χαρτί για να προστατεύουν τις υψηλά φινιρισμένες επιφάνειες τους. Η παρουσία του προστατευτικού στρώματος έχει μικρή επίδραση στη διαδικασία ή στην ποιότητα κοπής. Ωστόσο, το βοηθητικό αέριο μπορεί να σηκώσει το προστατευτικό στρώμα από την επιφάνεια και να μπερδευτεί με το ακροφύσιο κοπής ή την κεφαλή κοπής. Με το ακρυλικό, ο καυτός ατμός από την διαδικασία κοπής μπορεί να εισέλθει μεταξύ του προστατευτικού στρώματος και της επιφάνειας και να επιφέρει ζημιά ή παραμόρφωση στο τεμάχιο.

## **Σκουριά και μόλυνση**

Ο ανθρακούχος χάλυβας μπορεί συχνά να έχει σκουριά στην επιφάνεια του, ειδικότερα για τον χάλυβα που έχει προέλθει από την έλαση εν θερμώ και περιέχει οξειδία στην επιφάνεια του ως συνέπεια της διαδικασίας αυτής. Τα επιφανειακά οξειδία συγκρατούν την υγρασία η οποία έχει ως αποτέλεσμα την ασταθή κοπή με την χαμηλή ποιότητα των ακμών (σποραδικά καψίματα και προσκόλληση σκουριάς). Η σκουριά θα πρέπει να απομακρύνεται πριν την κοπή.

Ο καθαρισμένος χάλυβας που έχει προέλθει από την εν θερμώ έλαση, έχει βελτιωμένη ικανότητα κοπής σε σχέση με τον χάλυβα που δεν έχει υποστεί κάποια διεργασία. Ο καθαρισμός δια οξέος είναι μια χημική διαδικασία που απομακρύνει το στρώμα των οξειδίων. Το λάδι χρησιμοποιείται για να αποτρέψει την οξείδωση κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Γενικά, η παρουσία του λαδιού και του γράσου έχουν μικρή επίδραση στην διαδικασία κοπής, ωστόσο, το υπερβολικό λάδι και γράσο θα πρέπει να απομακρύνεται πριν την κοπή.

### **3.11.7 Τοποθέτηση του εξαρτήματος**

Η σχετική θέση του εξαρτήματος σε σχέση με το ακροφύσιο κοπής είναι μια συνάρτηση τριών βασικών συντελεστών:

1. Την κατασκευή και την ανοχή του εξαρτήματος (αυτό μπορεί να περιλαμβάνει και την επιπεδότητα των μεταλλικών ελασμάτων).
2. Την ακρίβεια του περιγράμματος, την επαναληψιμότητα και την σταθερότητα είτε της ακτίνας είτε του χειρισμού των εξαρτημάτων.
3. Την επαναληψιμότητα και την ακρίβεια των αναπόσπαστων τεμαχίων.

Η θέση του σημείου κοπής πρέπει να κρατιέται ανάμεσα σε κάποια ανοχή η οποία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μερικοί από τους οποίους είναι:

1) Η ευαισθησία της διαδικασίας κοπής στο απομακρυνόμενο ύψος του μηχανήματος.

2) Η διάμετρο του ακροφυσίου.

3) Η πίεση και ο τύπος του βοηθητικού αερίου.

4) Το βάθος εστίασης της εστιασμένης ακτίνας.

5) Η ισχύ και ταχύτητα κοπής.

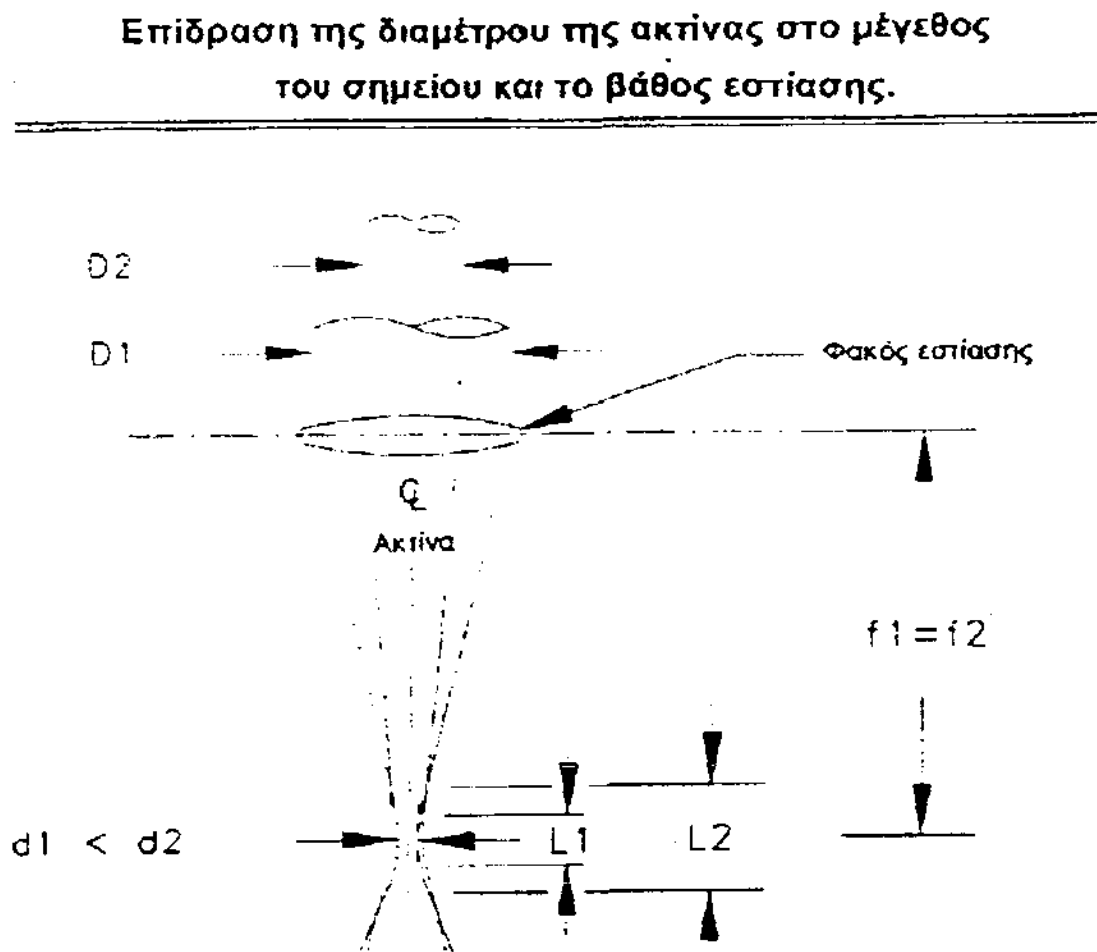
Στα σχήματα 3.14, 3.15, 3.16 που ακολουθούν φαίνονται τα παραπάνω στοιχεία.

Εάν η θέση του εξαρτήματος δεν είναι σωστά διατηρημένη το αποτέλεσμα θα είναι :

1) Σημαντικές αυλακώσεις ή κοιλώματα (η υψηλή πίεση κοπής έχει ως αποτέλεσμα την βίαιη εκροή από την μικρή απομάκρυνση).

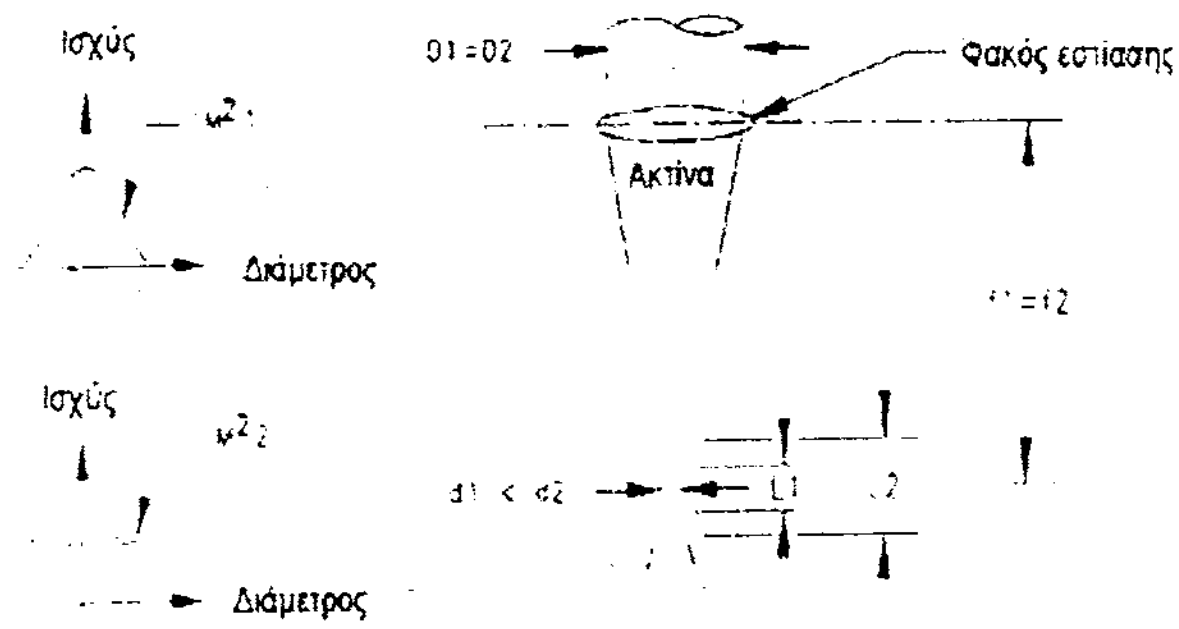
2) Σκουριά και απώλεια κοπής (απώλεια της πίεσης κοπής και απώλεια της εκροής από την μεγάλη απομάκρυνση).

Σχήμα 3.14: Επίδραση της διαμέτρου της ακτίνας στο μέγεθος του σημείου και το βάθος εστίασης.

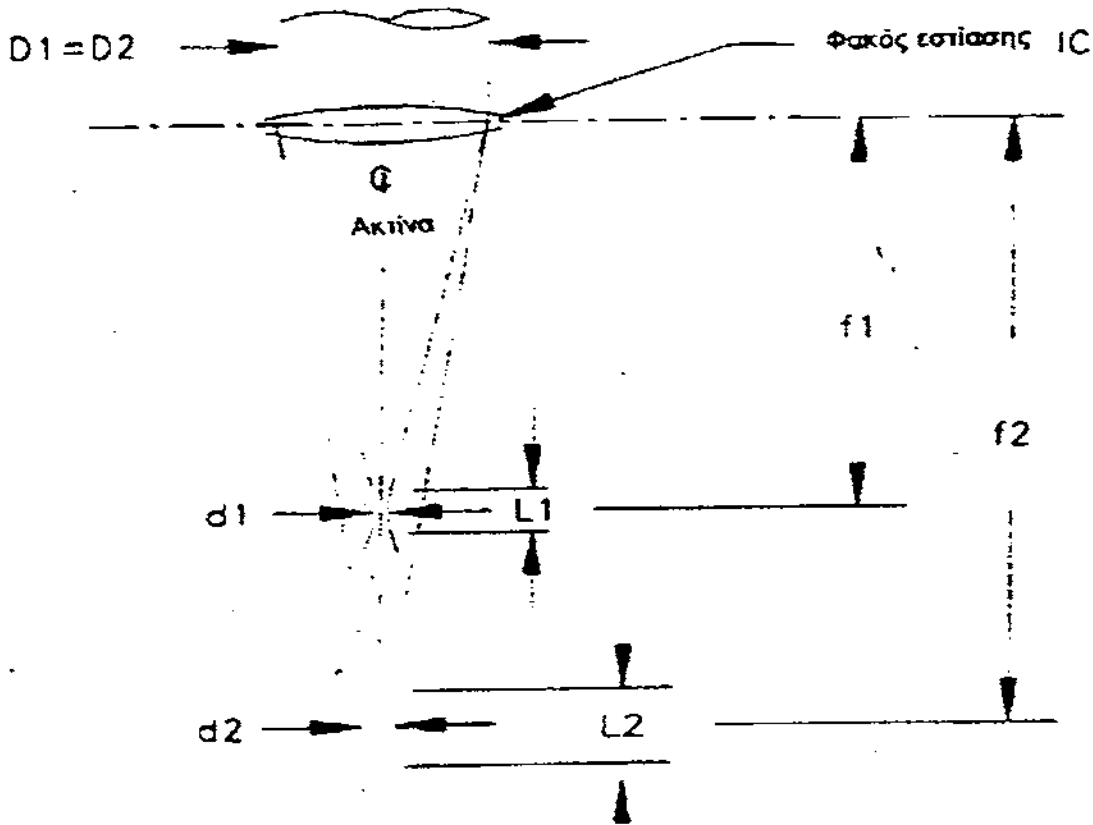


Σχήμα 3.15: Επίδραση του τύπου laser στο μέγεθος του σημείου και το βάθος εστίασης

## Επίδραση του τύπου laser στο μέγεθος του σημείου και το βάθος εστίασης.



## Επίδραση του μήκους εστίασης στο μέγεθος του σημείου και το βάθος εστίασης.



Σχήμα 3.16: Επίδραση του μήκους εστίασης στο μέγεθος του σημείου και το βάθος εστίασης.

### 3.11.8 Ακόλουθο ύψος

Το ακόλουθο ύψος χρησιμοποιείται για να διατηρηθεί μια σταθερή απόσταση απομάκρυνσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Χρησιμοποιούνται είτε μηχανικές είτε ηλεκτρικές χωρητικές μέθοδοι. Ενώ η κοπή ελασμάτων δεν απαιτεί μια κεφαλή ακόλουθου ύψους, τα περισσότερα συστήματα παρέχονται με μέσα για το ακόλουθο ύψος ως στάνταρ εξοπλισμό. Ωστόσο, όλες οι άλλες γεωμετρίες δεν μπορούν να κοπούν σταθερά δίχως την ύπαρξη κεφαλής ακόλουθου ύψους. Τα κριτήρια επιλογής πρέπει να περιλαμβάνουν την απόδοση ανάλογα του τύπου του υλικού, την ταχύτητα κοπής, την πίεση του ακροφυσίου, την γεωμετρία του υλικού και τους κραδασμούς του τεμαχίου. Στον πίνακα 3.VII που ακολουθεί παρουσιάζεται η σύγκριση των μεθόδων.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.VIII  
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ**

<b>ΣΥΓΚΡΙΣΗ</b>	<b>ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ</b>	<b>ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ</b>
<b>ΘΕΤΙΚΑ</b>	Κοπή στις 3 διαστάσεις δίχως επαφή(δίχως χάραξη)	Πιο απλές και λιγότερο ακριβές. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν ψύξη Όλα τα υλικά
<b>ΑΡΝΗΤΙΚΑ</b>	Πιο ακριβή Δίχως ψύξη Υλικά με καλή αγωγιμότητα μόνο	Επίπεδα ελάσματα μόνο Ίσως χρειάζεται χάραξη των υλικών

### 3.11.9 Προετοιμασία εξαρτημάτων

Εξαιτίας του σχετικά μικρού μεγέθους του εστιαζόμενου σημείου και του βάθους της εστίασης της ακτίνας του laser, η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα της επεξεργασίας πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά πριν την εφαρμογή. Αν και η κοπή με laser παράγει λιγότερη θερμότητα σε σύγκριση με τις συμβατικές θερμικές διαδικασίες, μπορεί να επιφέρει θερμική παραμόρφωση των τεμαχίων που κόβουμε η οποία επιδρά στην εφαρμογή της κοπής των εξαρτημάτων απαιτώντας αρκετές επαναλήψεις εάν δεν χρησιμοποιείται σύστημα ακολούθου ύψους. Όταν μελετούμε την σύσφιξη των εξαρτημάτων θα πρέπει να έχουμε υπόψη τους παρακάτω παράγοντες:

- 1) Να αποφεύγονται τα αντισταθμίσιμα ή στιγμές φόρτισης όταν σχεδιάζουμε και επεξεργαζόμαστε εξαρτήματα. Αυτό θα ελαχιστοποιήσει την ανόμοια φόρτιση η οποία μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση του τεμαχίου στο σημείο κοπής.
- 2) Κάμψη του υλικού από τις θερμικές ή τις παραμένουσες τάσεις.
- 3) Τις ασκούμενες δυνάμεις στο υλικό και τα αναπόσπαστα τεμάχια από το βοηθητικό αέριο (ειδικά στην κοπή με υψηλή πίεση).
- 4) Παραμόρφωση του υλικού και των εξαρτημάτων εξαιτίας της αδράνειας του συστήματος κίνησης (μόνο για σταθερά και υβριδικά συστήματα κίνησης).
- 5) Επιτρέπουν την πρόσβαση του ακροφυσίου του βοηθητικού αερίου όταν σχεδιάζεται η γεωμετρία της σύνδεσης.

6) Σχεδιάζεται η ανάσχεση της μεταδιδόμενης ακτίνας και παρέχεται η πρόσβαση και η διατήρηση των συσκευών ανάσχεσης.

7) Ευκολία ανάφλεξης των κατασκευασμένων υλικών.

8) Υλικά με επικάλυψη ή υψηλή θερμική αντίσταση (π.χ. υλικά με υψηλό σημείο τήξης) μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την διαδικασία.

### 3.12 Παράμετροι κοπής

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της κοπής με laser είναι ο έλεγχος σε υψηλό βαθμό των διαφόρων συντελεστών που επηρεάζουν την διαδικασία. Οι βασικές παράμετροι είναι οι εξής:  
**Ισχύς και πυκνότητα ισχύος**

Τα laser προσδιορίζουν την ισχύ εξόδου τους σε Watt. Από τη στιγμή που η κοπή με laser είναι μια θερμική διαδικασία το ποσό της παραγόμενης ενέργειας συνδέεται με τις δυνατότητες του.

Ένα laser 300W με μια υψηλή ποιότητα εξόδου είναι παραπάνω από κατάλληλο για την κοπή προϊόντων χαρτιού, αλλά ελλειπές σε ισχύ και πυκνότητα ισχύος για αποτελεσματική χρήση σε αλουμίνιο. Εάν όλοι οι άλλοι παράγοντες είναι ίσοι (π.χ. διανομή ισχύος, μέγεθος σημείου κ.λ.π.), η αύξηση της ισχύος επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλότερων ταχυτήτων κοπής καθώς και τη δυνατότητα της κοπής παχύτερων τεμαχίων.

Όπως προείπαμε, η πυκνότητα ισχύος συνδυαζόμενη με την ικανότητα του υλικού να συσχετιστεί με το μήκος κύματος του laser, είναι οι παράμετροι κλειδιά του προσδιορισμού της ταχύτητας και του πάχους κοπής.

#### Ταχύτητα

Ο ρυθμός παραγωγής της κοπής με laser είναι συνδεδεμένος με την ποιότητα ισχύος και τις ιδιότητες του υλικού. Πάνω από ένα όριο, ο ρυθμός είναι ευθέως ανάλογος της διαθέσιμης πυκνότητας ισχύος η οποία λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά του συστήματος εστίασης. Ο ρυθμός κοπής είναι επίσης αντιστρόφως ανάλογος της πυκνότητας και του πάχους του υλικού. Έτσι, για δεδομένες τιμές των παραμέτρων (μέσα στα περιοριστικά όρια της διαδικασίας), ο ρυθμός παραγωγής θα κυμαίνει με:

- Επιπρόσθετη ισχύ (π.χ. 1500W σε σύγκριση με 600W).
- Βελτιωμένη ποιότητα ακτίνας (π.χ. TEM<sub>00</sub> σε σύγκριση με TEM<sub>20</sub>).



- c. Μικρότερο μέγεθος εστιαζόμενου σημείου [π.χ. 63,5mm (2,5") σε σχέση με 127mm (5")].
- d. Μικρότερη απαιτούμενη ενέργεια για να ξεκινήσει η ατμοποίηση (π.χ. πλαστικό σε σχέση με χάλυβα).
- e. Μικρότερη πυκνότητα υλικού (π.χ. πεύκο σε σχέση με λευκή καρυδιά).
- f. Μειωμένο πάχος [π.χ. 3mm (0,12") σε σχέση με 6mm (0,24")].

Ο ρυθμός τροφοδοσίας μπορεί να είναι διαφορετικός για συγκεκριμένες ομάδες παραμέτρων με σκοπό να εξασφαλίσουν διαφορετικά αποτελέσματα της ποιότητας των ακμών. Συγκεκριμένα για μέταλλα, η γραφική παράσταση της ταχύτητας κοπής με το πάχος του υλικού έχει δύο καμπύλες. Η άνω καμπύλη αντανακλά τη μέγιστη ταχύτητα με την οποία επιτυγχάνεται η κοπή ενώ η κάτω καμπύλη δείχνει το όριο από το οποίο από εκεί και κάτω συμβαίνει η ασυνεχής κοπή ή η ανάφλεξη όταν χρησιμοποιούμε οξυγόνο για βοηθητικό αέριο. Το προκύπτων παράθυρο των αποδεχόμενων ταχυτήτων κοπής είναι συνήθως πλατύτερο για τα λεπτότερα υλικά.

Για laser CO<sub>2</sub>, η ισχύ (P) ανά μονάδα πάχους (z) είναι περίπου ανάλογη της ταχύτητας κοπής (V). Γι' αυτό το λόγο ο λόγος της ισχύος προς το γινόμενο της ταχύτητας και του πάχους είναι περίπου σταθερός όπως φαίνεται και παρακάτω:

$$P/Vz = \text{σταθερά}$$

$$(P/Vz)_1 = (P/Vz)_2$$

Γενικά, εάν η ταχύτητα είναι πολύ μικρή, το πλάτος της εγκοπής, η σκουριά, η επανάτηξη και η Θ.Ε.Ζ. αυξάνονται. Εάν η ταχύτητα είναι πολύ μεγάλη έχει ως αποτέλεσμα την ατελή κοπή. Η αυξανόμενη ανακλαστικότητα της επιφάνειας για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος (π.χ. αλουμίνιο σε μήκος κύματος ενός laser CO<sub>2</sub>) θα μειώσει το εύρος μέσα στο οποίο η ταχύτητα κοπής θα μπορεί να μεταβάλεται δίχως σημαντική επίδραση στην ποιότητα κοπής.

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι ο χρόνος κοπής είναι εν μέρει συνδεδεμένος με την γραμμική ταχύτητα κοπής, ιδιαίτερα όταν μελετούμε την κοπή περιγραμμάτων. Ο ολικός χρόνος κοπής θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει το χρόνο διάτρησης, τον χρόνο προπορείας και τον χρόνο καθυστέρησης. Η εξίσωση που ακολουθεί αθροίζει μερικούς από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που προσδιορίζουν τον ολικό χρόνο κοπής.

$$\text{Ολικός χρόνος κοπής} = \Sigma (\text{καθυστέρηση ή όχι του βοηθητικού αερίου}) + \Sigma (\text{χρόνος διάτρησης}) + \Sigma (\text{χρόνος σταθεροποίησης του πλάσματος, εάν απαιτείται}) + \Sigma (\text{μήκος κοπής} / \text{ταχύτητα κοπής}).$$

Πρακτικά, η ταχύτητα κοπής για παραγωγή τίθεται κάτω από την μέγιστη δυνατή ταχύτητα κοπής. Για παράδειγμα, η ταχύτητα κοπής του μαλακού χάλυβα προσαρμόζεται στο 80-90% της μέγιστης ταχύτητας κοπής. Αυτό επιτρέπει μια πιο αξιόπιστη διαδικασία η οποία είναι πιο ανεκτική στις αποκλίσεις ή τις αυξομειώσεις των παραμέτρων κοπής (δηλαδή ισχύς, θέση εστίασης, πάχος υλικού, ροή βοηθητικού αερίου, ταχύτητα κοπής).

### Τύπος φακών και εστιακή απόσταση

Οι φακοί εστίασης υπάρχουν σε ποικιλία τύπων και υλικών. Μόνο μερικά υλικά χρησιμοποιούνται για φακούς επαφής στα laser CO<sub>2</sub> βασιζόμενα στην ικανότητα τους να μεταδίδουν το μήκος κύματος των 10,6μm. Ο σεληνικός ψευδάργυρος χρησιμοποιείται σχεδόν πάντα με τα υψηλής ισχύος laser CO<sub>2</sub>. Το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) και το χλωριούχο κάλλιο (KCl) χρησιμοποιούνται επίσης για φακούς του laser CO<sub>2</sub>. Ωστόσο, το αρσενικούχο γάλλιο έχει υψηλότερη απορρόφηση από το ZnSe και είναι αδιαφανή στο ορατό φάσμα (δηλαδή, δεν θα μεταδίδει την κόκκινη ακτίνα από ένα laser ήλιου - νέου) ενώ το KCl είναι υγροσκοπικό, ευδιάλυτο στο νερό και έχει μικρό δείκτη διαθλάσεως.

Όταν μελετούμε τους τύπους των φακών (π.χ. επιπεδόκυρτος, διαθλαστικός) το ισοζύγιο μεταξύ του κόστους και της ικανότητας για εστίαση είναι το κύριο ζήτημα. Ωστόσο, οι επιπεδόκυρτοι φακοί είναι γενικά αποδεκτοί για τις πιο πολλές εφαρμογές κοπής των laser CO<sub>2</sub>. Η ικανότητα εστίασης ενός φακού συνδέεται με το F# [τον λόγο της εστιακής απόστασης (f) του φακού προς το μέγεθος της πρωτογενούς ακτίνας στο φακό (D)]. Στον πίνακα 3.IX που ακολουθεί παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του τύπου των φακών που χρησιμοποιούνται στα laser CO<sub>2</sub>. Οι φακοί των laser Nd:YAG είναι χαρακτηριστικά κατασκευασμένοι από τηγμένο πυρίτιο.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.IX**

**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΤΥΠΩΝ ΤΩΝ ΦΑΚΩΝ ΓΙΑ LASER CO<sub>2</sub>**

ΤΥΠΟΣ	F#(f/D) Σχεδόν στο σημείο διάθλασης	F#(f/D) Γενικά αποδεκτό	Σχετικό κόστος
Επιπεδοκυρτός	>8	>5	Χαμηλότερο
Ημισεληνοειδές	>6	>2.5	Μέσο
Σφαιρικός	KANENA	KANENA	Υψηλό
Διαθλαστικός	KANENA	KANENA	Υψηλότερο

Από τη στιγμή που η ταχύτητα είναι συνάρτηση της διαθέσιμης πυκνότητας ισχύος, η εκλογή των φακών εστίασης έχει μεγάλη επίδραση στην επακόλουθη ποιότητα κοπής. Επειδή το μέγεθος του εστιαζόμενου σημείου είναι ανάλογο της εστιακής απόστασης, η πυκνότητα ισχύος που παράγεται είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης. Φακοί με μικρές εστιακές αποστάσεις δίνουν πολύ υψηλές πυκνότητες ενέργειας, αλλά είναι περιορισμένοι ως προς την εφαρμογή τους εξ' αιτίας του ρηχού βάθους κοπής και των λεπτών υλικών (γιατί το πλάτος της εγκοπής πρέπει να είναι μεγαλύτερο στα χοντρά υλικά για να επιτρέπει την αποτελεσματική εκροή του λιωμένου υλικού). Είναι κατάλληλοι για χρήση σε λεπτά υλικά και με υψηλές ταχύτητες λειτουργίας όπου το υλικό μπορεί να κρατιέται μέσα στο βάθος κοπής της ακτίνας.

Φακοί με μεγάλες εστιακές αποστάσεις έχουν χαμηλότερες πυκνότητες ισχύος, αλλά είναι σε θέση να διατηρήσουν αυτές τις πυκνότητες πάνω από ένα μεγάλο εύρος και γι' αυτό το λόγο παράγουν ευθύτερες ακμές σε παχύτερα υλικά, απ' ότι παράγουν φακοί με μικρότερες εστιακές αποστάσεις. Επιπρόσθετα, μικρές εστιακές αποστάσεις παράγουν τραχιές ακμές στην χαμηλότερη περιοχή της εγκοπής σε χοντρά υλικά (εφόσον το πλάτος της εγκοπής είναι αρκετά μεγάλο για να επιτρέπει την αποτελεσματική εκροή του λιωμένου υλικού). Γι αυτό το λόγο, η εστιακή απόσταση (για ένα δεδομένο laser) θα πρέπει να είναι η τελειότερη δυνατή σε σχέση με το πάχος του υλικού που θα κοπεί. Τα χοντρά, οργανικά υλικά παράγουν υψηλή συγκέντρωση των αποσυντιθεμένων και αεριωδών υδρογονανθράκων στην εγκοπή. Η

απορρόφηση και επανακινοβολία της ακτίνας του laser μέσω αυτών αυξάνει το πλάτος της εγκοπής στο κεντρικό τμήμα της κοπής. Το υψηλής πίεσης βοηθητικό αέριο, ή οι μικρές ταχύτητες κοπής σε συνδυασμό με μια μεγάλη εστιακή απόσταση του φακού, ελαχιστοποιούν αυτό το αποτέλεσμα.

Η επιλογή του κατάλληλου φακού περιέχει έναν συμβιβασμό μεταξύ της πυκνότητας ισχύος και του βάθους εστίασης. Ενώ μικρότερες εστιακές αποστάσεις παρέχουν μικρότερα μεγέθη σημείων με μια υψηλότερη πυκνότητα ισχύος, έχουν και πολύ μικρότερο βάθος εστίασης. Ο πίνακας 3.X που ακολουθεί δίνει χαρακτηριστικές τιμές για το μέγιστο πάχος του υλικού και την ανοχή της εστίασης σχετικά με το βάθος της εστίασης.

### ΠΙΝΑΚΑΣ 3.X

#### ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΕΣΤΙΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ [ΓΙΑ LASER CO<sub>2</sub> ΜΕ $2 < M^2 < 4$ ΚΑΙ $20 \text{ mm}(0.79'') < D < 25(0.98)$ ]

ΕΣΤΙΑΚΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ ΥΛΙΚΟΥ	ΑΝΟΧΗ ΕΣΤΙΑΣΗΣ
127.0 mm(5.0'')	<10mm(0.39'')	+/- 0.25mm(0.01'')
190.5 mm(7.5'')	>10mm(0.39'')	+/-0.50mm(0.02'')

#### Θέση εστίασης

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κοπής, το σημείο εστίασης των φακών θα πρέπει να παραμένει σταθερό ώστε να παρέχει τα καλύτερα αποτελέσματα. Στον πίνακα 3.XI που ακολουθεί παρουσιάζονται τρεις κοινές περιπτώσεις. Πάνω ή κάτω από αυτό το σημείο, η ποιότητα κοπής χειροτερεύει. Τα συστήματα κοπής που έχουν φακούς με μικρές εστιακές αποστάσεις πρέπει να εξασφαλίζουν την σταθερή απόσταση μεταξύ φακών - τεμαχίου.

Η καλύτερη θέση εστίασης εξαρτάται από το πάχος του υλικού και τον τύπο του. Η ευαισθησία της ποιότητα κοπής στην θέση εστίασης επίσης εξαρτάται από τον τύπο και το πάχος του υλικού, καθώς επίσης και της ισχύος του laser. Μια τεχνική η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί η βελτίωση θέση εστίασης είναι να ρυθμίσουμε την θέση εστίασης (ενώ κρατούμε την απόσταση απομάκρυνσης σταθερή) ώσπου το πλάτος της εγκοπής να ελαχιστοποιηθεί.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.ΧΙ**  
**ΘΕΣΗ ΕΣΤΙΑΣΗΣ**

<b>ΥΛΙΚΟ</b>	<b>ΒΟΗΘΗΤΙΚΟ ΑΕΡΙΟ</b>	<b>ΘΕΣΗ ΕΣΤΙΑΣΗΣ</b>
Ανθρακούχος χάλυβας	Οξυγόνο	Πάνω απο την επιφάνεια του υλικού
Μέταλλα	Άζωτο	Κοντά στην επιφάνεια του υλικού
Αμέταλλα	Κανένα	Κάτω απο την επιφάνεια του υλικού

### **3.13 Βοηθητικό αέριο Αντιδραστικό ή αδρανές**

Όπως αναφερθήκαμε, το βοηθητικό αέριο παρέχεται ομοαξονικά με την εστιασμένη ακτίνα για να προστατεύσει τους φακούς και να βοηθήσει στη διαδικασία απομάκρυνσης του υλικού. Γενικά, ο συμπιεσμένος αέρας (ο οποίος χρησιμοποιείται βασικά για οργανικά υλικά) χρησιμοποιούνται για να εξάγουν το λιωμένο και το ατμοποιημένο υλικό από τη ζώνη κοπής, καθώς και να ελαχιστοποιήσουν τα υπερβολικά καψίματα. Για τις περισσότερες εφαρμογές κοπής μετάλλων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα αντιδραστικό αέριο (π.χ οξυγόνο) για να δημιουργηθεί μια εξωθερμική αντίδραση. Το οξυγόνο δημιουργεί ένα ακτινωτό μέτωπο καύσης (εξωθερμική αντίδραση) μπροστά από την ακτίνα, το οποίο μπορεί να βελτιώσει τις ταχύτητες κοπής κατά 25-40% πάνω από τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται με χρήση αέρα. Η οξειδωτική αντίδραση σε μαλακούς χάλυβες μπορεί να καλύπτει το 40% σχεδόν της συνολικής ενέργειας κοπής. Ωστόσο, όταν η εισερχόμενη ενέργεια από την εξωθερμική αντίδραση είναι πολύ μεγαλύτερη από την εκροή του λιωμένου υλικού, υπάρχει η πιθανότητα να εμφανιστεί μη ελεγχόμενο κάψιμο [ειδικά όταν η θερμοκρασία του κυρίως υλικού υπερβεί τους 95°C(200°F)].

Υπάρχουν αρκετές τεχνικές για την μείωση της θερμοκρασίας του κυρίως υλικού και επομένως και των πιθανών καψιμάτων :

1. Ρυθμιστής της συχνότητας του παλμού.
2. Κλιμακωτή ισχύς.

3. Ψύξη.
4. Λείανση της κοπής.
5. Κοπή με βοηθητικό αέριο.

Το αργόν χρησιμοποιείται ως βοηθητικό αέριο για κοπή τιτανίου ενώ το αμμώνιο χρησιμοποιείται για μέταλλα που είναι ευαίσθητα στο οξυγόνο ώστε να αποφύγουμε τον σχηματισμό σκληρών οξειδίων δίπλα στην εγκοπή (π.χ. οξείδια του χρωμίου όταν κόβουμε χρωμονικελιούχο ανοξείδωτο χάλυβα). Ωστόσο η κοπή με αντιδραστικό αέριο είναι κατά 10-50% μικρότερης ταχύτητας από την κοπή με οξυγόνο, και χρησιμοποιείται ειδικά όταν απαιτείται μια ακμή κοπής ελεύθερη από οξείδια.

### Πίεση

Όπως και ο τύπος του αερίου, και η πίεση είναι ένα σπουδαίο χαρακτηριστικό. Με βάση ότι η κοπή με laser παράγει στενές εγκοπές, η απαιτούμενη πίεση του βοηθητικού αερίου είναι συχνά υψηλή γιατί μόνο ένα ποσοστό του αερίου ρέει ανάμεσα από την στενή εγκοπή. Χαρακτηριστικά, πίεση της τάξης των 3-4 bar (45-60 psi) αναπτύσσεται στο ακροφύσιο του αερίου που χρησιμοποιείται για κοπή με οξυγόνο λεπτών υλικών σε υψηλές ταχύτητες ώστε να αποτραπεί η εμφάνιση της σκουριάς στις πίσω ακμές.

Επιπρόσθετα με την υψηλή πίεση, η χρήση αντιδραστικών αερίων (όταν είναι αποδεκτά μεταλλουργικώς) σε μεταλλικά υλικά ελαχιστοποιεί την ποσότητα της σκουριάς. Γενικά, η πίεση μειώνεται όσο αυξάνει το πάχος του υλικού ή όσο μειώνεται η ταχύτητα. Ωστόσο, στις περιπτώσεις του ανοξείδωτου χάλυβα και του αλουμινίου, απαιτείται υψηλότερη πίεση όσο αυξάνει το πάχος των υλικών. Οι μετρητές πίεσης θα πρέπει να τοποθετούνται απ' ευθείας (ή όσο το δυνατόν πιο κοντά) στο ακροφύσιο του αερίου ώστε να βεβαιώνουν την ακριβή ένδειξη της πραγματικής πίεσης κοπής.

Σε κάποιες περιπτώσεις όπως στην κοπή δίχως οξείδια, η πίεση του αερίου (αζώτου) μπορεί να φτάνει τα 27 bar (400 psi). Σε τέτοιες καταστάσεις, πρέπει να χρησιμοποιούνται χοντρότεροι εστιακοί φακοί ώστε να αντέχουν τις υψηλές πιέσεις. Για κοπή πλαστικών (π.χ. πολυπροπυλένιο, πολυστυρόλιο και πολυαιθυλένιο), η πολύ μικρή πίεση μπορεί να οδηγήσει σε ανάφλεξη του λιωμένου υλικού και μέσα από τις φλόγες που παράγονται, μπορεί να έχουμε παραμόρφωση, ανάφλεξη ή λιώσιμο του τεμαχίου. Επιπρόσθετα, το λιωμένο υλικό εκρέει λιγότερο αποτελεσματικά, και γι αυτό το λόγο η ταχύτητα κοπής μειώνεται. Από την άλλη, πολύ υψηλή πίεση του αερίου αυξάνει την τραχύτητα των ακμών κοπής εξαιτίας του στροβιλισμού του αερίου. Η κοπή πλαστικών μέσω ατμοποίησης (π.χ. ακρυλικά) αντιδρά

διαφορετικά στις αλλαγές της πίεσης. Εάν η πίεση του αερίου είναι πολύ υψηλή, η κανονική ακμή αλλάζει σε μια ακμή με άσχημη καμένη εμφάνιση. Εάν η πίεση είναι πολύ μικρή, η ατμοποίηση στην ζώνη κοπής μπορεί να επιφέρει μια κίτρινη αιθαλώδη φλόγα η οποία μπορεί να βλάψει το τεμάχιο.

## Ροή

Οι σωληνοειδείς αγωγοί του βοηθητικού αερίου καθώς και το μέγεθος των γραμμών παροχής πρέπει να επιλέγονται για την μέγιστη πίεση και ρυθμό παροχής που απαιτούνται. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι σε κοπή υψηλής πίεσης, ο τύπος του αερίου (αντιδραστικό αέριο) και η κατανάλωση αυτού επιφέρουν ένα κόστος στην διαδικασία το οποίο είναι σημαντικά υψηλότερο από αυτό της κοπής με χαμηλή πίεση. Για υπερηχητική ροή [δηλαδή για πίεση στο ακροφύσιο μεγαλύτερη από 0,9 bar (13 psi) για οξυγόνο, άζωτο και αέρα και μεγαλύτερη από 1,1 bar (15 psi) για αργόν και ήλιο], η κατανάλωση (Q) του αερίου σε λίτρα ανά λεπτό μπορεί εύκολα να υπολογισθεί γνωρίζοντας τη διάμετρο (Φ) του στομίου εκροής σε χιλιοστά και την μετρούμενη πίεση στο ακροφύσιο (Pg) σε bar. Στο σχήμα 3.17 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανάλωση αερίου για υπερηχητική ροή διαμέσου διαφόρων διαμέτρων ακροφυσίου. Η σχέση που μας δίνει την κατανομή του αερίου είναι βάση των παραπάνω:

$$Q=8,2(\Phi)^2[Pg+1]$$

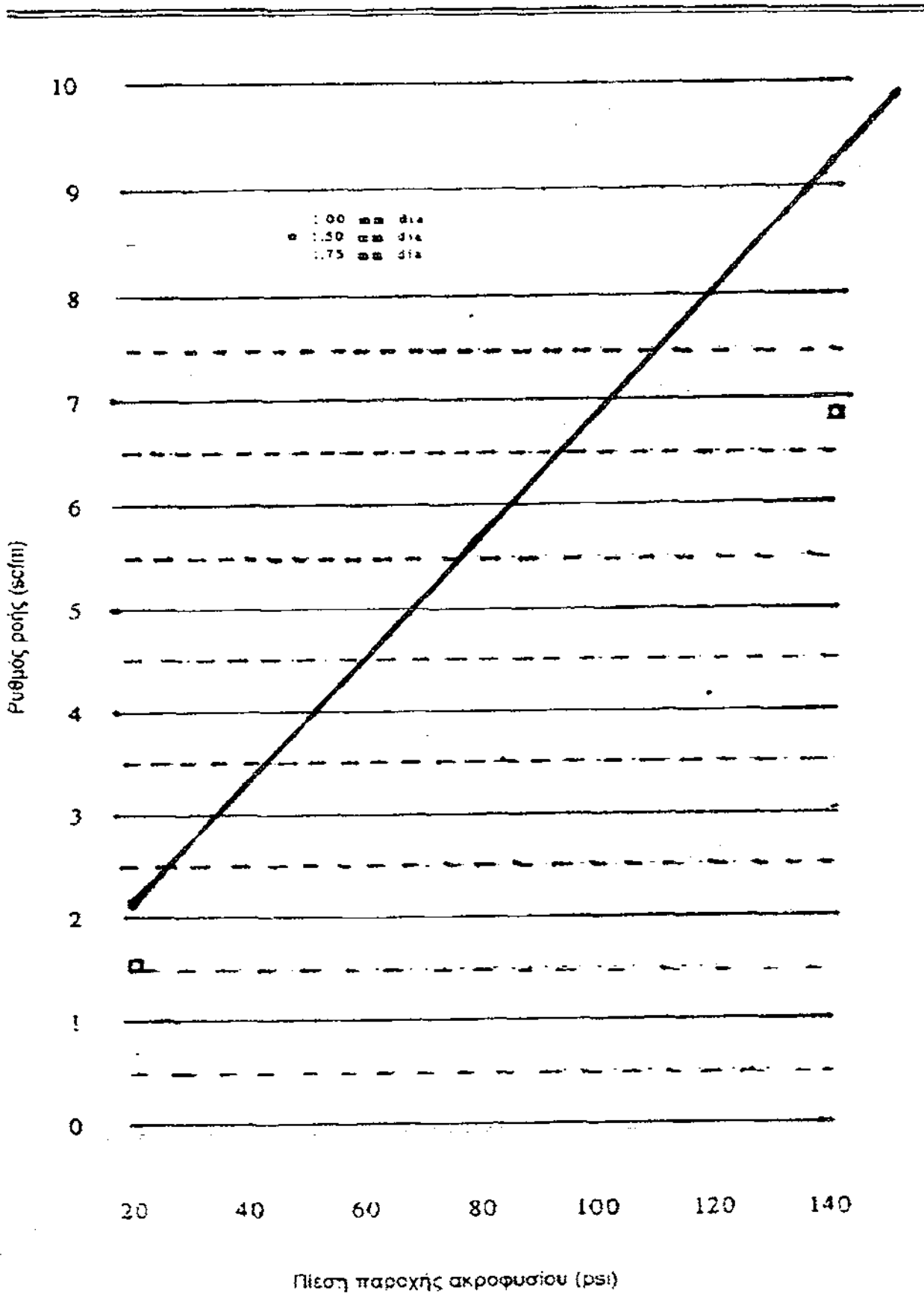
Στον πίνακα 3.XII που ακολουθεί παρουσιάζονται τα κυριότερα αέρια και οι εφαρμογές τους.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.XII**

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 3.XII</b>		
	<b>ΤΥΠΟΙ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥΣ</b>	
<b>Τύπος αερίου</b>	<b>Κυριότερες εφαρμογές</b>	<b>Σχόλια</b>
<b>Οξυγόνο</b>	Μαλακό χάλυβα, ανοξειδωτο χάλυβα, χαλκό	Αυξάνει την ταχύτητα κοπής.
		Υπάρχει κίνδυνος καψιμάτων.
		Σχηματίζεται στρώμα οξειδίου στην ακμή κοπής
<b>Άζωτο</b>	Ανοξειδωτος χάλυβας,	Μικρότερες ταχύτητες κοπής,
	αλουμίνιο, μαλακός χάλυβας, κράματα νικελίου	καθαρές επιφάνειες (δίχως στρώματα οξειδίων κατάλληλες για συγκόλληση).
<b>Αέρας</b>	Λεπτό αλουμίνιο, πλαστικά,	Πολύ φθηνή εφαρμογή για πάνω από 1.5 mm
	ξύλο, γυαλί, χαλαζίας	
<b>Αργόν / Ήλιον</b>	Τιτάνιο	Το αργόν είναι σχετικά ακριβό.
		Το ήλιον ή το μίγμα ηλίου αργού μεγιστοποιεί την Θ.Ε.Ζ



## Κατανάλωση βοηθητικού αερίου



Σχήμα 3.17: Κατανάλωση βοηθητικού αερίου

### 3.14 Παλμός

Η ισχύς που παράγεται από ένα laser είναι είτε της μορφής ενός πολύ μικρής, εντατικής έκρηξης ενέργειας ή μιας σταθερής ροής ισχύος. Αν και υπάρχουν κάποιες επικαλύψεις των εφαρμογών, υπάρχουν χαρακτηριστικές περιοχές όπου ένα laser παλμών ή ένα laser σταθερού κύματος (CW) είναι πιο κατάλληλα.

Δύο τύποι παλμών είναι διαθέσιμοι, ο κανονικός και ο υπερπαλμός. Στον κανονικό παλμό, το ρεύμα ανάβει και διακόπτεται έχοντας ως αποτέλεσμα έναν παλμό εξόδου στον οποίο το μέγιστο σημείο ισχύος του παλμού είναι περίπου ίσο με την ισχύ του CW. Στον υπερπαλμό, υψηλότερου ρεύματος παλμοί παράγονται για να διεγείρουν την ακτίνα laser μέτριας ενέργειας, έχοντας ως αποτέλεσμα μέγιστη ισχύ 2-8 φορές αυτές του συνεχούς κύματος (CW). Αυτό επιτρέπει στα μικρής έως μεσαίας ισχύος laser συνεχούς κύματος να επιτύχουν τέτοιες ενέργειες ώστε να φτάσουν την θερμοκρασία ατμοποίησης των περισσότερων υλικών. Σε κάποια laser τα προγράμματα υπερπαλμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με συνεχούς κύματος ισχύ (με κάποιες μειώσεις στη μέγιστη τιμή ισχύος του παλμού η οποία εξαρτάται από τα επίπεδα ισχύος του συνεχούς κύματος). Σε άλλες περιπτώσεις η επακόλουθη μικρή διάρκεια παλμού εγγυάται την ελάχιστη παροχή θερμότητας, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική για τεμάχια ευαίσθητα στην παραμόρφωση.

Ωστόσο, η παλμική δράση οδηγεί σε χαρακτηριστικούς αργούς ρυθμούς τροφοδοσίας από τη στιγμή που οι κύκλοι εργασίας (ο επί τοις εκατό χρόνος κατά τον οποίο το laser εκπέμπει ενέργεια κατά τη διάρκεια της κοπής) είναι λιγότερο από 100%.

Τα laser συνεχούς κύματος διατηρούν την έξοδο τους πάνω από το υλικό άνοιγμα, της διαδικασίας (100% κύκλος ενέργειας). Το κύριο πλεονέκτημα του συνεχούς κύματος είναι ότι παρέχει μεγαλύτερο ποσό ισχύος ανά μονάδα χρόνου. Αυτό οδηγεί σε ταχύτερους ρυθμούς τροφοδοσίας από αυτούς των παλμικών τρόπων, ενώ παρέχει περισσότερη θερμότητα στο τεμάχιο, η επακόλουθη ποιότητα των ακμών είναι συγκρίσιμη με αυτήν της παλμικής κοπής για τα περισσότερα υλικά.

#### Συχνότητα και επικάλυψη

Εάν χρησιμοποιούμε ένα παλμικό laser, τότε η τιμή του παλμού σε Hz ( $\mu$ ), το μέσο πλάτος της εγκοπής σε χιλιοστά (Kw) και η ταχύτητα κοπής σε χιλιοστά ανά δευτερόλεπτο (V) πρέπει να ταιριάζουν ώστε να παράγουν το απαιτούμενο ποσοστό επί τοις εκατό της επικάλυψης (%OL). Η ακόλουθη σχέση μπορεί να είναι χρήσιμη, ειδικά για τις εφαρμογές των laser Nd:YAG όπου η συχνότητα είναι ένας περιορισμένος παράγοντας (περίπου 20 KHz μέγιστο συγκρίσιμα με τα περίπου 100 KHz των laser CO<sub>2</sub>)

$$u=100V/(K_w)(100 - \%OL)$$

για κοπή μικρών αυλακώσεων  $75 < \%OL < 80$

για κανονική κοπή  $60 > \%OL < 70$

$$u=5V/K_w$$

( για  $\%OL=80$ )

## Ενέργεια του παλμού

Στα παλμικά laser CO<sub>2</sub> και Nd:YAG, η ενέργεια ανά παλμό, η μέγιστη ισχύς ανά παλμό και το πλάτος του παλμού είναι παράμετροι κλειδιά της κοπής. Η ενέργεια ανά παλμό ( $E_p$ ) σε Joule συνδέεται με τη μέση ισχύ του laser ( $P_{ave}$ ) και την τιμή του ( $u$ ) με την ακόλουθη σχέση:

$$E_p = P_{ave} / u$$

## Μέγιστη ισχύς

Η μέγιστη ισχύς ανά παλμό ( $P_p$ ) είναι ο ρυθμός της ενέργειας ανά παλμό προς το πλάτος του παλμού σε δευτερόλεπτα ( $t$ ):

$$P_p = E_p/t$$

Για μια δεδομένη ενέργεια ανά παλμό, μικροί χρόνοι πλάτους επιφέρουν μέγιστες τιμές ισχύος. Όταν η μέγιστη ισχύς γίνεται πολύ υψηλή η επακόλουθη κοπή έχει χαρακτηριστικές αυλακώσεις, ειδικά εάν η ταχύτητα κοπής είναι είτε πολύ μεγάλη είτε πολύ μικρή. Γενικά, η υψηλή ισχύς μπορεί να κόψει παχύτερα υλικά με μικρότερη παροχή θερμότητα στα εξαρτήματα που κόβουμε. Ωστόσο, η ταχύτητα κοπής πάσχει (συγκρινόμενη με αυτήν την κοπής συνεχούς κύματος) επειδή η υψηλή ισχύς συμβαίνει σε χαμηλότερες συχνότητες (ειδικά με τα laser Nd:YAG) και η ταχύτητα πρέπει να προσαρμόζεται στην συχνότητα για να εξασφαλίζεται συνεχή κοπή.

## Πλάτος παλμού

Μεγάλα διαστήματα πλάτους επιφέρουν μικρές τιμές μέγιστης ισχύος και προκαλούν κοπή με υπερβολικά μεγάλο πλάτος εγκοπής. Επιπρόσθετα, οι μικρές τιμές πυκνότητας ισχύος επιφέρουν μεγαλύτερη ολική παροχή θερμότητας στο εξάρτημα.

### 3.15 Η χρήση του ψυκτικού μέσου

Το ψυκτικό μέσο (συνήθως νερό ή νερό με κάποια αντιδιαβρωτική ουσία) παρέχεται στην ζώνη κοπής συνήθως μέσω της κεφαλής κοπής (ομοαξονικά με το βοηθητικό αέριο) και απομακρύνεται από το, κενό, ή ανακυκλοφορεί στο σύστημα και τα δύο μαζί. Μια ελαφρώς υψηλότερη πίεση του βοηθητικού αερίου [περίπου 2 bar (30 psi)] είναι απαιτούμενη για να κρατάει το ψυκτικό μέσο έξω από την εγκοπή. Εξαιτίας της πίεσης του αερίου και της ροής που εκτοπίζει το ψυκτικό μέσο μακριά από την άμεση ζώνη εγκοπής, η παρουσία του νερού δεν επηρεάζει σημαντικά την ταχύτητα κοπής. Ωστόσο τα τεμάχια που θα κοπούν, θα πρέπει να στεγνώνουν μετά την κοπή για να αποφεύγουμε την διάβρωση τους. Η χρήση του ψυκτικού μέσου στην κοπή με laser έχει αρκετά βασικά πλεονεκτήματα :

- 1) Η χρησιμοποίηση του ψυκτικού μέσου κατά τη διάρκεια της κοπής μπορεί να μειώσει την Θ.Ε.Ζ. στους ανθρακούχους χάλυβες, το αλουμίνιο και το τιτάνιο.
- 2) Το ψυκτικό μέσο μειώνει την θερμική παραμόρφωση των ελασμάτων όταν κόβουμε λεπτά υλικά.
- 3) Η χρήση του ψυκτικού μέσου μπορεί να μειώσει την φθορά του χρώματος και της επικάλυψης κοντά στην ζώνη κοπής σε τεμάχια που έχουν βαφεί ή έχουν κάποια επικάλυψη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ LASER

#### 4.1 Αρχές της συγκόλλησης με laser και τα χαρακτηριστικά της.

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τον τύπο της συγκόλλησης με laser, τα χαρακτηριστικά που την ξεχωρίζουν από άλλες τεχνικές και τις απαραίτητες προϋποθέσεις για να επιλεγεί.

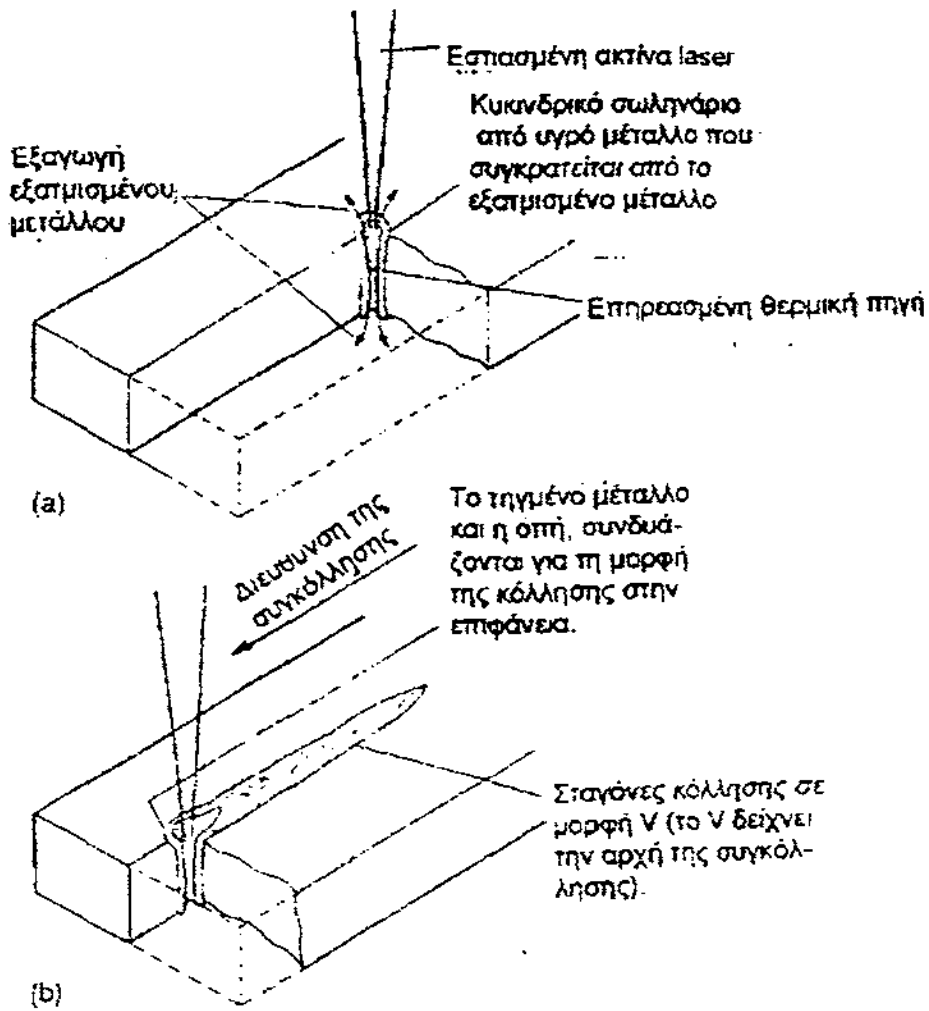
##### 4.1.1 Συγκόλληση με laser

Η συγκόλληση με laser είναι μια τεχνική συγκόλλησης που επιτυγχάνεται με μια υψηλής ισχύος πυκνότητα, αποκτημένη από την εστίαση μιας ακτίνας laser φωτός, σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Η ακτίνα laser εστιάζεται πολύ κοντά στην επιφάνεια των υλικών που θα ενωθούν. Έτσι, την πρώτη στιγμή, ένα μεγάλο ποσοστό της προσπίπτουσας ακτίνας ανακλάται από την επιφάνεια εργασίας, για μια μικρή περίοδο. Αυτό συμβαίνει διότι τα περισσότερα μέταλλα είναι καλοί ανακλαστές. Ένα μικρό ποσοστό της ακτίνας laser, που αρχικά προσροφάται από την εργασία, καίει γρήγορα την επιφάνεια του υλικού, προκαλώντας την προσρόφηση ενέργειας από το ιονισμένο μέταλλο που εξατμίζεται, με αποτέλεσμα την γρήγορη επιτάχυνση της απορρόφησης τόσης ενέργειας, όσης από πριν είχε ανακλαστεί.

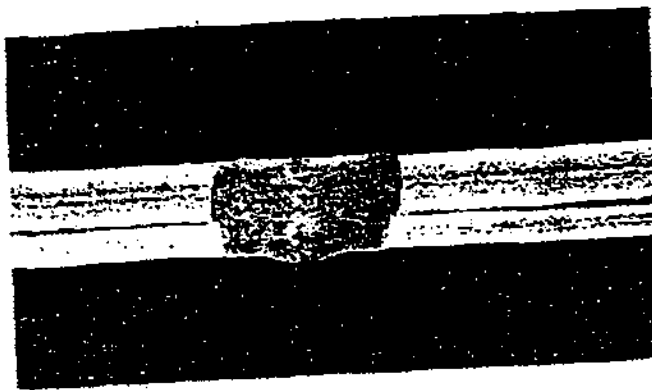
Σε μια πυκνότητα εστιασμένης δύναμης (της τάξεως των  $10^4 \text{ W/mm}^2$ ) η ταχύτητα του μετακινούμενου υλικού που εξατμίζεται προκαλεί μια μικρή οπή (μια πολύ μικρή διαμετρική κυλινδρική δέσμη ακτινών) μέσα στο υλικό. Καθώς η οπή διεισδύει βαθύτερα μέσα στο κομμάτι, η ακτίνα laser διασκορπίζεται επαναληπτικά μέσα σε αυτό, αυξάνοντας τη ζεύξη της ενέργειας του laser μέσα στην εργασία.

Καθώς μεταδίδεται η ακτίνα του laser, η οπή παραμένει ανοικτή από την πίεση εξάτμισης, που εμποδίζει τα ρευστά τοιχώματα να καταρρεύσουν (σχήμα 4.1).

Αν το laser εφαρμοσθεί με ένα τρόπο παλμικής ενέργειας, το ρευστό μέταλλο θα κατακαθήσει στο κέντρο της οπής και θα στερεοποιηθεί με την ολοκλήρωση του παλμού, αφήνοντας μερικές φορές ένα ελαφρό εγκοπτόμενο κορδόνι, που οφείλεται στην έλλειψη μετάλλου μέσω της ατμοποίησης, όταν πρωτοδημιουργήθηκε η οπή.



Σχήμα 4.1: Α) Οπή συγκόλλησης με laser. Β) Η κίνηση κατά μήκος του κομματιού και η μορφή της συνεχούς συγκόλλησης.



Σχήμα 4.2. Κατα μήκος τομή διαμέσου μιας συγκόλλησης laser με ισχύ πυκνότητας  $10^3 \text{ W/mm}^2$ . Τα υλικά είναι ανοξείδωτοι χάλυβες τύπου 304, πάχους 1 και 0,5mm.

Όταν το laser εφαρμοσθεί με ένα τρόπο συνεχόμενου κύματος (όχι παλμικού) και η ακτίνα κινείται κατά μήκος μιας άκαμπτης γραμμής, ή αντίθετα, το ρευστό υλικό στην μπροστινή ακμή της οπής, παράγει ένα μικρό κύμα, που υποστηρίζεται από μια επιφανειακή τάση. Καθώς η ακτίνα προχωράει, το κύμα επαναπροσανατολίζεται γύρω από την ακμή και κατακάθεται στο πίσω μέρος της οπής, και τα ρευστά τοιχώματα στην οπίσθια ακμή ενώνονται και στερεοποιούνται στο βάθος της. Αυτή η ενέργεια αφήνει ένα ελαφρύ προεξέχον επιφανειακό κορδόνι (στην κορυφή) και ένα ίχνος που δείχνει την αρχή της συγκόλλησης. Το κορδόνι στην κορυφή είναι γενικά απλό και έχει καλύτερη αισθητική όψη σε σχέση με την συμβατική ηλεκτροσυγκόλληση.

Η οπή με το laser, αρχικά, συμβαίνει σε μέταλλα με ισχύ πυκνότητας περίπου  $10^3 \text{ W/mm}^2$ . Σε αυτό το επίπεδο οι κολλήσεις τείνουν να γίνουν ρηχές, ευρείες και φαρδιές (σχήμα 4.2), σε αντίθεση με τις ισχύς πυκνότητας της τάξεως  $10^4$ - $10^5 \text{ W/mm}^2$ , όπου οι κολλήσεις είναι βαθιές και στενές και προϋποθέτουν μεγάλες συγκολλητικές ταχύτητες (σχήματα 4.3, 4.4). Για ισχύ πυκνότητας οριακά άνω των  $10^5 \text{ W/mm}^2$ , η απώλεια του συγκολλημένου υλικού συμβαίνει από την αποβολή του ρευστού και εξατμισμένου μετάλλου, παράγοντας μια συγκολλημένη εγκοπή και εξαλείφοντας το κορδόνι στην άνω επιφάνεια του κομματιού. Παρ' όλα αυτά, η υπερβολική ισχύς σπάνια παράγει εξατμίσεις στην συγκόλληση, ειδικά όταν συγκολλούνται λεπτές επιφάνειες με μεγάλη ταχύτητα. Αυτό συμβαίνει διότι η περισσότερη από την ισχύ εξαφανίζεται από τον πυθμένα της οπής.

#### 4.1.2 Χαρακτηριστικά μεθόδου.

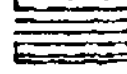
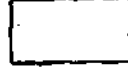
Καθώς η συγκόλληση με laser είναι μιας υψηλής ισχύος πυκνότητας διαδικασία, δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την μετάδοση θερμότητας για να επιτευχθεί η διείσδυση της κόλλησης, και είναι αρκετά διαφορετική από τις άλλες συμβατικές ηλεκτροσυγκολλήσεις και συγκολλήσεις αερίου. Με αυτές τις δυο τεχνικές, η τήξη της συγκόλλησης και η διείσδυση επιτυγχάνεται καθώς η θερμότητα μεταδίδεται στα υλικά (σχήμα 4.3) και το τηγμένο ισοθερμικά σημείο κινείται προς τα έξω, σε όλες τις κατευθύνσεις από την πηγή. Το εύρος της κολλήσεως που παράγεται με αυτές τεχνικές, είναι συνήθως μεγαλύτερο από το βάθος της και η εσωτερική θερμότητα είναι περισσότερη από την αυστηρά απαραίτητη για να εξασφαλιστεί το απαιτούμενο συγκολλητικό βάθος. Λίγα χιλιοστά πιο δίπλα, το βάθος διείσδυσης των συγκολλήσεων αερίου και ηλεκτροσυγκολλήσεων περιορίζεται και η ένωση πρέπει να επιτευχθεί με V διείσδυτική εγκοπή. Αυτή πρέπει να συμπληρωθεί με ρευστό συρμάτινο παρέμβυσμα ή με ράβδο και από ένα αριθμό από ξεχωριστές συγκολλητικές επικαλύψεις. Η

τεχνική συγκόλλησης με laser με οπή μεταφέρει θερμότητα από την πηγή του laser μέσα στο υλικό και όχι μόνο σε ένα συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας, αλλά σε μια γραμμή που προεκτείνεται στο πάχος του υλικού. Το βάθος διείσδυσης της κόλλησης περιορίζεται μόνο από την ισχύ του laser που είναι διαθέσιμο. Έτσι 1 KW μιας σωστής εστιασμένης ακτίνας laser, μπορεί να κολλήσει σε βάθος 1,5mm, με ταχύτητα 1m/ min σε κόλληση χάλυβα. Ομοίως 10KW κολλάει σε βάθος 15mm .

Συνεπώς πιο παχιά υλικά μπορούν να συγκολληθούν με ένα απλό πέρασμα, σε αντίθεση με την ηλεκτροσυγκόλληση και τη συγκόλληση αερίου, όπου μειώνεται ο χρόνος παραγωγής και εξαλείφεται το κόστος του συρμάτινου παρεβύσματος. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.4, όπου ένα μόνο πέρασμα κόλλησης με laser έχει υπερθετηθεί από πολλαπλές ηλεκτροσυγκολλήσεις.

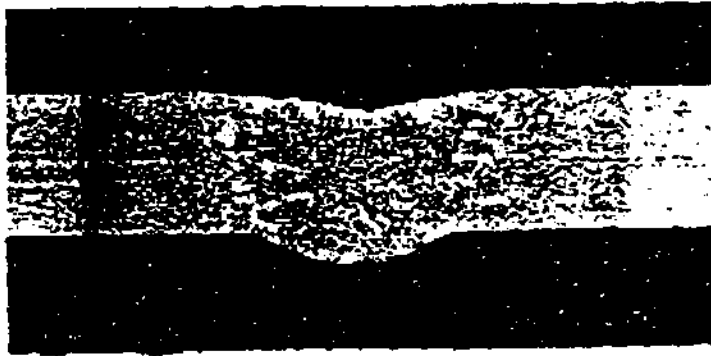


Επεξηγήσεις: Στερεό μέταλλο Υγρό μέταλλο Εξάτμιση Επηρεασμένη θερμική ζώνη

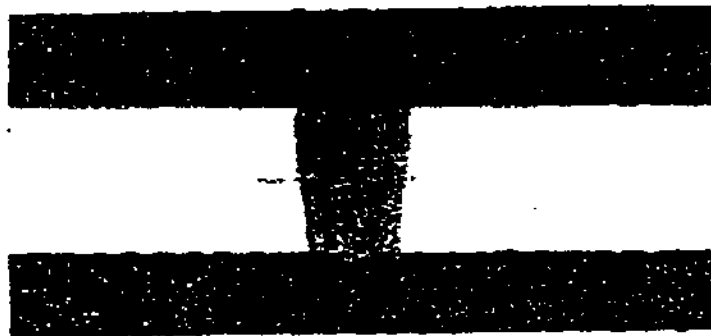
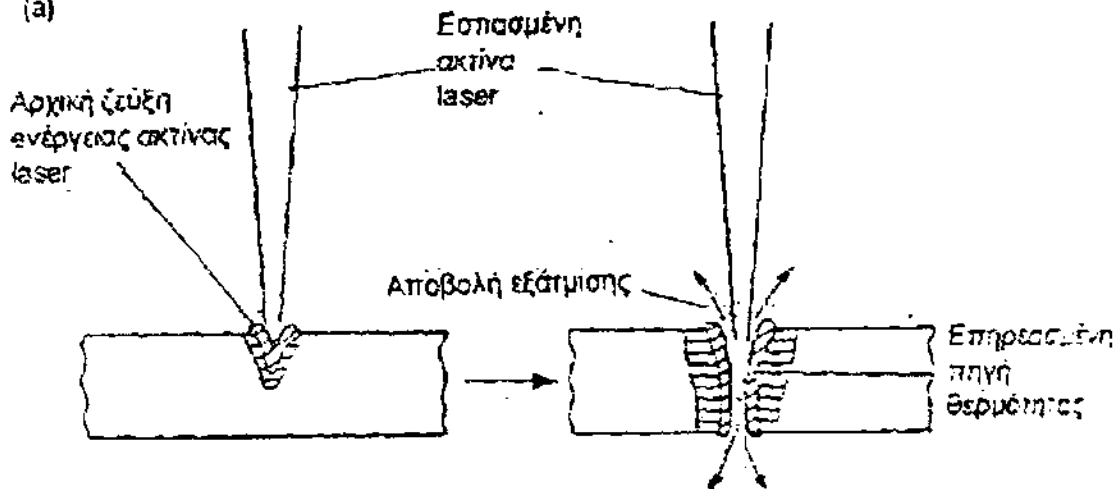


Ισοθερμικό σημείο τήξεως

Ηλεκτροσυγκόλληση ή χαμηλής ισχύος πυκνότητας ακτίνα  
Επηρεασμένη πηγή θερμότητας

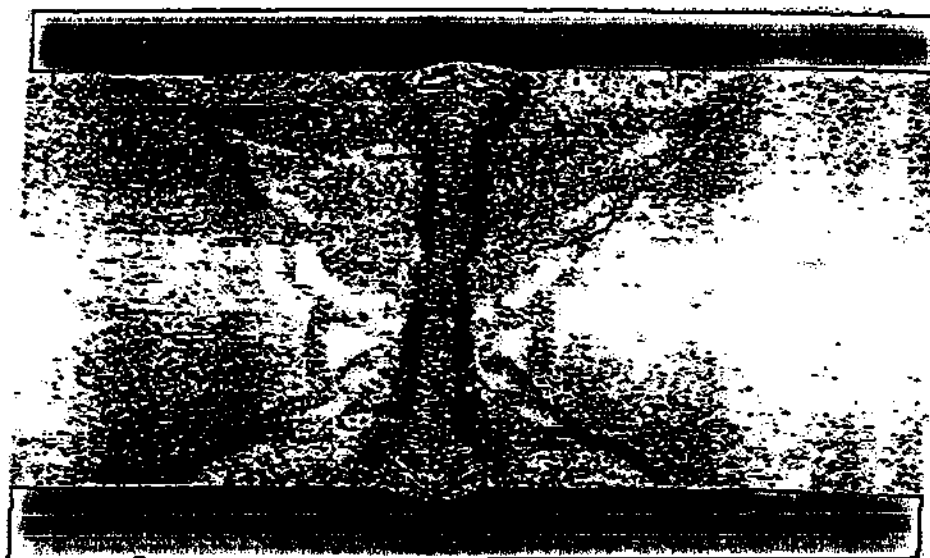


(a)



(b)

Σχήμα 4.3: Η διαφορά μεταξύ Α) της μορφής συγκόλλησης με μετάδοση Β) της μορφής συγκόλλησης με οπή. Τα υλικά και των δυο μορφών συγκολλήσεων είναι μαλακοί χάλυβες πάχους 3mm



Σχήμα 4.4: Συγκόλληση με laser μονού περάσματος από κάθε πλευρά σε σύγκριση με ηλεκτροσυγκόλληση πολλών περασμάτων(11)

## 4.2 Σύγκριση με άλλες μεθόδους

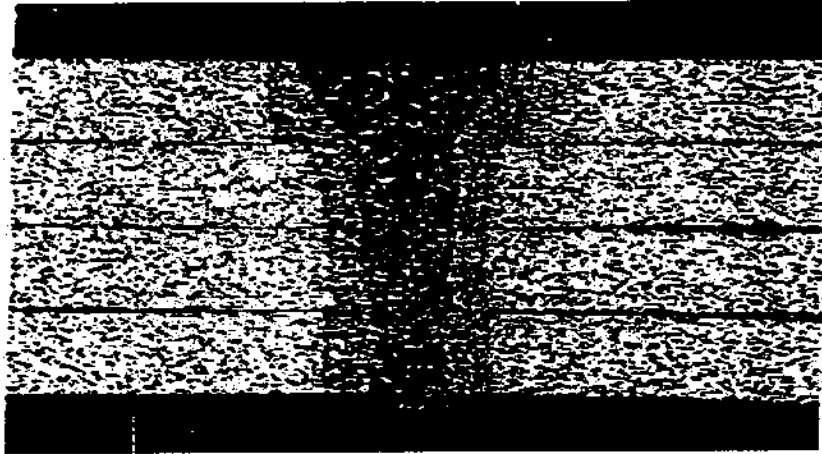
### 4.2.1. Πλεονεκτήματα

Η συγκόλληση με laser με ακτίνα ισχυρής πυκνότητας της τάξης  $10 \text{ W/ mm}^2$  έχει εξαιρετικά πλεονεκτήματα, που επιτρέπουν ταχύτητες συγκόλλησης μερικών μέτρων ανά λεπτό και εσωτερικές θερμότητες που είναι πολύ μικρότερες από αυτές που αναπτύσσουν οι ηλεκτροσυγκολλήσεις σε κάποιο συγκεκριμένο κομμάτι. Επιπροσθέτως, το παράλληλο σχήμα της κόλλησης με laser και η πολύ στενή ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα, προκαλεί ελάχιστη παραμόρφωση στο υλικό.

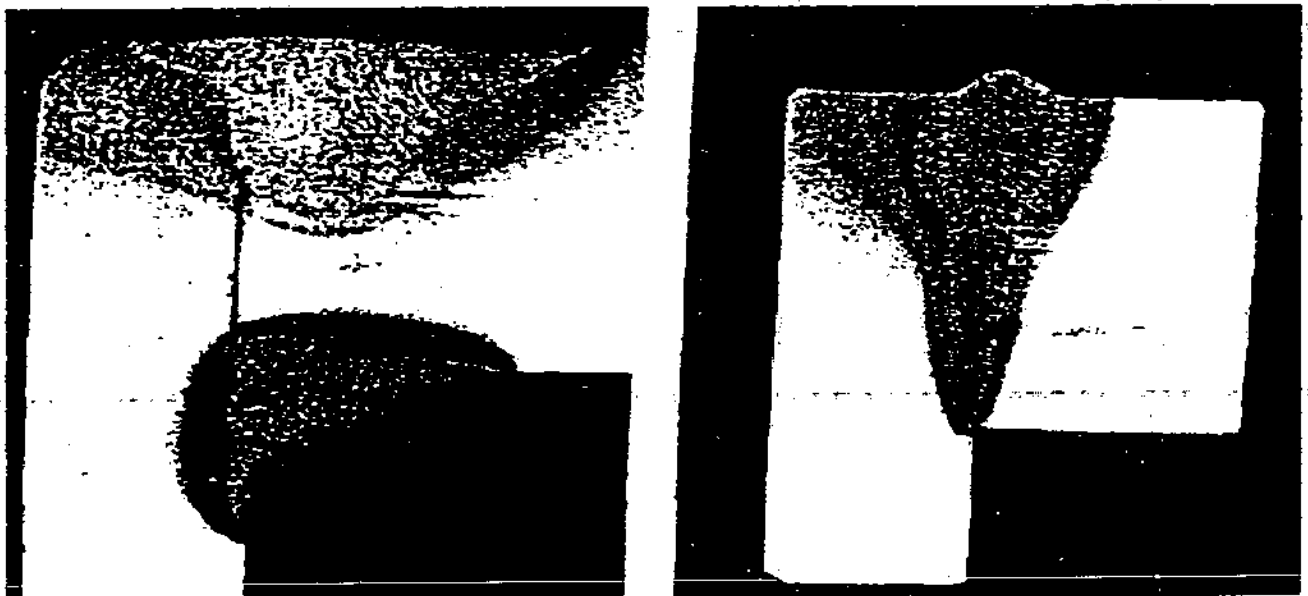
Επειδή η οπή της κόλλησης με laser μπορεί να επεκταθεί σε μια βαθιά στενή γραμμή μέσα στο υλικό, παρέχει και άλλα πλεονεκτήματα εκτός της συγκολλητικής ταχύτητας και της ελάχιστης παραμόρφωσης. Η ικανότητα βαθιάς διείσδυσης επιτρέπει να συγκολληθεί αρκετό στρώμα υλικού με ένα πέρασμα. Η τομή διαμέσου ενός χάλυβα με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα που είναι συγκολλημένος με 4 στρώσεις  $0,7 \text{ mm}$  πάχους, φαίνεται στο σχήμα 4.5.

Ένα άλλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η κόλληση μπορεί να τοποθετηθεί ακριβώς εκεί που απαιτείται π.χ. σε ένα ακριβό σημείο στηρίγματος. Αυτή η άποψη είναι ιδιαίτερως σημαντική, διότι η κόλληση που ενώνει 2 μέρη σε όλο το πάχος τους είναι πολύ ισχυρή στην κόπωση και στον εφελκυσμό, καθώς επιτρέπει στις γραμμές τάσεως να διαπεράσουν την ένωση ομαλά.

Σε μια ένωση με μερική διείσδυση, οι γραμμές της τάσεως κυρτώνουν στο πέρασμα τους από την ένωση, αυξάνοντας έτσι την συγκέντρωση των τάσεων που μειώνουν την αντοχή στην κόπωση, σχήμα 4.6. Η στενή κωνική ακτίνα laser όταν εστιάζεται προσφέρει ελαστική σχεδίαση. Έτσι υπάρχει πρόσβαση σε διαμορφώσεις κολλήσεων που δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν με άλλες τεχνικές, όπως συναρμογή στα άκρα μεταξύ γραναζιών. Η ικανότητα που προσφέρεται από την ακτίνα laser επιτρέπει να κατασκευαστούν εξαρτήματα όπου η πρόσβαση είναι εφικτή μόνο από τη μια



Σχήμα 4.5: Κατά μήκος διατομή μιας συγκόλλησης μεταξύ 4 χαλύβδινων ελασμάτων πάχους 0.7mm, που αποδεικνύει το πλεονέκτημα της συγκόλλησης με laser. Το μεγάλο βάθος διείσδυσης



Σχήμα 4.6: Παραδείγματα ενώσεων ενός χάλυβα από άνθρακα και μαγγάνιο πάχους 18mm από α) ηλεκτροσυγκόλληση, β) συγκόλληση με laser

πλευρά, όπως πίνακες που περιέχουν αυλακωτές μήτρες. Ακόμα πιο ελαστική κατεργασία πετυχαίνεται με μια όχι εστιασμένη ακτίνα laser, όπου μπορεί να μεταδοθεί μερικά μέτρα, χωρίς σοβαρή απώλεια ενέργειας. Ωστόσο, ορισμένα μηχανήματα μπορούν να διανείμουν το laser, προσφέροντας μεγαλύτερη παραγωγή ενός τεμαχίου ή μια σειρά από διαφορετικά τεμάχια. Τέλος, η ακτίνα laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ακανόνιστης μορφής κομμάτια, χρησιμοποιώντας robot.

### **Θέσεις συγκόλλησης**

Για την ασφάλεια του χειριστή, και για κάθε άλλο πρόσωπο, η μηχανή του laser πρέπει να έχει μηχανικό χειρισμό, αν απαιτείται η εργασία σε ένα ακίνητο κομμάτι. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξαρτήτως σε όλες τις κατευθύνσεις συγκόλλησης. Πάντως, αν χρησιμοποιηθεί ένα πλαίσιο άνευ κόστους στην έξοδο της μηχανής laser, είναι φυσιολογικός ο χειρισμός της μηχανής του laser σε οριζόντια θέση, για αποφυγή του «πιτσιλίσματος» της συγκόλλησης και της καταστροφής του οπτικού εστιασμού. Η ικανότητα να μετακινείται σε υψηλές θέσεις, οφείλεται στην υψηλή επιφανειακή τάση σε μια στενή συγκολλητική οπή και στην ταχύτητα κόλλησης, εμποδίζοντας το ρευστό μέταλλο να υποχωρήσει κάτω από την επήρεια της βαρύτητας. Για τον ίδιο λόγο, οι πίσω ράβδοι της συγκόλλησης δεν είναι απαραίτητες, όταν η συγκόλληση είναι στην κατακόρυφη θέση.

### **Υλικά**

Το laser μπορεί να κολλήσει σχεδόν τον ίδιο αριθμό υλικών, όπως κάθε άλλη τεχνική συγκόλλησης, ωστόσο ο χαλκός, το αλουμίνιο και τα παράγωγα τους παρουσιάζουν δυσκολίες. Αυτό κυρίως συμβαίνει διότι αυτά τα υλικά δεν προσροφούν εύκολα την ακτίνα laser, διότι είναι καλοί ανακλαστήρες. Στην πραγματικότητα ο χαλκός αντανακλά 10μm μήκους κύματος φως, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται και για laser καθρέπτης. Σαν γενικός οδηγός, η λιγότερη θερμική αγωγιμότητα ή η περισσότερη ηλεκτρική ειδική αντίσταση ενός υλικού, κάνουν το υλικό κατάλληλο να απορροφήσει το φως του laser. Οι βαθμοί συγκολλησιμότητας του χάλυβα και του ανοξειδωτού χάλυβα είναι ιδανικοί για τη συγκόλληση τους με laser.

### **Διαμορφώσεις των ενώσεων**

Η συγκόλληση με laser μπορεί να εφαρμοσθεί στις περισσότερες βασικές εφαρμογές (σχήμα 4.7). Από τις πιο συχνές διαμορφώσεις ενώσεων, οι δυο πιο δύσκολες για

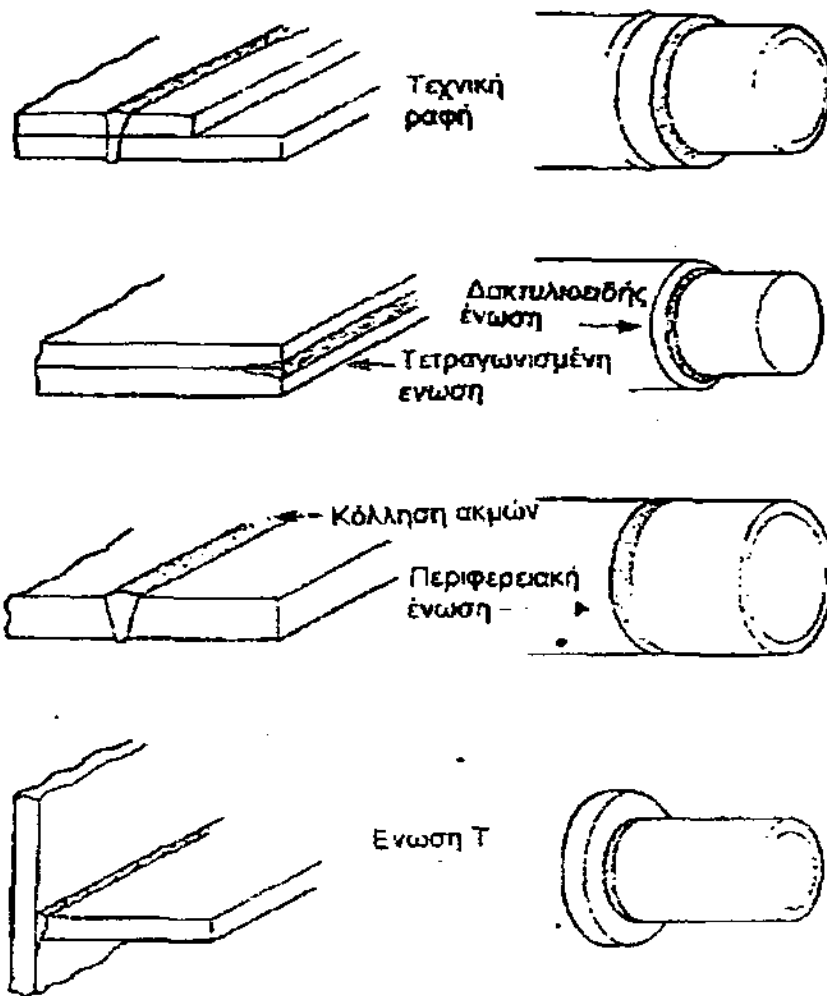
συγκόλληση με laser είναι μεταξύ δυο στερεών στρογγυλών ράβδων, και η ένωση T σε στρογγυλούς σωλήνες.

Στην ένωση μεταξύ στερεών ράβδων, η ταχύτητα συγκόλλησης μειώνεται καθώς η σπή πλησιάζει το κέντρο της ράβδου. Αυτό προκαλεί υπερβολική θερμότητα στο κέντρο της ένωσης και πιθανότητα καταστροφής του υλικού και του πορώδους της συγκόλλησης. Αυτού του είδους οι κολλήσεις είναι προτιμότερο να γίνονται με ηλεκτρικές συγκολλήσεις ή με τεχνικές συγκόλλησης με τριβή.

Η ένωση T σε στρογγυλούς σωλήνες, παρουσιάζει δυσκολίες στην εν μέρει εφαρμογή και παρακολούθηση της γραμμής ενώσεως. Στις μεγάλες κατασκευές το αποτέλεσμα είναι απίθανο να επιτευχθεί χωρίς robot. Πάντως και οι δυο δυσκολίες, μπορούν να ξεπεραστούν εύκολα, χρησιμοποιώντας βοήθεια από την τεχνική της ηλεκτροσυγκόλλησης και την προσθήκη υλικού σαν συμπλήρωση. Το παράδειγμα με τους σωλήνες, είναι χαρακτηριστικό για να καταλάβουμε την αξία :

- \* Του τύπου της ένωσης και
- \* Του μεγέθους του εξαρτήματος

Τα παραπάνω αποτελούν τις κυριότερες παραμέτρους για την επιλογή της τεχνικής της συγκόλλησης με laser. Επίσης είναι σημαντική η απόλυτη βεβαίωση, αν είναι δυνατόν, της πρακτικής, του κόστους και της δυνατότητας του χειρισμού του laser.



Σχήμα 4.7: Βασικές διαμορφώσεις ενώσεων που μπορούν να συγκολληθούν με laser.

#### 4.2.2 Μειονεκτήματα

Μέχρι τώρα, έχουν περιγραφεί τα χαρακτηριστικά που, κυρίως, παρουσιάζουν θετικά αποτελέσματα. Ωστόσο, όπως όλες οι άλλες τεχνικές, η συγκόλληση με laser έχει και μειονεκτήματα. Το εστιασμένο σημειακό μέγεθος μιας ακτίνας laser, που είναι ένα κλάσμα ενός χιλιοστού στη διάμετρο, απαιτεί κοντινές εφαρμοσμένες ενώσεις (εκτός αν πρόκειται για παράλληλες ενώσεις ή αν χρησιμοποιείται συρμάτινο παρέμβυσμα); διαφορετικά μια μεγάλη ποσότητα της ενέργειας της ακτίνας laser χάνεται μέσα από κάθε κενό μεταξύ των ενώσεων. Επίσης, επειδή το μήκος της ζώνης τήξεως που παράγεται είναι πολύ στενό, μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην ευθυγράμμιση της ακτίνας laser με τη γραμμή ενώσεως. Η καλή ποιότητα των διαστάσεων του κομματιού και ο καλός χειρισμός του εξοπλισμού που απαιτεί η ακτίνα laser, είναι πολύ σημαντικά για την συγκόλληση με laser. Αυτό είναι απαραίτητο όχι μόνο για την επιτυχία καλής ευθυγράμμισης ακτίνας και γραμμής ενώσεως, αλλά επίσης και

για τον έλεγχο της θέσεως εστίασης, της ταχύτητας συγκόλλησης και επιπλέον της ενέργειας που εισέρχεται στην εργασία. Οι δακτυλιοειδής και οι περιφερειακές ενώσεις, που μπορούν να περιστραφούν ομοκεντρικά με έναν άξονα περιστροφής, μπορούν να κολληθούν συνήθως με ένα απλό και όχι ακριβό εξοπλισμό. Αντίθετα, μεγάλες ευθείς ενώσεις, σε μεγάλα λεπτά ελάσματα, απαιτούν μεγάλη ακρίβεια στην ευθυγράμμιση και στα συστήματα σύσφιξης. Ομοίως, σε εξαρτήματα με ανώμαλες γραμμές ενώσεως, όπως οι ενώσεις T σε στρογγυλούς σωλήνες, απαιτούν μεγάλη ακρίβεια στην προπαρασκευή και έλεγχο με υπολογιστή στον εξοπλισμό με πολλαπλούς άξονες.

Οι συγκολλήσεις με laser ιδιαίτερα τα CO<sub>2</sub> laser δεν είναι φορητά, με την έννοια ότι μπορούν να τοποθετηθούν σε μια θέση. Μικρά laser έχουν τοποθετηθεί επί μονίμου βάσεως σε robot ή σε γερανοφόρα συστήματα, που τα μετατρέπουν σε ημιφορητά, αλλά αποτελούν ακόμα εργαστήρια ή μηχανές που βασίζονται στη γραμμή παραγωγής. Αυτό συμβαίνει κυρίως για 3 λόγους :

1) Τα laser πρέπει να στηρίζονται σε μια σταθερή βάση για να διατηρούν την οπτική ευθυγράμμιση των αντηχείων τους,

2) Για τον χειρισμό τους χρειάζονται υψηλή ηλεκτρική ισχύ και παροχή υψηλής ψύξεως με νερό.

3) Όλες οι περιπτώσεις εργασίας, προϋποθέτουν ειδική ασφάλεια προστασίας περικλείοντας με ασφαλή τρόπο την μηχανή του laser.

Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους συγκόλλησης, το laser με όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό του, είναι πολύ πιο ακριβό. Γενικά οι εκτιμήσεις είναι ότι το laser κοστίζει 50-200 φορές πιο ακριβά απ'ότι μια συμβατική βιομηχανική ηλεκτροσυγκόλληση, και χρειάζεται 100-750 φορές περισσότερη ηλεκτρική ισχύ. Ο χειρισμός του laser κοστίζει επίσης ακριβά, λόγω της φτωχής απόδοσης μετατροπής της ενέργειας (τυπικά 5-10%), σε σχέση με την ισχύ εισόδου που χρειάζεται για να το λειτουργήσει. Το απαιτούμενο μεγάλο κεφάλαιο και το κόστος χειρισμού είναι ορισμένες φορές αντιστάθμισμα στην πολύ υψηλή συγκολλητική παραγωγικότητα. Ωστόσο, για να κρατηθεί το κόστος παραγωγής χαμηλό, απαιτείται η πολύ συχνή χρήση του laser κατά περιόδους.

## **Διαλέγοντας τη συγκόλληση με laser**

Όποια τεχνική και αν χρησιμοποιηθεί για να κατασκευαστεί ένα προϊόν, πρέπει να προτιμηθεί προσεκτικά στο σχεδιαστικό στάδιο, για να εξαχθεί το περισσότερο όφελος. Αυτό, δυστυχώς, δεν είναι εύκολο να γίνει στην πράξη διότι πολλοί μηχανικοί δεν είναι εκπαιδευμένοι στην τεχνολογία της συγκόλλησης και δεν έχουν γνώση για τις πολλές και διαφορετικές μεθόδους συγκόλλησης. Ακόμα περισσότερο, κάθε τεχνική έχει ιδιότητες που την κάνουν ιδιαίτερα κατάλληλη για συγκεκριμένες συγκολλητικές εφαρμογές. Σε αυτό το κεφάλαιο, ελπίζουμε ότι ο αναγνώστης έχει κατανοήσει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της συγκόλλησης με laser και αναλόγως την περίπτωση θα επιλέξει την τεχνική που επιθυμεί.

Για μεγαλύτερη ευκολία στην επιλογή της συγκόλλησης με laser παραθέτουμε παρακάτω, στον πίνακα 4.1, τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου, με τα κύρια χαρακτηριστικά τους.

### **ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1**

#### **ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

##### **1. Βαθιές στενές ενώσεις.**

Με ένα πέρασμα το βάθος διείσδυσης της συγκόλλησης περιορίζεται μόνο από την ισχύ του laser (π.χ 10KW laser μπορεί να κολλήσει 15mm πάχος χάλυβα, με ένα πέρασμα). Αυτό μπορεί να εξαλείψει την ανάγκη για ετοιμασία των V ενώσεων και την προσθήκη παρεμβύσματος.

##### **2. Χαμηλή εσωτερική θερμότητα σε κάθε πλευρά του υλικού από το σημείο ενώσεως.**

Πολύ μικρή θερμική παραμόρφωση στο κομμάτι, δίνοντας τη δυνατότητα να κολληθούν μηχανικά μέρη, χωρίς την προσθήκη βοηθητικών συγκολλητικών μηχανημάτων.

Οι κολλήσεις μπορούν να γίνουν πολύ κοντά σε ευαίσθητα θερμικώς εξαρτήματα, όπως ηλεκτρονικά κυκλώματα κ.α.

Μεταλλουργικές καταστροφές (όπως ανεπιθύμητη ανάπτυξη κόκκων και παρατεινόμενη θερμική ανάπτυξη) μειώνονται σημαντικά.

##### **3. Πολύ υψηλή παραγωγή.**

Οι ταχύτητες συγκόλλησης είναι υψηλές και μπορούν να φτάσουν μέχρι και μέτρα το λεπτό.

Διάφοροι τύποι εργασίας μπορούν να μοιραστούν ένα laser.

Οι μηχανές συγκόλλησης με laser μπορούν εύκολα να αυτοματοποιηθούν και μπορούν εύκολα να προσαρμοσθούν σε robot.

Οι κολλήσεις μπορούν να εκτελεσθούν με την μηχανή του laser, σε όλες τις θέσεις, με την προϋπόθεση της προστασίας της οπτικής εστίασης, όταν η εργασία γίνεται μεταξύ της οριζόντιας και της κάθετης θέσης.



**4. Κολλήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν όπου η πρόσβαση είναι αδύνατη με άλλες τεχνικές και από τη μια πλευρά μόνο.**

Οι κολλήσεις συνήθως μπορούν να τοποθετηθούν ακριβώς στις ενώσεις, αυξάνοντας την αντοχή σε κόπωση και εφελκυσμό, σε σύγκριση με άλλες συμβατικές ενώσεις.

Πολλαπλές στρώσεις υλικού μπορούν να κολληθούν από τη μια πλευρά και με ένα μόνο πέρασμα.

Οι κολλήσεις μπορούν να γίνουν στη βάση στενών διακένων, όπου είναι απρόσβατες οι άλλες τεχνικές συγκόλλησης.

#### **5. Αυξάνονται οι ευκαιρίες σχεδίασης των εξαρτημάτων.**

Ένα μεγάλο εύρος από διαφορετικές διαμορφώσεις ενώσεων και ανομοίων παχών υλικών μπορούν να συγκολληθούν, αυξάνοντας τις σχεδιαστικές ευκαιρίες.

Μειώνονται οι συγκολλητικές επιφάνειες, με αποτέλεσμα την οικονομία υλικού.

### **ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

#### **1. Προϋπόθεση κοντινών και καλής σύσφιξης ενώσεων.**

Το μικρό εστιακό σημείο της ακτίνας laser περνάει μέσα από στενά κενά, ιδίως μέσα από λεπτά ελάσματα. Φτωχές ενώσεις παράγουν εγκοπές, εκτός αν χρησιμοποιηθεί παρέμβυσμα.

#### **2. Απαραίτητη ακριβής ευθυγράμμιση ακτίνας και ενώσεως.**

Η κόλληση μπορεί εύκολα να χάσει την γραμμή ενώσεως αν δεν τοποθετηθεί ακριβώς.

Το βάθος της εστίασης είναι μικρό και η θέση της στην επιφάνεια εργασίας πρέπει να διατηρηθεί ακριβώς, για να επιτυχανθεί η επιθυμητή ισχύς πυκνότητας.

#### **3. Απαιτείται η ακρίβεια στο χειρισμό της ακτίνας (και όλου του εξοπλισμού) για τον έλεγχο της εσωτερικής ενέργειας.**

Η εκτέλεση του χειρισμού του εξοπλισμού αφορά αποκλειστικά 2 άτομα.

#### **4. Οι μηχανές βασίζονται σε εργοστάσια.**

Είναι απαραίτητο, η μηχανή του laser να περικλειθεί με ασφαλή τρόπο, για την ασφάλεια του χειριστή. Αυτή η ενέργεια είναι δύσκολο να επιτυχανθεί.

Η οπτική σταθερότητα του αντηχείου και του συστήματος του laser (που μεταφέρει την ακτίνα laser στην εργασία) είναι υψίστης σημασίας για την εκτέλεση της συγκόλλησης. Επίσης, αυτά τα υλικά πρέπει να διατηρηθούν σε σταθερή βάση.

Τα ηλεκτρονικά συστήματα και η ψύξη με νερό που απαιτούνται, ειδικά για ένα υψηλής ισχύος CO<sub>2</sub> laser, δεν είναι φορητά.

## **5. Ο συνολικός εξοπλισμός και ο χειρισμός κοστίζουν ακριβά.**

Σε σύγκριση με τις μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης, το laser με όλο τον απαραίτητο και βοηθητικό εξοπλισμό είναι εξαιρετικά δαπανηρό, για τον χειρισμό του και την αγορά του.

### **4.3 Κατάλληλα υλικά για συγκόλληση με laser.**

Αυτή η παράγραφος περιγράφει τα υλικά που μπορούν να συγκολληθούν με laser, τα αποτελέσματα των κραματομένων στοιχείων και τις επιστρώσεις των επιφανειών στη συγκόλληση, με κοινά μηχανικά υλικά. Τέλος γίνεται αναφορά στα βασικά στοιχεία των μεταλλουργικών ελαττωμάτων και πως αυτά μπορούν να αποφευχθούν.

Η συγκόλληση με laser είναι συνήθως μιας υγρής μορφής διαδικασία συγκόλλησης, π.χ ενώνει μέταλλα ρευστοποιώντας το σημείο τομής τους και προκαλεί την μίξη του λιωμένου μετάλλου που στερεοποιείται με την κίνηση της πηγής θερμότητας του laser (τα μέταλλα μπορούν να συγκολληθούν χωρίς ρευστοποίηση με στερεάς μορφής συγκολλητικές τεχνικές, όπως συγκόλληση με θερμότητα από τριβή. Το laser μπορεί στη θεωρία να χρησιμοποιηθεί σαν πηγή θερμότητας για την κατασκευή στερεάς μορφής κολλήσεων, ωστόσο στη βιομηχανία δεν χρησιμοποιείται).

Τα πιο κατάλληλα μέταλλα για συγκόλληση με laser είναι αυτά που έχουν την ίδια ή μεγαλύτερη θερμοκρασία ρευστοποίησης και είναι διαλυτά το ένα στο άλλο, με την προϋπόθεση βέβαια ότι είναι καλοί απορροφητές του laser. Καθαρά μέταλλα που έχουν μια καθορισμένη θερμοκρασία ρευστοποίησης, μπορούν πολύ εύκολα να κολληθούν μεταξύ τους, αλλά όχι πάντα με άλλο καθαρό μέταλλο (πίνακας 4.II). Μπορούν όμως συχνά να κολληθούν με ένα κράμα που έχει σαν βάση το ίδιο στοιχείο μετάλλου, Στον πίνακα 4.III, δίνεται ένας γενικός οδηγός για τα υλικά που μπορούν να συγκολληθούν με laser.



### ΠΙΝΑΚΑΣ 4.III

#### ΟΔΗΓΟΣ ΓΙΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΘΟΥΝ ΜΕ LASER

ΥΛΙΚΑ	ΣΧΟΛΙΑ
Κράματα αλουμινίου	Φτωχή συγκολλητική ποιότητα και προσοχή στις εφαρμογές όπου χρειάζονται μεγάλη αξιοπιστία.
Χαλκός	Μόνο κατάλληλο για συγκόλληση με σημειακές εφαρμογές
Χυτοσίδηρος	Μπορεί να κολληθεί μόνο με παρέμβυσμα Νικελίου για να αποφύγουμε ραγίσματα.
Νικέλιο και κράματα νικελίου	Μερικά από αυτά τα υλικά συγκολλούνται πολύ καλά, όμως μερικά από αυτά παράγουν διαφορετικές ποιότητες συγκόλλησης. Ωστόσο, πρέπει να συμβουλευτεί ο κατασκευαστής του υλικού και να προσεχθούν οι ιδιότητες του υλικού. Σε κάποιες περιπτώσεις χρειάζεται παρέμβυσμα για να βελτιωθεί.

#### ΧΑΛΥΒΕΣ

Χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα	Πολύ καλή ποιότητα κόλλησης με την προϋπόθεση χαμηλών επιπέδων θείου και φωσφόρου.
Μέτρια και υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα	Καλή συγκολλησιμότητα, με την προϋπόθεση καλών προφυλάξεων για την διασφάλιση καλών συγκολλητικών ιδιοτήτων.
Κράματα χαλύβων	Έχουν πραγματοποιηθεί ικανοποιητικές laser κολλήσεις σε σωλήνες, πλοία κ.α. Η υψηλή συγκολλητική σκληρότητα μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα λόγω της γρήγορης ψύξεως.

#### ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Ωστενιτικοί	Πολύ καλή ποιότητα συγκόλλησης.
Φερίτικοί	Σε χαμηλά επίπεδα άνθρακα και χρωμίου έχουμε πολύ καλή κόλληση. Η κρυσταλλική τραχύτητα επηρεάζει τη συγκολλητική σκληρότητα.
Μαρτενσιτικοί	Οι κολλήσεις είναι σκληρές και εύθραυστες λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα.
Τιτάνιο και τα κράματα του	Καλή ποιότητα κόλλησης με θαυμάσια δομή των κόκκων, αλλά απαιτείται καθαρισμός του υλικού πριν τη συγκόλληση και υψηλής ποιότητας συγκολλητική ασπίδα (με «πισίνα» αερίων).

### 4.3.1 Συγκολλησιμότητα και στοιχεία κραμάτων

Η πρώτη σκέψη που γίνεται για ένα υλικό, είναι αν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του κατασκευαστή π.χ. αντοχή, σκληρότητα κ.α. Για να προσεγγιστούν οι απαιτήσεις του κατασκευαστή, το επιλεγμένο υλικό πρέπει να περιέχει διάφορα κραματικά υλικά, που θα επηρεάζουν την ποιότητα συγκόλλησης.

Επειδή ένα υλικό μπορεί να συγκολληθεί (με οποιαδήποτε μέθοδο), δε σημαίνει απαραίτητα ότι οι κολλήσεις είναι πάντα μηχανικά και μεταλλουργικά υγιείς. Οι συγκολλητικές ιδιότητες, η συγκολλητική μεταλλική δομή, η αντοχή, η σκληρότητα κ.α. εξαρτώνται από την αρχική μεταλλική σύνθεση και την θερμική συμπεριφορά, που οφείλονται στους συγκολλητικούς χειρισμούς. Η θερμική συμπεριφορά προκαλεί αλλαγές στη δομή του συγκολλητικού υλικού και μη αποδεκτές μεταλλουργικές καταστροφές στη καθαρή σύσταση του υλικού. Τα πιο ευπαθή υλικά είναι ο καθαρός χάλυβας και τα κράματα αλουμινίου. Ευτυχώς οι κατασκευαστές παρέχουν τη συγκολλητικότητα των υλικών τους και γενικότερα την χημική ανάλυση των κραματούχων στοιχείων. Η συγκολλησιμότητα και κάποια στοιχεία που επηρεάζουν την ποιότητα της συγκόλλησης θα περιγραφούν σε αυτό το κεφάλαιο, με περισσότερη αναφορά στον χάλυβα, αφού είναι το πιο συνηθισμένο υλικό.

#### Χάλυβας

Ένας γενικός οδηγός της συγκολλησιμότητας των κοινών τύπων χαλύβων δίνεται στον πίνακα 4.III και πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης με laser που εφαρμόζονται στα συστήματα σωλήνων στη ναυπηγική, και στους δομήσιμους χάλυβες, δίνονται στον πίνακα 4.IV.

Ο χάλυβος είναι καλός ανακλαστήρας του μήκους κύματος φωτός που προέρχεται από τα CO<sub>2</sub> laser και Nd:YAG. Ωστόσο η μορφή της συγκόλλησης και η ποιότητα της επηρεάζονται από τα επόμενα στοιχεία, που παρουσιάζονται σε μη αποδεκτά επίπεδα.

#### Οξυγόνο

Το οξυγόνο, είναι ένα στοιχείο που χρησιμοποιείται στην κατασκευή του χάλυβα και αν επιτραπεί να παραμείνει στον χάλυβα σε υψηλά επίπεδα, κατά την διάρκεια της συγκόλλησης, προκαλεί σπασίματα στο συγκολλημένο μέταλλο. Αντίθετα, αν η περιεκτικότητα σε οξυγόνο μειωθεί σε εξαιρετικά χαμηλό επίπεδο, τότε ο χάλυβας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συγκόλληση με laser, με πολύ καλή ποιότητα συγκόλλησης.

Ακολουθεί ο πίνακας 4.IV που βλέπουμε τις μηχανικές ιδιότητες διαφόρων κολλήσεων με laser στα δίκτυα σωληνώσεων ναυπηγική και δομικούς χάλυβες.

ΤΥΠΟΣ ΧΑΛΥΒΑ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΠΑΧΟΣ	ΙΣΧΥΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	ΜΟΝΟ/ ΔΙΠΛΟ ΠΕΡΑΣΜΑ	ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ	ΔΟΚΙΜΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ
		(mm)	(KW)	(m/min)			
X-80 πολικός σωλήνας	0.06C, 1.35Mn, 0.002S, 0.6Si, 0.065Al, 0.1Nd, 0.025Cr	13,2	12	0,64-0,76 1,5-1,65	ΜΟΝΟ ΔΙΠΛΟ	Αποτυχία στα βασικά μέταλλα	Μεγαλύτερη ενέργεια >358J. Μεταβατικό σημείο για μονό πέρασμα και -5°C για διπλό πέρασμα
HY-130 ναυπηγική (εμβαπτισμένος, ανοπτιμένος)	0.1C, 0.25Mn, 0.4Mo, 0.07V, 5.5Ni, 0.5Cr	6,4	5	0,5-1,14	ΜΟΝΟ	Αποτυχία στα βασικά μέταλλα	Περισσότερη ενέργεια στην απορρόφηση του συγκολλητού μετάλλου απ'ότι στα βασικά μέταλλα σε διαφορετικές θερμοκρασίες
X-60 σωλήνας	Διάφορη, αλλά συνήθως 0.15C , 1.35Mn, 0.0015S, 0.1Si, 0.015Al, 0.03Nb	12 18 20	10-5 12-14 12-14	0,7-1,32/- 1,77-1,14 0,76-0,88	ΜΟΝΟ/ΔΙΠΛΟ ΔΙΠΛΟ ΔΙΠΛΟ	Αποτυχία στα βασικά μέταλλα	Ψηλότερη ενέργεια απ'ότι στα βασικά μέταλλα. Μεταβατικό σημείο στους -20°C
HY-130 ναυπηγική (εμβαπτισμένος, ανοπτιμένος)	0.11C, 0.8Mn, 0.55Mo, 0.07V, 4.7Ni, 0.6Cr	6,35 12,7	8-12 8-12	1,38-1,5 0,76-1	ΜΟΝΟ ΜΟΝΟ	Αποτυχία στα βασικά μέταλλα	Θραύση στο βασικό μέταλλο, προσροφείσα ενέργεια 518J, 1030J
HY-130 ναυπηγική (εμβαπτισμένος, ανοπτιμένος)	0.11C, 0.8Mn, 0.55Mo, 5Ni, 0.55Cr	12	11	0,75	ΜΟΝΟ		Μεταβατικό σημείο στους -18°C 707J απορροφείσα ενέργεια
BS 1501:271 Βαθμός W30	0.12C, 1.49Mn, 0.025S, 0.29Si, 0.01Nb, 0.46Cr 0.24Ni, 0.25Mo 0.11V, 0.026P	6	5	0,96	ΜΟΝΟ	Αποτυχία στα βασικά μέταλλα	Όχι δοκιμασμένο
HY-80 ναυπηγική (εμβαπτισμένος, ανοπτιμένος)	0.18C, 0.45 Mo, 1.68Cr	12	10,6	0,75	ΜΟΝΟ	-----	76J απορροφημένη ενέργεια
Βαθμοί A-B-C ναυπηγική	0.23max C, 0.6-1.03Mn	9,5 28,6	5,5 12,8	----- -----	ΚΑΙ ΤΑ ΔΥΟ	Αποτυχία στα βασικά μέταλλα	Απορροφημένη ενέργεια στους -15°C στο ποσό 11-49J
BS-4360	Διάφορη σύσταση από C, Mn, Si, Al, Nb	12,5	5,2-9	0,18-1,5	ΜΟΝΟ	-----	Απορροφημένη ενέργεια στους -40°C στο ποσό 27J

## Άνθρακας

Ο άνθρακας συνήθως κραματώνεται με σίδηρο για να αυξηθεί η σκληρότητα και η αντοχή, και το επίπεδο του άνθρακα εξαρτάται από τη δυναμική εφαρμογή του χάλυβα. Όσο η περιεκτικότητα του άνθρακα σε διαφορετικούς χάλυβες αυξάνει, τόσο τα δυναμικά προβλήματα επηρεάζουν δυσμενώς την ποιότητα της συγκόλλησης και, γενικότερα, τις απαιτούμενες εφαρμογές. Οι χάλυβες που έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα κάτω του 0,1%, παράγουν καλής ποιότητας συγκόλληση και αξιόπιστη συγκολλητική εμφάνιση, εκτός βέβαια αν παρουσιαστούν άλλα μη επιθυμητά στοιχεία. Οι συγκολλήσεις σε αυτούς τους χάλυβες παρουσιάζονται αρκετά σκληρές. Αυτό συμβαίνει διότι η γρήγορη συγκολλητική ταχύτητα προκαλεί υψηλό βαθμό ψύξεως που δεν επιτρέπει την ελάχιστη μετατροπή της σκληρότητας (θερμική συμπεριφορά).

Το σχήμα 4.8 δείχνει το αρχικό μέταλλο, την επηρεασμένη θερμική ζώνη και τη σκληρότητα του συγκολλημένου μετάλλου σε μια συγκόλληση με laser δυο ελασμάτων πάχους 0,7mm, 0,4% περιεκτικότητα σε C μετά την συγκόλληση, με ταχύτητα 6,5m/min και χρησιμοποιώντας CO<sub>2</sub> laser ισχύος 5 KW. Η σκληρότητα του αρχικού μετάλλου είναι μικρότερη των 150Hv, ενώ το συγκολλημένο μέταλλο έχει διπλάσια τιμή. Τέτοιες στενές και «σκληρές» ενώσεις, όταν εκτελούνται με τόση χαμηλή περιεκτικότητα σε C, παρουσιάζουν πολύ καλή ελατότητα και ολκιμότητα.

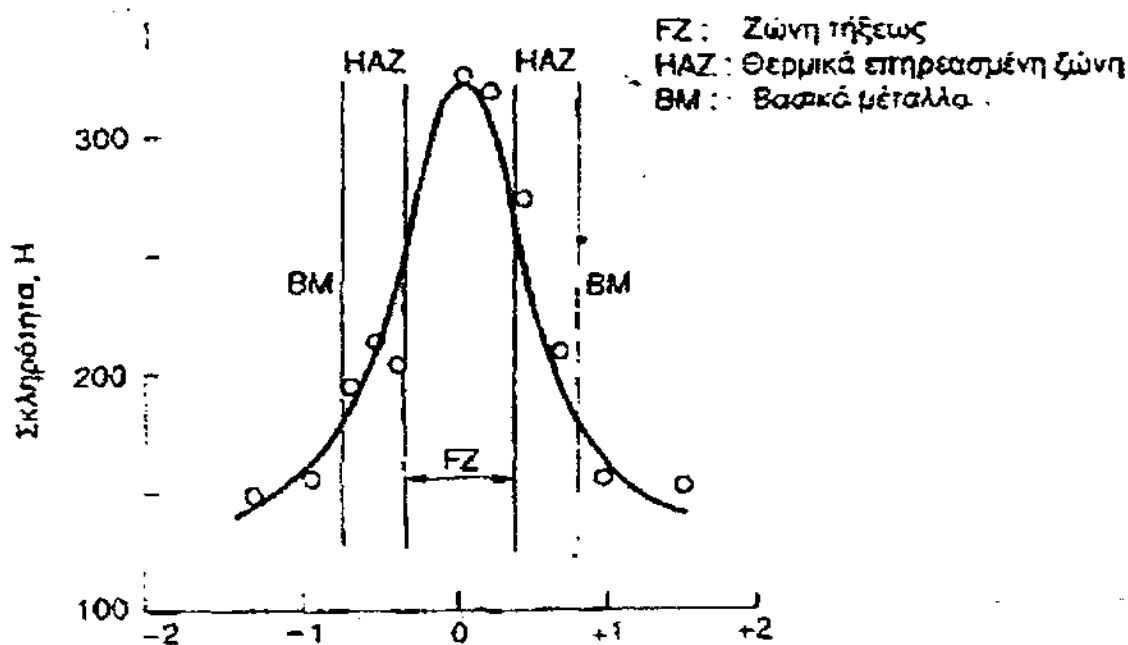
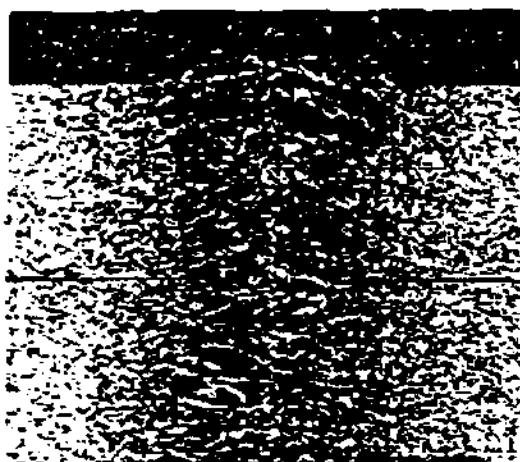
Σε χάλυβες που η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι πάνω από 0,1%, η γρήγορη και σε μεγάλο βαθμό ψύξη, παράγει μια μικρή δομή μαρτενσίτη, μια σκληρή και εύθραυστη φάση, που προκαλεί μείωση στην σκληρότητα και στην ελατότητα. Ο πολύ σκληρός μαρτενσίτης προκαλεί ρήγμα στο συγκολλημένο μέταλλο. Αυτό το ρήγμα μεταδίδεται στα επόμενα στάδια λειτουργίας.

Εκτός όμως από αυτό το μειονέκτημα, γενικά η συγκόλληση με laser πραγματοποιείται σε χάλυβες με C άνω του 0,3%. Ωστόσο, η προσεκτική σχεδίαση και η συγκολλητική διαδικασία είναι βασικοί παράγοντες για να μειωθούν οι θραύσεις και να διασφαλιστούν οι απαιτήσεις των εφαρμογών.

Παρόλα αυτά, η περιεκτικότητα σε C, αν και αποτελεί το κυριώτερο συστατικό, δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας που επηρεάζει την σκληρότητα της συγκόλλησης. Την επηρεάζουν και άλλα στοιχεία, όπως το μαγγάνιο, το χρώμιο, το μολυβδαίνιο το βανάδιο και ο χαλκός. Για να προσεγγιστούν τα ποσοστά αυτών των στοιχείων που επηρεάζουν τα προβλήματα με την σκληρότητα (όπως στερεοποίηση, ρωγμές κ.α.) έχει αναπτυχθεί μια φόρμουλα για το ισοδύναμο C, που δίνεται από τον τύπο

$$CE=C\%+Mn\%/6+(Cr\%+Mo\%+V\%)/5+(Ni\%+Cu\%)/15$$

Αν το CE είναι λιγότερο του 0.40, τότε ο χάλυβας είναι έτοιμος για συγκόλληση, ενώ αν υπερβεί αυτό το όριο, είναι απαραίτητες κάποιες προφυλάξεις, όπως ο προσεκτικός έλεγχος της εσωτερικής συγκολλητικής ενέργειας, ή η προθέρμανση για την ελαχιστοποίηση πιθανών συγκολλητικών ελαττωμάτων.



Σχήμα 4.8 Τομή κατά μήκος μιας συγκόλλησης με laser μεταξύ δύο ελασμάτων πάχους 0,7mm με 0,04% σε C, και το διάγραμμα σκληρότητας σε όλη την συγκόλληση. Αυτό δείχνει την υψηλή σκληρότητα που παράγεται όταν συγκολλούμε με laser χάλυβες με χαμηλό ποσοστό σε C.



## **Θείο και φώσφορος**

Το θείο και ο φώσφορος παρουσιάζονται σαν υπολειπόμενα στοιχεία στην κατασκευή του χάλυβα και τα επίπεδα τους καθορίζονται από τις ανάγκες της διαδικασίας και τον ειδικό τύπο του χάλυβα. Δυστυχώς, πολύ μικρά ποσοστά αυτών των υλικών μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ρωγμές στη στερεοποίηση, και γι'αυτό τα ποσοστά τους πρέπει να κρατηθούν όσο χαμηλά γίνεται για την ομαλή συγκόλληση του χάλυβα. Όταν συγκολλούνται ενώσεις με χαμηλή μηχανική πάκτωση, με ισχυρή διείσδυση των ενώσεων σε μικρά ελάσματα όπου οι συγκολλημένες επιφάνειες πιέζονται μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, συνδυάζοντας το επίπεδο της περιεκτικότητας του θείου και του φωσφόρου να κυμαίνεται στο 0.04%, μπορεί να αποφευχθεί η παρουσία ρωγμών.

Οι ρωγμές στερεοποίησης, προκαλούνται κάτω από την επήρεια υψηλής τάσης συγκολλητικής συστολής κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης και ψύξεως. Οι τάσεις συστολής σε μερική διείσδυση της κόλλησης σε λεπτές διατομές μπορούν να μειωθούν σε ορισμένες περιπτώσεις, δίνοντας προσοχή στη σχεδίαση της ένωσης.

## **Ανοξειδωτος χάλυβας**

Εκτός από τα ειδικά κράματα, οι ανοξειδωτοι χάλυβες διαιρούνται σε 3 βασικούς τύπους τους ωστενιτικούς, τους φερριτικούς και τους μαρτενσιτικούς. Και οι τρεις μπορούν να συγκολληθούν με laser, αλλά η ποιότητα της αυτογενούς συγκόλλησης (συγκολλήσεις που γίνονται χωρίς την προσθήκη παρεμβύσματος, που επιλέγεται για τη διαμόρφωση του συγκολλημένου μετάλλου) αυξάνει. Οι τρεις τύποι παρουσιάζονται και περιγράφονται παρακάτω.

## **Ωστενιτικός ανοξειδωτος χάλυβας**

Ο ωστενιτικός ανοξειδωτος χάλυβας είναι ιδανικά κατάλληλος για συγκόλληση με laser, με εξαίρεση αυτόν που περιέχει πρόσθετα θείου και φωσφόρου. Ο ωστενιτικός χάλυβας έχει θερμική αγωγιμότητα της τάξεως του ενός τρίτου από τον κοινό ανθρακούχο χάλυβα, και είναι πολύ καλός απορροφητήρας του laser φωτός. Κατά συνέπεια μπορούν να επιτευχθούν μεγαλύτερα βάθη διείσδυσης της κόλλησης απ'ότι με τους κοινούς χάλυβες, για κάποιες συγκεκριμένες συνθήκες συγκόλλησης.

Εκτός όμως από την άνεση της συγκόλλησης, ένας από τους λόγους που οι ωστενιτικοί χάλυβες είναι οι πλέον κατάλληλοι για laser συγκόλληση, είναι ότι η χαμηλή εσωτερική θερμότητα και οι υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης δεν επιτρέπουν μεταλλουργικές καταστροφές που εξασθενούν την οξειδωτική αντίσταση του συγκολλημένου μετάλλου. Αν οι ωστενιτικοί χάλυβες κρατούνται σε μια παρατεταμένη περίοδο από τους 450°C ως 870°C, τα καρβίδια πλούσια σε χρώμιο αρχίζουν να κατακρημνίζουν τα όρια των κόκκων, και αυτό μειώνει την οξειδωτική αντίσταση. Αυτό το φαινόμενο είναι πολύ συχνό, όταν χρησιμοποιείται υψηλή εσωτερική ενέργεια στις τεχνικές συγκόλλησης.

Άλλο πλεονέκτημα της συγκόλλησης με laser στους ωστενιτικούς χάλυβες είναι η πολύ μικρή στρέβλωση, παραγόμενη από την μικρή εσωτερική ενέργεια και τη μορφή συγκόλλησης με laser. Ο ωστενίτης έχει 50% μεγαλύτερη θερμική διαστολή απ'ότι ο κοινός χάλυβας και συνδυάζοντας τον με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, έχει την τάση για μια άνιση διαστολή και στρέβλωση, όταν συγκολλείται με ηλεκτροσυγκόλληση με υψηλή εσωτερική θερμοκρασία. Παρ'όλα αυτά, η μερική διείσδυση της κόλλησης με laser, σε ενώσεις με λεπτές διατομές, πρέπει να αποφεύγεται, διότι είναι πιθανές οι ρωγμές από την στερεοποίηση. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι το μη συγκολλημένο τμήμα της ένωσης αντιστέκεται στην υψηλή πίεση συστολής, καθώς η συγκόλληση ψύχεται. Τέλος η απουσία του οξυγόνου και της υγρασίας εισέρχονται στη μη συγκολλημένη περιοχή με την μερική διείσδυση στις ενώσεις, προκαλώντας τριχοειδή διάβρωση που διεισδύει το συγκολλημένο μέταλλο και προκαλεί μεταγενέστερη συγκολλητική αποτυχία.

### **Φερίτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες**

Οι φερίτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες δεν έχουν την τόσο καλή συγκολλησιμότητα των ωστενιτικών χαλύβων, αλλά δεν υπάρχει κανένας απολύτως λόγος να μην συγκολληθούν με laser. Οι φερίτικοί χάλυβες βαθμού 430, 434 και 409 έχουν ίσως τις καλύτερες συγκολλητικές αποδόσεις λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και χρώμιο.

Οι συγκολλήσεις φερίτικών χαλύβων σε μερικές περιπτώσεις εξασθενούν την σκληρότητα της ένωσης και την οξειδωτική αντίσταση. Η μείωση της σκληρότητας οφείλεται εν μέρει στη μορφή των κόκκων στη θερμική ζώνη επηρεασμού που είναι κακής ποιότητας και στην μορφή του μαρτενσίτη που προκαλεί την υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Η χαμηλή εσωτερική θερμότητα της συγκόλλησης με laser μειώνει την τραχύτητα των κόκκων στη ζώνη θερμικής επίδρασης, όταν συγκρίνεται με την υψηλή εσωτερική θερμότητα άλλων τεχνικών συγκόλλησης. Παρ'όλα αυτά, η ζώνη θερμικής επίδρασης μπορεί να έχει μεγαλύτερη σκληρότητα λόγω της γρήγορης ψύξεως.

## Μαρτενσιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες

Οι μαρτενσιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες παράγουν χειρότερης ποιότητας συγκόλληση από τους αντίστοιχους φερίτικούς και ωστενιτικούς. Το υψηλό ποσοστό του άνθρακα παράγει πολύ σκληρή και εύθραυστη ζώνη θερμικής επίδρασης και συγκόλληση, λόγω της μορφής του μαρτενσίτη. Αν η περιεκτικότητα σε C ξεπεράσει το 0,1%, τότε για να πραγματοποιηθεί η συγκόλληση, χρειάζεται ένα ωστενιτικό παρέμβυσμα για να βελτιωθεί η σκληρότητα της κόλλησης και για να αποφευχθεί το συγκολλητικό ραγίσμα. Πάντως αυτό δεν μειώνει την ευθραυστότητα στη ζώνη θερμικής επίδρασης. Πρακτικά, τα ραγίσματα και η ευθραυστότητα μπορούν να μειωθούν με προθέρμανση στους 350°C (πάντα με περιεκτικότητα του C άνω του 0,1%) και εμβάπτιση του χάλυβα στους 650°C-750°C.

## Αλουμίνιο

Το αλουμίνιο και τα κράματα του είναι εξαιρετικά δύσκολο να συγκολληθούν με laser και να επιτυχανθούν καλές συγκολλητικές ιδιότητες. Επειδή το στοιχείο αυτό αποτελεί το κυριότερο μηχανικό υλικό, εξηγήσεις παρουσιάζονται παρακάτω.

Το αλουμίνιο απορροφά πολύ δύσκολα το φως του laser, έχει επίσης υψηλή θερμική αγωγιμότητα και πολύ χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ υγροποίησης και στερεοποίησης και όταν υγροποιείται, το ιξώδες του είναι πολύ χαμηλό. Όλοι αυτοί οι λόγοι συνεισφέρουν στην άσχημη εκτέλεση και μορφή της laser συγκόλλησης. Κατά συνέπεια, η συγκόλληση με laser στο αλουμίνιο και τα κράματα του, είναι δύσκολη και η ποιότητα της συγκόλλησης πολύ κακή. Οι φυσαλλίδες, η πορώδης κατάσταση, οι ρωγμές κατά τη στερεοποίηση της κόλλησης και η απώλεια των στοιχείων των κραμάτων (λόγω εξάτμισης), είναι τα κυριότερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Η υψηλής ισχύος πυκνότητα του laser είναι απαραίτητη για την κατασκευή της οπής κόλλησης στο αλουμίνιο (έχουν γίνει πειράματα με μαύρες επικαλύψεις για την αύξηση της απορρόφησης της ακτίνας, αλλά αυτό δεν είναι πρακτικό στην παραγωγή, διότι αυτές οι επικαλύψεις «μολύνουν» την συγκόλληση και δεν είναι απαραίτητες εφόσον η οπή έχει διαμορφωθεί. Συνήθως, καθώς η οπή έχει διαμορφωθεί και ένα μικρό μήκος της κόλλησης έχει πραγματοποιηθεί, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα του υλικού, προκαλεί γρήγορη αύξηση της θερμοκρασίας μπροστά στην οπή. Το θερμό υλικό μπροστά από την ακτίνα, αυξάνει αρκετά την απορρόφηση του laser φωτός, με αποτέλεσμα την μεταβίβαση υψηλής ενέργειας στη συγκόλληση και προκαλώντας «εκδίωξη» του ρευστού μετάλλου, αφήνοντας φυσαλλίδες στην επιφάνεια της κόλλησης.

Ένα άλλο πρόβλημα που επηρεάζει δυσμενώς τη συγκόλληση σε αλουμίνιο και τα κράματα του, είναι τα οξειδία και η μόλυνση της επιφάνειας του υλικού. Η υγρασία των οξειδίων και της ατμόσφαιρας- παράγει υδρογόνο που εισχωρεί στην κόλληση και προκαλεί την πορώδη κατάσταση. Το υδρογόνο είναι εξαιρετικά ευδιάλυτο στο αλουμίνιο και είναι υπεύθυνο για την πορώδη κατάσταση στις συγκολλήσεις με αλουμίνιο.

Εκτός από τα παραπάνω μειονεκτήματα, η ραφή στις ενώσεις με laser, φτιάχνεται κατά την κατασκευή μιας κυλινδρικής διατομής, χρησιμοποιώντας διπλά γυάλινα διαχωριστικά τεμάχια.

Γενικά το αλουμίνιο και τα κράματα του είναι ακατάλληλα για συγκόλληση με laser, και χρειάζεται περισσότερη έρευνα για να ανατραπεί αυτή η κατάσταση. Για την επιτυχία μεγαλύτερης ακριβείας στην ποιότητα της κόλλησης σε αυτά τα υλικά, η κόλληση με ακτίνες ηλεκτρονίων είναι η πλέον κατάλληλη τεχνική.

## **Χαλκός**

Γενικά, στα CO<sub>2</sub> laser, η συγκόλληση του χαλκού δεν ενδείκνυται. Ο χαλκός είναι πολύ καλός ανακλαστήρας του laser φωτός. Υψηλοί γυαλισμένοι καθρέπτες από χαλκό χρησιμοποιούνται στα CO<sub>2</sub> laser, για την μετάδοση του laser φωτός μέσα από το ίδιο το laser, και μεταξύ του laser και της εργασίας του. Παρ'όλα αυτά πρέπει να σημειωθεί ότι σημειακές και ραφειακές κολλήσεις μπορούν να είναι επιτυχής μεταξύ λεπτών χάλκινων φύλλων μετάλλου (μικρότερου του 1mm πάχους) και κάποιων ορισμένων υλικών, χρησιμοποιώντας Nd:YAG laser. Για πολύ μικρές παραμορφώσεις της συγκόλλησης του χαλκού, ειδικά όπου απαιτούνται βαθιές κολλήσεις, συνίσταται η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων.

### **4.3.2 Επιδράσεις των επιφανειακών επιστρώσεων στη συγκολλησιμότητα των μετάλλων.**

#### **Επιφανειακή επίστρωση**

Οι επιφανειακές επικαλύψεις χρησιμοποιούνται ευρύτατα στους χάλυβες για να διασφαλιστεί η οξειδωτική αντίσταση, και μερικές φορές η καλή επιφανειακή εμφάνιση. Όταν οι επικαλύψεις χρησιμοποιούνται σε συγκολλητικές κατασκευές, πρέπει να αποφασιστεί αν θα χρησιμοποιηθούν πριν ή μετά την κατασκευή. Μερικές φορές δεν είναι πρακτική η χρήση της επικάλυψης μετά την κατασκευή, διότι το προϊόν είναι πολύ μεγάλο ή επειδή το υλικό

επικάλυψης δεν διαπερνάει τις ρωγμές, όπου η προστασία στην οξείδωση είναι ζωτικής σημασίας, όπως στις ενώσεις στα σώματα οχημάτων. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι απαραίτητο η συγκόλληση να γίνεται παρουσία των επικαλύψεων. Δυστυχώς, κάποιες επιφανειακές επικαλύψεις προκαλούν μη επιθυμές αντιδράσεις στο συγκολλημένο μέταλλο, που μειώνουν την αντοχή του μετάλλου και την απορροφητικότητα της ακτίνας laser. Αυτές οι ενώσεις, όπου η επικάλυψη υπάρχει κατά μήκος των επιφανειών που θα ενωθούν, είναι πιο επιρρεπείς στα προβλήματα μορφής της συγκόλλησης απ'ότι στις ίδιες τις κολλήσεις.

### **Γαλβανισμένος και εμβαπτισμένος ψευδάργυρος**

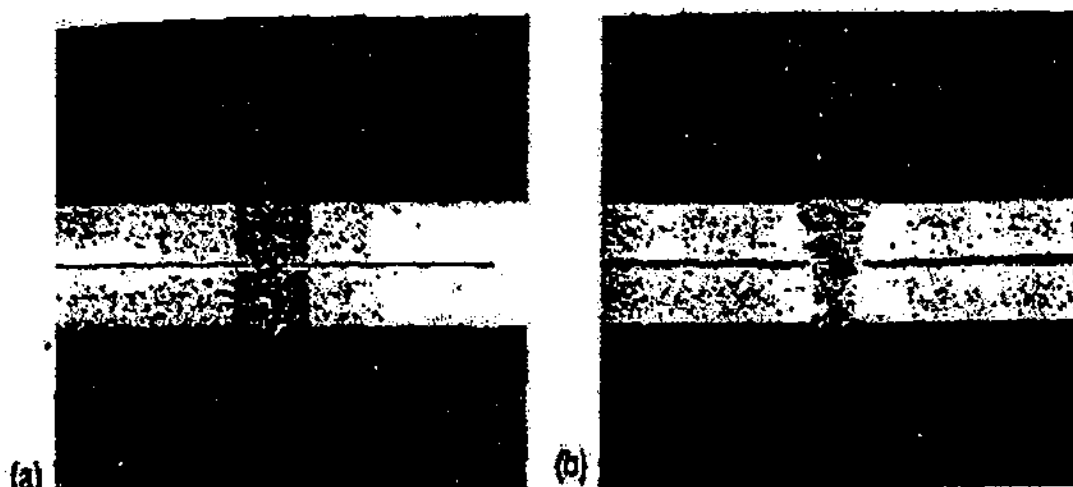
Η συγκόλληση με laser σε λεπτού πάχους χαλύβδινα μέταλλα (0,8-1,5mm) επιστρωμένα με ψευδάργυρο, είναι αρκετά διαδεδομένη στις κατασκευές του αγροτικού εξοπλισμού, στα σώματα οχημάτων, στα αυτοκινητούμενα προϊόντα και στις οικιακές συσκευές. Ωστόσο η επιτυχής εφαρμογή, εξαρτάται από το πάχος της επικάλυψης, την ομοιομορφία της και κυρίως την διαμόρφωση της ένωσης.

Οι ενώσεις, όπου η επικάλυψη με ψευδάργυρο δεν υπάρχει στην επιφάνεια κόλλησης, συνήθως δεν παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα στην συγκόλληση με laser.

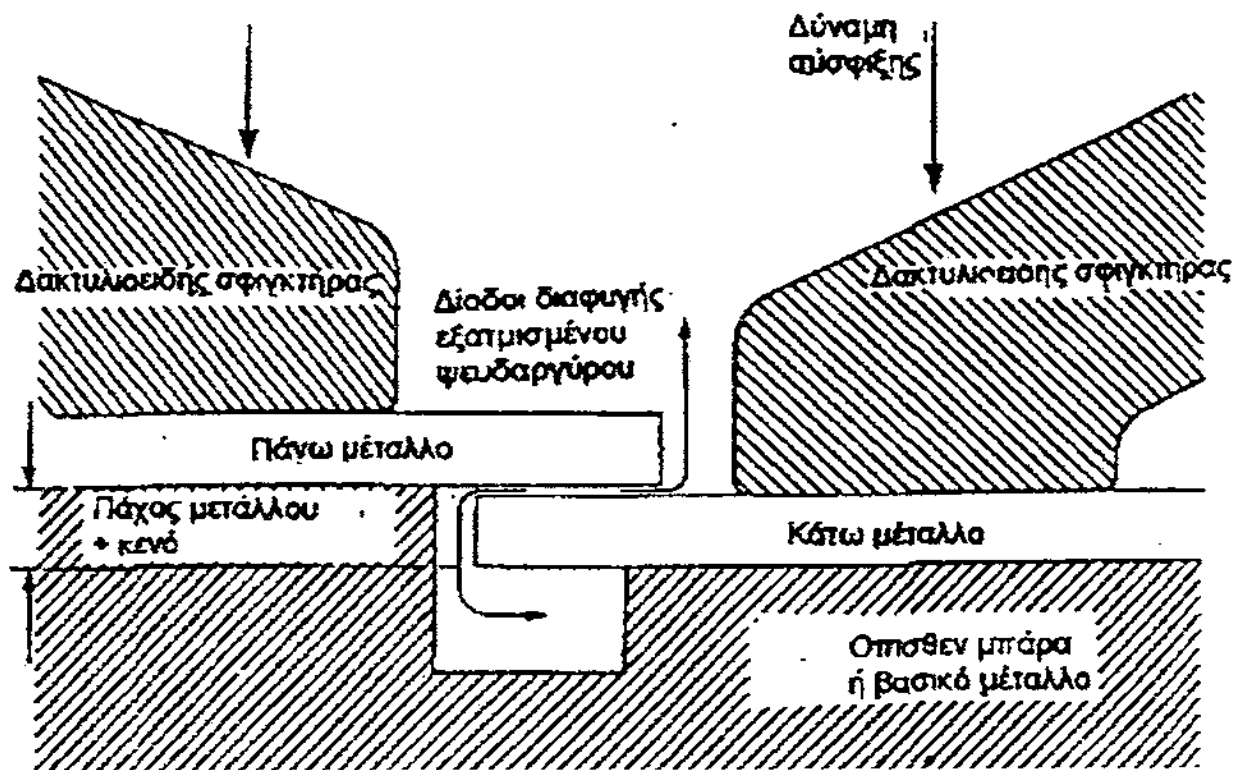
Σαν παράδειγμα, ενώσεις σε 2m μήκος, μεταξύ ελασμάτων πάχους 0.75mm με επιφανειακή κάλυψη ψευδάργυρο περίπου 20μm, πραγματοποιούνται από την εταιρεία Thyssen Stahl, για λογαριασμό της Audi. Οι περισσότερες επικαλύψεις ψευδαργύρου στο εύρος των συγκολλήσεων, συνήθως μια ταινία 1-1,5 mm σε μήκος, εξατμίζεται και δεν φαίνεται να διαπερνά και να επηρεάζει αρνητικά το συγκολλημένο μέταλλο. Τα τεστ του Erichsen στις συγκολλημένες ενώσεις, δείχνουν την ικανότητα της μορφής 10% πιο χαμηλή από το ίδιο το μέταλλο (χωρίς επικάλυψη). (Το πείραμα του Erichsen περιλαμβάνει ένα ημισφαιρικό έμβολο που πιέζει ένα κομμάτι ελάσματος, ώσπου το έλασμα να σπάσει. Το βάθος της καθίζησης μετά μετρείται).

Σε ενώσεις μεταξύ μονόπλευρων χαλύβδινων ελασμάτων επικαλυμμένα με ψευδάργυρο, όπου οι επικαλύψεις είναι στην εξωτερική πλευρά, οι συγκολλήσεις είναι όμοιες με τις συναρμογές στα άκρα. Όμως, όταν οι επικαλύψεις είναι στην επιφάνεια ενώσεως, υπάρχουν σοβαρά προβλήματα που επηρεάζουν την μορφή της συγκόλλησης. Ο ψευδάργυρος βράζει στους 900°C και ο χάλυβας λιώνει κοντά στους 1500°C, κατά συνέπεια, κοντά σε σημειακές ενώσεις, ο ψευδάργυρος στην επιφάνεια ένωσης εξατμίζεται και αρχίζει να πιέζει, προτού σχηματιστεί η σπή συγκόλλησης. Καθώς η σπή σχηματίζεται, φυσαλλίδες από τον εξατμισμένο ψευδάργυρο προσπαθούν να διαφύγουν μέσα από αυτή.

Αν τα πάχη των συνδυασμένων επικαλύψεων στην επιφάνεια κόλλησης είναι μικρότερα των 15μm και το πάχος του ελάσματος μεγαλύτερο των 0.8mm (κρατώντας το λόγο ψευδαργύρου / μετάλλου χαμηλό), οι αέριες φυσαλλίδες συνήθως διαφεύγουν πριν κλείσει η σπή και πριν επιτευχθεί η στερεοποίηση. Οι «εγκλωβισμένες» φυσαλλίδες είναι συνήθως πολύ μικρές και καλά διασκορπισμένες κατά το μήκος της συγκόλλησης. Τα πάχη επικάλυψης άνω των 15μm μεταξύ των σημειακών ενώσεων, προκαλούν μεγάλο όγκο εξατμισμένου ψευδαργύρου, που δεν μπορεί να διαφύγει όλος, πριν κλείσει η σπή. Στην πραγματικότητα, η πίεση που αναπτύσσεται από τις αέριες φυσαλλίδες προκαλεί «έκρηξη» του ρευστού υλικού πριν στερεοποιηθεί. Το σχήμα 4.9 δείχνει τις τομές των συγκολλημένων ενώσεων μεταξύ ελασμάτων με διπλή επίστρωση ψευδαργύρου πάχους 0,8mm και 12μm, και η διαφορά στην μορφή των συγκολλήσεων είναι εμφανής.



Σχήμα 4.9 κατά μήκος τομές δύο μεταλλικών ελασμάτων πάχους 0,7mm που έχουν κολληθεί με CO<sub>2</sub> laser, επικαλυμμένοι με διπλής όψεως ψευδάργυρο πάχους α) 8μm και β) 12μm. Φαίνεται καθαρά η επίρρηση του πάχους του ψευδάργυρου στη μορφή της συγκόλλησης.



Σχήμα 4.10: Μέγεθος για να πετύχουμε κενό μεταξύ των επιφανειών ενώσεως, όταν συγκολλούμε χάλυβες με επικάλυψη ψευδαργύρου.

Μειώνοντας την ταχύτητα συγκόλλησης, δεν λύνεται το πρόβλημα της εξατμίσσης του ψευδαργύρου, διότι μεταδίδεται μεγαλύτερη θερμοκρασία στην εργασία και αυτό εξατμίζει περισσότερο ψευδάργυρο σε μεγαλύτερη περιοχή. Βελτιώσεις μπορούν να επιτευχθούν με την παλμική ακτίνα laser. Με αυτό τον τρόπο, οι μικρής διάρκειας παλμοί (0.5ms σε 200Hz) ελαχιστοποιούν την επιφάνεια που εξατμίζεται ο ψευδάργυρος και μειώνουν τον όγκο για την εξαγωγή από την οπή. Η νέας γενιάς υψηλής ισχύος (μεγαλύτερη του 1KW) Nd:YAG laser είναι ικανά να ικανοποιήσουν αυτές τις ανάγκες, αφού μπορούν να διοχετεύσουν τους απαραίτητους παλμούς υψηλής ενέργειας.

Επιτυχία στη συγκόλληση με επικαλύψεις ψευδαργύρου πάχους μεγαλύτερου των 15μm στην επιφάνεια κόλλησης, έχει κατορθωθεί διατηρώντας ένα μικρό διάκενο, πάχους 0.1mm μεταξύ των επιφανειών ενώσεων, επιτρέποντας στον εξατμισμένο ψευδάργυρο να διαφύγει μεταξύ των ελασμάτων, όπως και από την συγκολλητική οπή. Κάτω από εργαστηριακές συνθήκες, το μέγεθος του διακένου μπορεί άνετα να ελεγχθεί (σχήμα 4.10), ωστόσο κάτω από συνθήκες παραγωγής, όπου υπάρχουν μεγάλα κομμάτια χάλυβα και η γραμμή ενώσεως πρέπει να ακολουθήσει μια καμπυλοειδή επιφάνεια, ο έλεγχος του

μεγέθους του διακένου είναι εξαιρετικά δύσκολος. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή έχει επιτευχθεί.

Όταν συγκολλούνται ενώσεις, με επικαλύψεις ψευδαργύρου στην επιφάνεια και το χειρισμό του laser σε συνεχές κύμα, ο εξατμισμένος ψευδάργυρος αποβαλλόμενος από την οπή, αντιδρά με την ακτίνα laser και σχηματίζει ένα πυκνό σύννεφο πλάσματος πάνω από το κομμάτι εργασίας. Το πλάσμα, που είναι αδιαφανής με την ακτίνα laser, την ακτινοβολεί σε μια μεγαλύτερη περιοχή από το συγκεκριμένο σημείο. Αυτό μειώνει την πυκνότητα ισχύος στην εργασία, και ρευστοποιεί την επικάλυψη ψευδαργύρου. Κατά συνέπεια, η διείσδυση της συγκόλλησης μειώνεται και η αυξημένη μετάδοση θερμότητας στο υλικό προκαλεί στρέβλωση στο έλασμα, αν η ταχύτητα συγκόλλησης είναι μικρή. Για παράδειγμα, όταν συγκολλούνται χαλύβδινα ελάσματα πάχους 0.8mm, με επικάλυψη ψευδαργύρου πάχους μικρότερου των 10μm, με ταχύτητα συγκόλλησης 2m/min, που διεισδύει και στα 2 ελάσματα, προκαλεί χαρακτηριστική στρέβλωση. Για να ελαχιστοποιηθεί η στρέβλωση, είναι απαραίτητη η αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης τουλάχιστον στα 3m/min (το φυσιολογικό θεωρείται 5m/min). Ακόμα περισσότερο, σε υψηλότερες ταχύτητες και ισχύ, από ότι σε καθαρό χάλυβα, μαζί με την μικρότερη, πρακτικά, εστιασμένη ακτίνα, η συγκόλληση μπορεί να είναι αποδεκτή (πάντα για υλικά με ψευδαργυρικές επικαλύψεις).

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στην συγκόλληση με laser μετάλλων με επικάλυψη ψευδαργύρου στην παραγωγή, είναι η ομοιομορφία του πάχους της επικάλυψης. Όταν συγκεκριμενοποιηθεί το πάχος της επικάλυψης, δεν πρέπει να είναι ο μέσος όρος, αλλά όσο πιο κοντά γίνεται στο απαιτούμενο πάχος, χωρίς να το υπερβεί. Έτσι η ποιότητα της συγκόλλησης θα είναι άριστη. Είναι συχνό φαινόμενο στους προμηθευτές, όταν δεν υπάρχει στο stock τους κάποιο συγκεκριμένο πάχος, να προμηθεύουν το αμέσως επόμενο, χωρίς να χρεώνουν παραπάνω, πιστεύοντας ότι έτσι κάνουν και χάρη στον χρήστη. Οι γαλβανισμένες επικαλύψεις ψευδαργύρου πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά, διότι μπορεί η επιφάνεια να φαίνεται κατάλληλη στο μάτι, αλλά το πάχος επιμετάλλωσης μπορεί να ποικίλλει υπερβολικά.

Τέλος, ο εξατμισμένος ψευδάργυρος μπορεί να εξαλειφθεί με την οπτική εστίαση του laser τοποθετώντας τον κοντά στην εστίαση, για να κρατηθεί η εξάτμιση μακριά. Επίσης η εξαγωγή του καπνού από την περιοχή συγκόλλησης είναι απαραίτητη για την προστασία του χρήστη.



## **Καλύψεις με ψευδάργυρο**

Παρά το γεγονός ότι πολύ λεπτότερες επιφανειακές επικαλύψεις αποκτούνται με κάλυψη από ψευδάργυρο παρά από εμβάπτιση τετηγμένου μετάλλου, η συγκολλησιμότητα του μετάλλου παραμένει όχι ικανοποιητική. Αυτό συμβαίνει διότι οι καλύψεις με ψευδάργυρο είναι μια διαδικασία επιχαλύβωσης, όμοια σε πολλές περιπτώσεις με την ενανθράκωση, όπου ο ψευδάργυρος συνδυάζεται με την επιφάνεια του μετάλλου, θερμαίνοντας την εργασία με σκόνη ψευδαργύρου. Αυτό δεν προκαλεί μόνο την επικάλυψη με ψευδάργυρο, αλλά και τη διασκόρπιση του στην επιφάνεια του μετάλλου. Όταν γίνεται η συγκόλληση, ο ψευδάργυρος βράζει, εξαερείται και αποδιοργανώνει τη μορφή της συγκόλλησης. Από τη στιγμή που η κάλυψη με ψευδάργυρο χρησιμοποιείται συχνά σε μικρά εξαρτήματα, η πιθανότητα της συγκόλλησης πριν την κάλυψη, πρέπει πάντα να εκτιμάται.

## **Επινικέλωση**

Οι επινικελωμένοι χάλυβες δεν χρησιμοποιούνται αρκετά στις συγκολλητικές εφαρμογές. Για την συγκόλληση με laser, η πιο διαδεδομένη εφαρμογή είναι τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Σε αυτή την περίπτωση τα κυκλώματα είναι συνήθως επινικελωμένα (ή κράματα σιδήρου-νικελίου-κοβαλτίου). Οι συγκολλήσεις σε επινικελωμένο χάλυβα είναι επιρρεπής σε επιφανειακές ρωγμές, ακολουθώντας εγκάρσια την κατεύθυνση της συγκόλλησης, αλλά δεν θεωρούνται βλαβερές για τις ιδιότητες της συγκόλλησης.

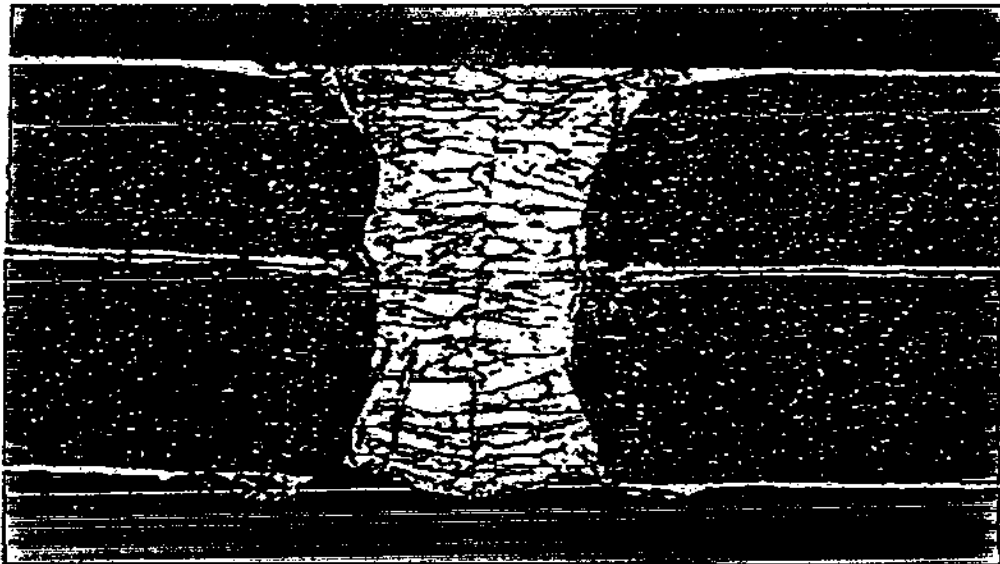
Ωστόσο, οι ηλεκτρολυτικές επινικελώσεις προκαλούν σοβαρές ρωγμές στη στερεοποίηση, όταν συγκολλούμε με laser συνεχούς ρεύματος. Αυτές οι ρωγμές επεκτείνονται σε όλο το πάχος της συγκόλλησης και πολλαπλασιάζονται στη ζώνη θερμικής επίδρασης, παρ'όλα αυτά, μπορούν να μειωθούν, πάλλοντας την ακτίνα laser και ικανοποιητικά αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας ένα Nd:YAG παλμικό laser στα 150Hz και χρησιμοποιώντας 1msec μήκος παλμού. Η διαφορά της συγκολλησιμότητας των 2 τύπων επικαλύψεως με νικέλιο, αποδίδεται στην παρουσία φωσφόρου στο ηλεκτρολυτικό νικέλιο.

## **Αλουμίνιαση**

Το αλουμινένιο χαλύβδινο έλασμα (αλουμίνιο+μικρό ποσοστό % πυρίτιο) είναι διαδεδομένο στις κατασκευές του οικιακού εξοπλισμού. Μπορεί να συγκολληθεί με laser, η δε

επιφανειακή εμφάνιση και οι συγκολλητικές ιδιότητες είναι ικανοποιητικές, για τις περισσότερες εφαρμογές.

Σε λεπτά χαλύβδινα ελάσματα οι διαμορφώσεις των συγκολλήσεων με laser (και η μορφή τους) δεν επηρεάζονται από αέρια του υλικού επικάλυψης. Αυτό συμβαίνει διότι το αλουμίνιο βράζει στους 2450°C, που είναι 1000°C μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία τήξεως του χάλυβα. Το αποτέλεσμα της συγκόλλησης, σχήμα 4.11, έχει μεγάλους κόκκους και συχνά μια κεντρική και σχεδόν γραμμική συνέχεια των ορίων των κόκκων, ακολουθώντας το πάχος της συγκόλλησης. Αυτοί οι λόγοι, σε συνδυασμό με τους μεγάλους κόκκους, αδυνατίζει την κόλληση σε σχέση με την αντοχή του αρχικού μετάλλου. Σε δοκιμασίες διάτμησης και εφελκυσμού στο δείγμα του σχήματος 4.11, παρουσιάστηκαν βλάβες στην ακμή της συγκόλλησης, μεταξύ των δυο ελασμάτων και η αντοχή μειώθηκε 15% από το αρχικό μέταλλο. Παρ'όλα αυτά, η αντοχή επαρκεί για πολλές εφαρμογές.



Σχήμα 4.11: Κατά μήκος τομή μιας συγκόλλησης με CO<sub>2</sub> δύο χαλύβδινων ελασμάτων πάχους 0,8mm με επικάλυψη αλουμινίου πάχους 15μm. Ισχύς συγκόλλησης 5Kw ταχύτητα συγκόλλησης 6m/min.

### Κάδμιο

Η συγκόλληση με laser ή οι άλλοι μέθοδοι συγκόλλησης σε χάλυβα με επίστρωση από κάδμιο δεν ενδείκνυται. Αυτό συμβαίνει διότι το κάδμιο βράζει στους 760°C και παράγει δηλητηριώδεις αέρια. Επίσης οι ταινίες από κάδμιο που δεν έχουν καλή αντοχή, παράγουν γύρω από τη συγκόλληση όρια κόκκων και μεταγενέστερα ρωγμές.

## **Χρυσός**

Οι χρυσές επικαλύψεις χρησιμοποιούνται πολύ σπάνια σε χάλυβα, αλλά είναι διαδεδομένες σε σίδηρο-νικέλιο-κοβάλτιο κραματωμένα μικροκυκλώματα, που βρίσκουν εφαρμογές στις ηλεκτρονικές βιομηχανίες. Αυτά τα υλικά συγκολλούνται αρκετά καλά με laser, αν χρησιμοποιηθεί ένας λεπτός, χρυσός σπινθήρας, αλλά οι λεπτές χρυσές επικαλύψεις προκαλούν ρωγμές κατά την στερεοποίηση.

## **Προστατευτική βαφή**

Οι βαμμένες επιφάνειες δεν είναι εύκολες να περιγραφούν, αφού υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι βαψίματος και εφαρμόζονται σε πάχη που αντιδρούν διαφορετικά όταν θερμαίνονται και πυρακτώνονται. Οι γκρί διασκορπισμένες βαφές, όταν τοποθετούνται μεταξύ επάλληλων συνδέσεων προκαλούν πορώδη κατάσταση και φυσαλλίδες στη συγκόλληση.

Γενικά, παρουσία βαμμένων επικαλύψεων, η ποιότητα της συγκόλλησης εξαρτάται από τον ατμό που παράγεται, την αναλογία του πάχους της επικάλυψης προς το πάχος του ελάσματος και τη διαμόρφωση της ένωσης.

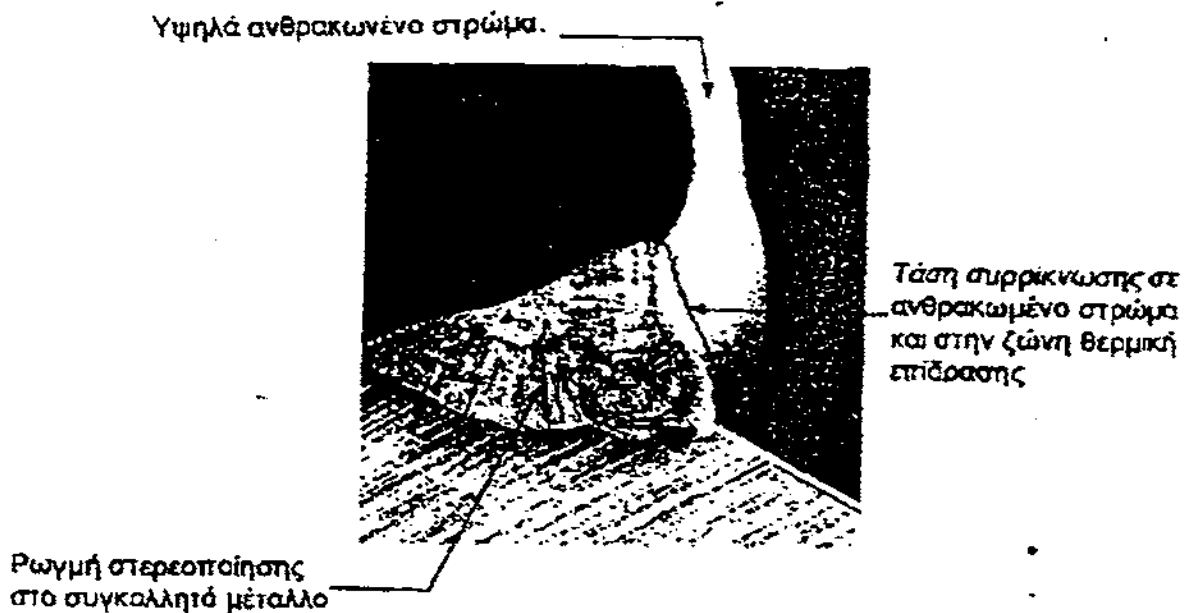
### **4.3.3 Επιφανειακή κατεργασία**

Οι επιφανειακές κατεργασίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στους χάλυβες για την σκλήρυνση της επιφάνειας τους, και παρέχουν καλή αντίσταση στη φθορά και υποστηρίζουν την σκληρότητα της καρδιάς του υλικού. Τα γρανάζια και οι επιφάνειες εδράσεως είναι οι πιο κοινοί αποδέκτες της επιφανειακής κατεργασίας.

Η συγκόλληση με laser χρησιμοποιείται ευρύτατα για κατασκευές γρاناζιών, και για άλλα εξαρτήματα αυτοκινητικών οχημάτων. Κατά το σχεδιαστικό στάδιο η ερώτηση που δημιουργείται είναι για την συγκολλησιμότητα των εξαρτημάτων που έχουν υποστεί επιφανειακές κατεργασίες. Η ενανθράκωση και η εναζώτωση είναι οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι σκληρύνσως αυτών των εξαρτημάτων, και παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα στις τεχνικές συγκόλλησης. Η ουσία είναι να μελετηθεί η «συμπεριφορά» των επιφανειακών κατεργασιών μετά τη συγκόλληση, που δυστυχώς αυτό δεν είναι εφικτό. Τα προβλήματα που συνδυάζονται με τις συγκολλήσεις, των κατεργασμένων επιφανειών και οι απαραίτητες ενέργειες για να ξεπεραστούν, παρουσιάζονται παρακάτω.

## Ενανθράκωση

Η διαδικασία επιχαλύβδωσης, που παράγει επιφάνεια ενανθρακωμένη, διασκορπά καλά τον άνθρακα στην επιφάνεια του εξαρτήματος, ώστε η περιεκτικότητα σε άνθρακα σε αυτό το σημείο να είναι αρκετές φορές μεγαλύτερη, από το υπόλοιπο μη κατεργασμένο υλικό. Για παράδειγμα, ο 0,2 ανθρακούχος χάλυβας, μετά την επεξεργασία, έχει επιφάνεια με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0,6%. Αυτά τα υψηλά επίπεδα προκαλούν ρωγμές στη στερεοποίηση της συγκόλλησης και ρωγμές κατά τη συστολή στη ζώνη θερμικής επίδρασης (σχήμα 4.12). Η μόνη λύση για το πρόβλημα, αν το εξάρτημα δεν μπορεί να κατεργαστεί επιφανειακά μετά τη συγκόλληση, είναι η προκάλυψη των μερών που θα ενωθούν σε μια απόσταση τουλάχιστον 8mm από κάθε πλευρά της ένωσης, για να αποτραπεί η ανάπτυξη της ενανθράκωσης κάτω από την προκάλυψη. Ύστερα μπορεί να ακολουθήσει η συγκόλληση.



Σχήμα 4.12: Ρωγμή στερεοποίησης της συγκόλλησης και ρωγμή στην ζώνη θερμικής επίδρασης, που προκαλούνται από την υψηλή περιεκτικότητα σε C.

## Εναζώτωση

Οι εναζωτωμένες επιφάνειες, γενικά, δεν είναι κατάλληλες για συγκολλητικές εργασίες. Η συγκόλληση σε μια εναζωτωμένη επιφάνεια, μετακινεί την επιφανειακή σκληρότητα στην περιοχή της συγκόλλησης. Ακόμα περισσότερο, τα αποτελέσματα της συγκόλλησης είναι η πορώδης κατάσταση κοντά στην επιφάνεια και πολύ συχνά ρωγμές.

#### 4.3.4 Πιθανά συγκολλητικά ελαττώματα και οι λύσεις τους.

Η καλή συγκόλληση θεωρείται η συγκόλληση που εξυπηρετεί επαρκώς όλες τις απαιτήσεις χρήσεως της. Στο ξεκίνημα της εκλογής της τεχνικής της συγκόλλησης, είναι σημαντικό να είναι γνωστές οι απαιτήσεις χρήσεως και αν η εκλεγείσα τεχνική θα παράγει μια συγκόλληση που θα τις καλύπτει απόλυτα. Σε μια συγκόλληση 2 υλικών, όπου μεταγενέστερα θα υποστεί λίγες καταπονήσεις (π.χ. έπιπλα κήπου), μπορεί να ανεχτεί σφάλματα. Από την άλλη πλευρά, μια συγκόλληση 2 υλικών, που θα χρησιμοποιηθούν σε χρήσεις με υψηλές τάσεις (π.χ. μέρη μηχανής, σκελετός οχήματος κ.α.), απαιτεί προσεκτικό υπολογισμό του μεγέθους και μεταγενέστερα μηχανικές δοκιμασίες και μεταλλουργικό έλεγχο. Αυτό όμως, δεν σημαίνει ότι η συγκόλληση είναι έτοιμη, αφού μπορούν να συμβούν συγκολλητικά σφάλματα, λόγω των απρόβλεπτων αλλαγών του υλικού και των λαθών παραγωγής. Τα περισσότερα σφάλματα αυτής της φύσεως μπορούν να αποφευχθούν κάνοντας την εργασία βήμα-βήμα, διασφαλίζοντας έτσι το γεγονός ότι το σφάλμα δεν συνέβηκε από την αρχή της διαδικασίας. Έτσι, πρέπει να υπάρχει μια αντίληψη για τα κοινά σφάλματα και σε αυτά θα αναφερθούμε παρακάτω, καθώς και τις βασικές λύσεις τους.

#### Πορώδης κατάσταση

Η πορώδης κατάσταση δημιουργείται καθώς φυσαλλίδες αερίου εγκλωβίζονται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης της συγκόλλησης. Επίσης δημιουργείται από την εισαγωγή αέρα και υγρασίας μέσα στη «λίμνη» της συγκόλλησης. Όλα τα παραπάνω, συνεργαζόμενα με τα προστατευτικά αέρια, χειροτερεύουν το πρόβλημα. Τέλος στο πρόβλημα συνεισφέρει και η μόλυνση της συγκολλημένης επιφάνειας, από λάδι, υγρασία, λιπαντικά και βαφές. Όλα αυτά μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με προσεκτικές διαδικασίες καθαρισμού (αναφορά γίνεται στην παρακάτω παράγραφο). Η καθαρή πορώδης κατάσταση (διάμετρος του πόρου μέχρι 0,2mm) παρουσιάζεται στις περισσότερες συγκολλήσεις τήξεως και στη μορφή σφαιρικών κοιλωμάτων που προκαλούν ασήμαντες τάσεις στη συγκόλληση. Το πιο σοβαρό πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι η απώλεια της εγκάρσιας διατομής της συγκόλλησης, που προκαλείται αν είναι σε μεγάλο ποσοστό και σε κοντινή αμεσότητα. Οι πόροι οι οποίοι είναι πολύ μικροί σε σχέση με το βάθος συγκόλλησης και είναι καλά διασκορπισμένοι στο μήκος της συγκόλλησης, δεν επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες της κόλλησης. Για παράδειγμα, για μια ένωση μεταξύ 2 ελασμάτων 1mm πάχους, με πόρους διαμέτρου 0,2mm διασκορπισμένους σε κάθε 10mm (κατά μέσο όρο) κατά μήκος της συγκόλλησης, θα προκαλέσει απώλεια της κατά μήκος εγκάρσιας διατομής λιγότερο από 0,5%. Ωστόσο, από αυτό το παράδειγμα δεν σημαίνει ότι οι πόροι διαμέτρου ίσης περίπου με το 20% του πάχους

των ελασμάτων, είναι πάντα αποδεκτοί. Πολύ μεγάλοι πόροι που εκπροσωπούν αυτό το ποσοστό σε λεπτές τομές, περιέχουν ανεπιθύμητες ποσότητες αερίων (όπως υδρογόνο), που προκαλούν στα εξαρτήματα σφάλματα σε μεταγενέστερη ημερομηνία.

Οι βαθιές συγκολλήσεις με laser, σε κοντινά κατάλληλα σημεία ενώσεως, χωρίς την εντελώς διείσδυση σε όλο το πάχος της ένωσης (τυφλές κολλήσεις), είναι επιρρεπής στην πορώδη κατάσταση (σχήμα 4.13). Αυτό συμβαίνει λόγω των αερίων του υλικού και των φυσαλλίδων, έχοντας μεγάλο δρόμο διαφυγής, από την ρίζα της συγκόλλησης ως την επιφάνεια, προτού κλείσει η σχηματισμένη οπή. Εκεί που η οπή διεισδύει το ολικό πάχος της ένωσης, οι αέριες φυσαλλίδες «ενισχύονται» με δυο εξόδους και μια μικρότερη έξοδο διαφυγής. Παρ'όλα αυτά ο συνδυασμός της ισχύος της συγκόλλησης και της ταχύτητας είναι σημαντικός για τον διασφαλισμό της διεξόδου των αέριων φυσαλλίδων.



Σχήμα 4.13: Παράδειγμα πορώδους κατάστασης που εμφανίζεται συχνά σε βαθιές και στενές συγκολλήσεις, που γίνονται με ακτίνες ισχύος (ακτίνες ηλεκτρονίων και ακτίνες laser). Βάθος συγκόλλησης 15 mm.

### Ρωγμές στερεοποίησης

Οι ρωγμές στερεοποίησης (σχήμα 4.14) συμβαίνουν στις υψηλές θερμοκρασίες (ανώτερες των θερμοκρασιών στερεοποίησης), κάτω από συνθήκες όπου το υλικό έχει χαμηλή ελατότητα και είναι κάτω από υψηλές τάσεις συστολής.

Η στερεοποίηση από το υγρό συγκολλημένο μέταλλο αρχίζει σε μια θερμοκρασία (υγροποίησης) και ολοκληρώνεται σε μια χαμηλότερη θερμοκρασία (στερεοποίησης). Μεταξύ αυτών των δυο επιπέδων το κράμα σχηματίζει μια ατελής στερεοποιημένη μάζα που είναι εύθραυστη και έχει μικρή ή καθόλου ολκιμότητα, μέχρι να ψυχθεί σε χαμηλότερες

θερμοκρασίες. Η ευθραυστότητα εμφανίζεται στα υγρά λεπτά στρώματα που περιβάλλουν τους στερεούς κόκκους, και όταν υπόκειται σε ψηλές και εγκάρσιες τάσεις συστολής, κατά τη διάρκεια της ψύξεως της συγκόλλησης, έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανιστούν ρωγμές στερεοποίησης στα όρια των λεπτών στρωμάτων (συνήθως κοντά στο κέντρο της συγκόλλησης, που αποτελεί το τελευταίο μέρος που ψύχεται). Όταν υπάρχει υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, η ευθραυστότητα της συγκόλλησης συμβαίνει λόγω της μαρτενσιτικής μορφής του άνθρακα που είναι εύθραυστη και έχει αδύνατη μορφή στα τελικά στάδια, που συμβαίνει η ψύξη της συγκόλλησης. Στους χάλυβες, το κύριο στοιχείο που προκαλεί τις ρωγμές, είναι το θείο, που προάγει τη μορφή των λεπτών στρωμάτων με χαμηλό σημείο τήξεως. Άλλα στοιχεία είναι ο φώσφορος και το βόριο. Το θείο στο χάλυβα μπορεί να είναι αβλαβές με την προσθήκη μαγγανίου, που προάγει τη μορφή του φωσφορούχου μαγγανίου. Ομοίως, η υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα μπορεί να είναι αβλαβής, με την προσθήκη μαγγανίου.



Σχήμα 4.14: Κατά μήκος τομή συγκόλλησης όπου φαίνεται η ρωγμή στερεοποίησης στο κέντρο της συγκόλλησης. Η ρωγμή οφείλεται στην παρουσία υψηλής περιεκτικότητας θείου στο χάλυβα και στο σχεδιασμό της ένωσης που παράγει εγκοπές στη δίοδο συγκόλλησης.

Συνοπτικά, ο κίνδυνος των ρωγμών στερεοποίησης σε συγκολλήσεις με ανθρακούχο χάλυβα, μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τους εξής τρόπους

- Διατηρώντας χαμηλή την περιεκτικότητα του άνθρακα στη ζώνη συγκόλλησης και αν είναι απαραίτητο με την προσθήκη υλικού με χαμηλό άνθρακα-μαγγάνιο.

- Κρατώντας την περιεκτικότητα του θείου και του φωσφόρου όσο γίνεται χαμηλότερη, περίπου στο επίπεδο του 0,02%. Αν αυτό δεν είναι δυνατό μπορεί να προστεθεί υλικό στη συγκόλληση με χαμηλό άνθρακα - μαγγάνιο. Αν τα υλικά είναι επιρρεπή στις ρωγμές και η προσθήκη κατάλληλων υλικών για την τροποποίηση της συγκόλλησης είναι αδύνατη, η μερική διείσδυση των κολλήσεων πρέπει να αποφευχθεί, και όπου είναι δυνατόν, πρέπει να γίνουν τροποποιήσεις στο σχεδιασμό της ένωσης, για να μειωθούν οι συγκολλητικές τάσεις συστολής κατά την ψύξη. Επίσης για να καταπολεμιστούν οι τάσεις συστολής, πρέπει (αν είναι δυνατόν) οι επιφάνειες συγκόλλησης να κρατηθούν μεταξύ τους κάτω από πίεση, και στις λεπτές διατομές πρέπει να γίνουν προσυγκολλητικές συγκολλήσεις στερεοποίησης (έδρασης), κατά μήκος της γραμμής ενώσεως.

### **Ρωγμές υγροποίησης στη ζώνη θερμικής επίδρασης**

Το χαμηλό σημείο τήξεως των ορίων των κόκκων στα λεπτά στρώματα που περιγράφεται πιο πάνω, μπορεί να παρουσιαστεί και στη ζώνη θερμικής επίδρασης. Αυτό μπορεί να προκαλέσει ρωγμές κάτω από την επήρεια των θερμών τάσεων. Οι συγκολλήσεις με laser δεν είναι συνήθως ευπαθής σε αυτές τις μορφές ρωγμών, λόγω της χαμηλής εσωτερικής θερμότητας.

### **Ψυχρές ρωγμές**

Οι πιο κοινές μορφές των ψυχρών ρωγμών είναι γνωστές ως «ψυχρές ρωγμές παραγόμενες από υδρογόνο» και συμβαίνουν στα φερίτικα και μαρτενσιτικά κράματα χαλύβων. Οι ρωγμές αυτές συνήθως πραγματοποιούνται στη ζώνη θερμικής επίδρασης μετά τη συγκόλληση, αλλά και στο ίδιο το συγκολλημένο μέταλλο. Η αιτία των ρωγμών είναι συνήθως συνδυασμός :

- Της παρουσίας υδρογόνου.
- Της ευθραυστότητας της μορφής του μαρτενσίτη.
- Της παρουσίας υψηλής συστολής και παραμενόντων τάσεων.

Το πρόβλημα μπορεί να αποφευχθεί, ακολουθώντας τις πιθανές λύσεις που αναφέρθηκαν στις ρωγμές στερεοποίησης. Αν αυτό δεν είναι εφικτό, μπορεί να εφαρμοσθεί η προθέρμανση για να μειωθεί το ποσοστό ψύξεως και η ανόπτιση για τους μαρτενσιτικούς ανοξειδωτους χάλυβες.



## Ρωγμές από τάσεις οξειδωσης

Οι ρωγμές από οξειδωση είναι ένα σφάλμα που συμβαίνει σε συνδυασμό της οξειδωσης και των τάσεων εφελκυσμού. Η μερική διείδυση των συγκολλήσεων (που διαθέτουν ρωγμές στη ρίζα τους) είναι επιρρεπής σε αυτού του είδους το σφάλμα, και δεν πρέπει να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλον οξειδωσης, όπως σε διαλύματα νιτρικού οξέος ή σε δεξαμενές αποθήκευσης αμμωνίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο άνθρακας και οι ανοξειδωτοι χάλυβες είναι ευπαθής.

Γενικότερα, τα σφάλματα που ανακαλύπτονται στις συγκολλήσεις με laser, όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες, δεν πρέπει ποτέ να αγνοούνται. Αν κάποιος ανακαλύψει τέτοιου είδους σφάλματα και δεν είναι ειδικός στο αντικείμενο, πρέπει αμέσως να απευθυνθεί σε επαγγελματίες του είδους, που γνωρίζουν αρκετά τις συγκολλήσεις, και γενικότερα τις ιδιότητες των υλικών.

### 4.4 Παράμετροι συγκόλλησης

Το σχήμα και το βάθος της συγκόλλησης καθορίζονται από τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζεται η συγκολλητική ενέργεια στην ένωση. Για την συγκόλληση με laser η εισαγωγή της ενέργειας ελέγχεται από τον συνδυασμό των ακόλουθων παραμέτρων :

- > Το μέγεθος του εστιασμένου σημείου.
- > Το προστατευτικό αέριο της σπής.
- > Την ισχύ του laser (η ισχύς συνδυάζεται με το παλμικό μήκος και την συχνότητα, στην περίπτωση παλμικού laser) και
- > Την ταχύτητα συγκόλλησης.

Αν τα παραπάνω είναι σωστά, τότε η επανάληψη της προσπάθειας της συγκόλλησης εξαρτάται από την υλική προετοιμασία, την εφαρμογή της ένωσης και την ακτίνα laser στην ευθυγράμμιση της ένωσης.

Όλες οι παραπάνω παράμετροι καλύπτονται από αυτή την παράγραφο, μαζί με τις σχετικές απόψεις των : αριθμού εστίασης -  $f$ , βάθους εστίασης, θέσης εστίασης, προστατευτικών αερίων, μηχανών προστατευτικών αερίων, χρόνου και τρόπου χρησιμοποίησης της μηχανής καταστολής του πλάσματος, τρόπου εγκατάστασης των συνθηκών συγκόλλησης και ανοχών.

#### 4.4.1 Μέγεθος εστιασμένου σημείου, βάθος εστίασης και θέση εστίασης .

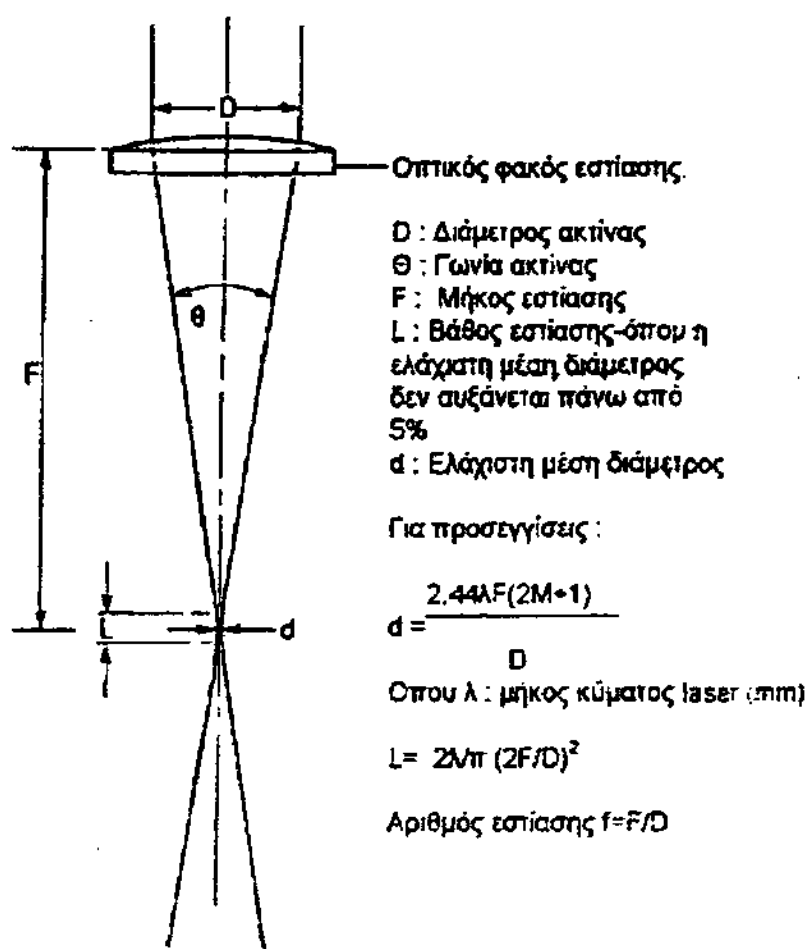
##### Μέγεθος εστιασμένου σημείου

Για να επιτύχει κανείς την απαιτούμενη πυκνότητα ισχύος για την συγκόλληση οπής ( $10^3$  έως  $10^5$  W/mm<sup>2</sup>), η επιλογή και η διατήρηση του μεγέθους του εστιασμένου σημείου είναι άκρως σημαντική. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητη η φροντίδα της επιλογής των χαρακτηριστικών της οπτικής εστίασης, η οποία καθορίζει το μέγεθος του εστιασμένου σημείου.

Οι απλοί φακοί θα χρησιμοποιηθούν με σκοπό την εξήγηση των χαρακτηριστικών της οπτικής εστίασης, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη, όταν προσαρμόζουμε το μέγεθος του εστιασμένου σημείου. Παρ'όλα αυτά, υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί οπτικοί εξοπλισμοί διαθέσιμοι για την εστίαση των ακτινών laser.

Όταν το φως εστιάζεται, οι ακτίνες συγκλίνουν σε μία πολύ μικρή μέση διάμετρο  $d$  και μήκος  $L$  (σχήμα 4.15), πριν να διασπαστούν και πάλι. Η ακριβής ελάχιστη μέση διάμετρος και το μήκος που επιτυγχάνεται, εξαρτώνται από τον τύπο της οπτικής, το μήκος εστίασης  $F$ , τη διάμετρο ακτίνας  $D$  (συναφής προς την οπτική), το κατά πόσο η συναφής ακτίνα συγκλίνει ή αποκλίνει, τον αριθμό ακτίνας TEM, το μήκος κύματος φωτός και την ισχύ του laser.

Η πραγματική ελάχιστη μέση διάμετρος  $d$ , του παραγόμενου εστιασμένου φωτός laser, είναι σχεδόν αδύνατο να υπολογισθεί ακριβώς ή να μετρηθεί. Ο υπολογισμός της διαμέτρου του σημείου δίνει μόνο μια προσέγγιση, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη όλους τους ελεγχτικούς παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω, μερικοί από τους οποίους είναι από μόνοι τους δύσκολο να εφαρμοστούν, και μπορούν να διαφοροποιηθούν, όσο η ισχύς του laser αυξάνει. Επιπλέον, η φόρμουλα από μόνη της δεν θα εγκαταστήσει το μέγεθος του εστιασμένου σημείου που έπρεπε να χρησιμοποιηθεί. Μπορεί αρχικά να φαίνεται ότι μπορεί κάποιος εύκολα να δημιουργήσει τη διάμετρο του σημείου για μια δεδομένη ισχύ laser, γιατί το απαιτούμενο πεδίο πυκνότητας της ισχύος είναι γνωστό, και μετά να εγκαταστήσει το απαιτούμενο μήκος οπτικής εστίασης από τον τύπο μεγέθους του σημείου. Αυτή η προσέγγιση είναι πιο δύσκολη από ότι ακούγεται, διότι το υπολογισμένο πεδίο πυκνότητας της ισχύος για συγκόλληση οπής είναι ευρύ και το μέγεθος του εστιασμένου σημείου που έχει απομονωθεί, δεν συμβάλλει στην καλή διαμόρφωση της συγκόλλησης.



Σχήμα 4.15:Χαρακτηριστικά μιας εστιασμένης ακτίνας laser.

Μόλις η ισχύς συγκόλλησης, η ταχύτητα και οι προϋποθέσεις προστατευτικού αερίου έχουν εκπληρωθεί, η γωνία της εστιασμένης σύγκλισης  $\theta$ , το βάθος εστίασης L, και το μέγεθος εστιασμένου σημείου, ελέγχουν συλλογικά την προσπάθεια συγκόλλησης. Καθώς οι προϋποθέσεις αυτές είναι αλληλένδετες και δεν μπορούν να ρυθμιστούν μεμονωμένα, πρέπει να επιτυχανθεί ένας συμβιβασμός. Οι κύριοι ελεγκτικοί παράγοντες, οι οποίοι είναι στα χέρια του χειριστή όσον αφορά την οπτική εστίαση, είναι η συναφής διάμετρος της ακτίνας και το μήκος εστίασης. Η σχέση διάστασης και επίδρασης αυτών των δυο παραγόντων, είναι κατάλληλα εκφρασμένες ως αριθμός  $f$ , ο οποίος προκύπτει διαιρώντας το εστιακό μήκος F, με τη συναφή διάμετρο ακτίνας D.

Από το σχήμα 4.15, γίνεται αντιληπτό ότι όσο πιο χαμηλός είναι ο αριθμός  $f$ , τόσο πιο μικρή είναι η μέση διάμετρος ακτίνας  $d$ , και το βάθος εστίασης L, και τόσο πιο μεγάλη η γωνία σύγκλισης  $\theta$ . Παρ' ότι οι χαμηλοί αριθμοί  $f$  παράγουν μικρότερα μεγέθη σημείου και γι'αυτό υψηλότερες πυκνότητες ισχύος οι οποίες κάνουν υψηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης από αυτές των υψηλότερων αριθμών  $f$ , δεν εξασφαλίζουν τόσο καλές περιβάλλοντες διαμορφώσεις συγκόλλησης. Αυτό συμβαίνει διότι οι συγκολλήσεις είναι πιο στενές, κάνοντας λοιπόν την εφαρμογή της ένωσης και την ακτίνα πάνω στην ευθυγράμμιση ένωσης πιο κρίσιμη. Περισσότερο μέταλλο συγκόλλησης μπορεί να χαθεί μέσω εξάτμισης, παράγοντας

υποσκαμμένες συγκολλήσεις. Το μικρότερο μήκος ή βάθος εστίασης, κάνει το στήσιμο της θέσης εστίασης πιο κρίσιμο και λιγότερο ανεκτικό στην διαφοροποίηση, η πιο πλατιά γωνία σύγκλισης της ακτίνας μειώνει την ικανότητα της ακτίνας laser να έχει πρόσβαση σε ορισμένες ενώσεις και στενά κενά. Τελικά το μικρότερο εστιακό μήκος  $P$ , απαιτεί τον οπτικό εξοπλισμό να είναι πιο κοντά στην εργασία, το οποίο την κάνει πιο επιρρεπή στο «πιτσιλίσμα» της συγκόλλησης, την θερμική και ατμική καταστροφή.

Η εμπειρία πολλών χρηστών  $CO_2$  laser και προμηθευτών εξοπλισμού, έχει δείξει ότι οι αριθμοί  $f$  από το 6 ως το 9, γενικά παρέχουν τις καλύτερες περιβάλλοντες διαμορφώσεις συγκόλλησης για ισχείς άνω των 10KW. Για να επιτύχει κανείς πολύ υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί αριθμός  $f$  μέχρι 3, αλλά για τους λόγους που περιγράφηκαν προηγουμένως, ο ακριβής έλεγχος της διαδικασίας καθίσταται αναγκαίος για την ανεκτή διαμόρφωση της συγκόλλησης. Κάτω από το  $f$  3, η ικανότητα εστίασης της ακτίνας χειροτερεύει, ειδικά όταν χρησιμοποιείται ένας φακός, λόγω διαταραχής, η οποία θα αλλάξει τη μέση θέση και θα αυξήσει τη διάμετρο της. Αριθμοί μεγαλύτεροι του  $f$  10 γενικά παράγουν πολύ μεγάλα μεγέθη σημείων και χρειάζονται πολύ υψηλές ισχείς laser για να επιτύχουν την απαιτούμενη πυκνότητα ισχύος και γι'αυτό κάνουν ανεπαρκή τη χρήση της ισχύος laser.

### **Επιλέγοντας το μέγεθος του εστιακού σημείου**

Εκτός αν η ταχύτητα συγκόλλησης είναι η ανώτατη, ο αρχάριος συμβουλεύεται να διαλέξει το μέγεθος του εστιασμένου σημείου για συγκόλληση, βασισμένη σε αριθμό  $f$  7,5 για  $CO_2$  laser συγκόλλησης ( $f$ 4 είναι ένα πρακτικό σημείο έναρξης για Nd:YAG). Αυτό που είναι απαραίτητο είναι να μετρήσει κανείς την διάμετρο της συναφής ακτίνας στην προτεινόμενη εργασιακή ισχύ, στη θέση της οπτικής εστίασης, και στη συνέχεια να πολλαπλασιάσει τη διάμετρο με τον αριθμό  $f$  για να βγάλει το εστιακό μήκος της απαιτούμενης οπτικής (η διάμετρος της συναφής ακτίνας μπορεί να γίνει για Nd:YAG laser με το να πάρει κανείς ένα φωτογραφικό αποτύπωμα, ενώ για τα  $CO_2$  laser με ένα ακρυλικό καμένο αποτύπωμα). Αν η διάσταση του εστιακού μήκους δεν συμπίπτει με το μέγεθος του κατασκευαστή, θα πρέπει να στρογγυλοποιηθεί πάνω ή κάτω, προς την πλησιέστερη διάσταση. Στρογγυλεμένο κάτω αν η ταχύτητα συγκόλλησης είναι σημαντική. Έτσι, έχοντας τη διάμετρο της ακτίνας, το απαιτούμενο εστιακό μέγεθος και την ισχύ της ακτίνας, μπορεί να επιλεγεί ο κατάλληλος εστιακός εξοπλισμός για την συγκολλητική εφαρμογή.

## Βάθος εστίασης

Από το σχήμα 4.15, είναι φανερό ότι η εστιασμένη ακτίνα laser έχει μέσο μήκος και ελάχιστη διάμετρος που αυξάνει με τον αριθμό  $f$ . Το μέσο μήκος είναι πολύ χρήσιμο για τη συγκόλληση με laser, καθώς η αναλογία της διαμέτρου που δεν έχει αυξηθεί πέρα του 5% από την ελάχιστη μέση διάμετρο, παρέχει ένα εργασιακό βάθος εστίασης στο οποίο η πυκνότητα ισχύος δεν θα μειωθεί λιγότερο από 10% και το οποίο μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί με την επιλογή ισχύος laser. Γι'αυτά, παρέχει μια ανεκτικότητα για την τοποθέτηση της εστιασμένης θέσης πάνω στην εργασία και γι'αυτό επιταχύνει την αξιοπιστία διαμόρφωσης της συγκόλλησης.

Υπάρχουν πολυάριθμες "συνταγές" για να προσεγγίσει κανείς το εργασιακό βάθος εστίασης μιας μηχανής εστίασης, και μια τέτοια δίνεται στο σχήμα 4.15. Όλες αυτές οι "συνταγές" επηρεάζονται από παράγοντες που ελέγχουν το εστιακό σημείο, το οποίο αναφέρθηκε προηγουμένως. Παρ' όλα αυτά, παρέχουν μια ένδειξη διάστασης της διακύμανσης της θέσης εστίασης (μέση ελάχιστη) σχετικά με την επιφάνεια εργασίας που θα έπρεπε να πειραματιστεί με την εγκατάσταση του αληθινού εργαστηρίου.

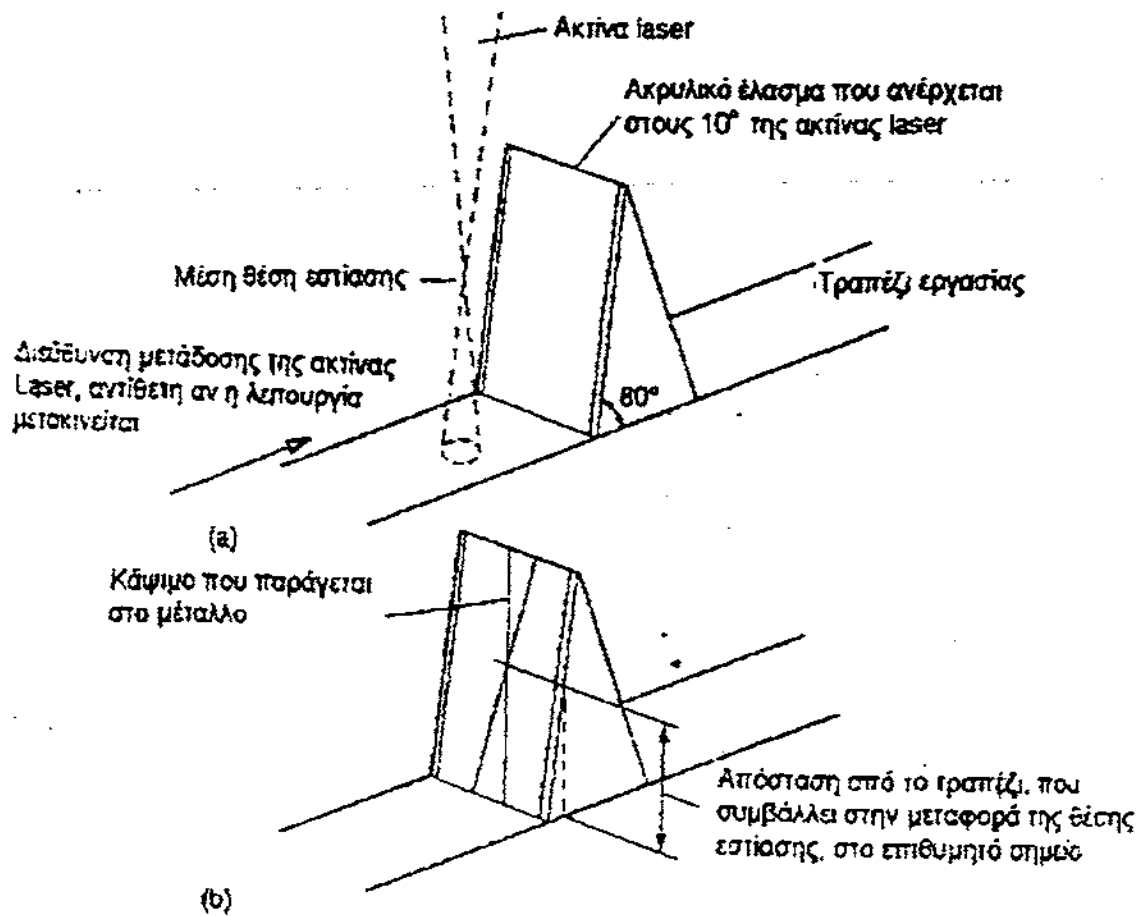
Η εγκατάσταση του εργασιακού βάθους εστίασης πρακτικά, απλοποιείται αν κάποιος μπορεί αρχικά να προσεγγίσει την ελάχιστη θέση της μέσης διαμέτρου, καθώς αυτό δίνει μια αρχική διάσταση, κάθε πλευρά της οποίας θα έπρεπε να ερευνηθεί. Θεωρητικά αυτό θα έπρεπε να είναι σε απόσταση από την οπτική εστίαση, η οποία θα είναι ίση προς το εστιακό μήκος. Παρ'όλα αυτά η κατασκευαστική ανεκτικότητα είναι συχνά μόνο στο -5% ως στο +5% και εξαρτάται από τον οπτικό προμηθευτή. Επιπλέον, για μια μεταδοτική επαφή (φακός) το αληθινό εστιακό μήκος ξεκινά από ένα σημείο μέσα στην οπτική και όχι σε ένα σημείο πάνω σε μια επιφανειακή όψη (μερικοί οπτικοί προμηθευτές παρέχουν μια διάσταση από την μπροστινή ή πίσω όψη της οπτικής για ένα δεδομένο εστιακό μήκος) και εκτός αν ο οπτικός εξοπλισμός έχει κατασκευαστεί με ακρίβεια για κάποια συγκεκριμένη μηχανή laser, όπου παίρνεται ένα δεδομένο σημείο αφετηρίας για τη θέση εστίασης, χρησιμοποιώντας μια εγκατεστημένη διάσταση και έτσι πρέπει να βρεθεί η ελάχιστη μέση διάμετρος. Πάντως έστω και αν υπάρχει ένα σημείο αφετηρίας, είναι ένα πλεονέκτημα να το ελέγχει κανείς πρακτικά στην περίπτωση που ο οπτικός εξοπλισμός επεκτείνεται θερμικά στην εργασιακή ισχύ laser και προκαλεί θερμική παραμόρφωση στους φακούς, που θα μεταβάλλει την ελάχιστη μέση διάμετρο και το εστιασμένο σημειακό μέγεθος. Για να βρει κανείς την ελάχιστη μέση θέση για ένα Nd:YAG laser, θα πρέπει να τοποθετηθεί ένα μικρό ατσάλινο φύλλο μετάλλου, με την επιφάνεια του βαλμένη στην θεωρητική απόσταση εστιακού φακού και ένα μοναδικό παλμικό σημείο φτιαγμένο πάνω στην επιφάνεια του φύλλο μετάλλου. Το φύλλο μετάλλου

στη συνέχεια πρέπει να μετακινηθεί κατά μήκος και να τοποθετηθεί άλλο ένα παλμικό σημείο στην επιφάνεια του κατά 0,1mm κάθε μετακίνησης. Έχοντας κατασκευάσει τέσσερα ή πέντα τέτοια σημεία, οι διάμετροι τους πρέπει να μετρηθούν με μικροσκόπιο. Αν τα σημεία γίνονται σταδιακά μικρότερα και μετά αυξάνονται, το μικρότερο σημείο αποτελεί την κατά προσέγγιση ελάχιστη μέση θέση.

Στη συνέχεια η ρύθμιση της θέσης της επιφάνειας θα πρέπει να αναστραφεί και να μετρηθεί το ύψος από την επιφάνεια του φύλλου μετάλλου, ως το πρακτικό σημείο αφετηρίας στη μηχανή του laser, και να καταγραφεί. Αν τα σημεία συνεχίσουν να γίνονται πλατύτερα, τότε η εργασία θα πρέπει να επαναληφθεί με την επιφάνεια του φύλλου μετάλλου χαμηλότερα από την αρχική θέση έναρξης. Αν είναι δυνατό, όταν φτιάχνει κανείς τα μεμονωμένα σημεία, η κατά προσέγγιση μέση ισχύς και το μήκος του παλμού που θα χρησιμοποιηθεί για τη συγκόλληση, θα πρέπει να ερευνηθούν, διότι η θέση της ακτίνας εστίασης μπορεί να μεταβληθεί, καθώς μεταβάλλεται η ισχύς.

Επίσης το πάχος του φύλλου μετάλλου πρέπει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το προσδοκούμενο βάθος διείσδυσης για την αποφυγή της καταστροφής του τραπεζιού εργασίας. Μια εναλλακτική μέθοδος για την εύρεση του σημείου, είναι να πάρει κανείς σε πολυμιδικές ταινίες ίχνη από καμμένες σπές και να μετρηθούν οι διάμετροι τους. Για CO<sub>2</sub> laser, με ισχύ περίπου 6kW, ένας ικανοποιητικός τρόπος εγκατάστασης της ελάχιστης μέσης θέσης, είναι με το να πάρει κάποιος ένα αποτύπωμα εστιασμένης ακτίνας σε ένα ακρυλικό έλασμα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.16.

Όταν χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος, είναι σημαντικό να παίρνει κανείς το αποτύπωμα στην χρησιμοποιούμενη ισχύ laser, για την περίπτωση όπου η θέση εστίασης μετακινηθεί με τις αλλαγές της ισχύος. Επίσης συμβουλεύεται να διασχιστεί το ακρυλικό έλασμα από την ακτίνα με 4-5m/sec, για την αποφυγή ανεπιθύμητης καταστροφής του αποτυπώματος διαμέσου της αγωγής θερμότητας που θα προέκυπτε σε χαμηλότερες ταχύτητες.



Σχήμα 4.16. Κανόνας για να επιτευχθεί η ελάχιστη μέση θέση εστίασης χρησιμοποιώντας

ένα γωνιακό ακρυλικό έλασμα. Α) Πριν τύπωθεί το laser Β) Μετά τη τύπωση του laser

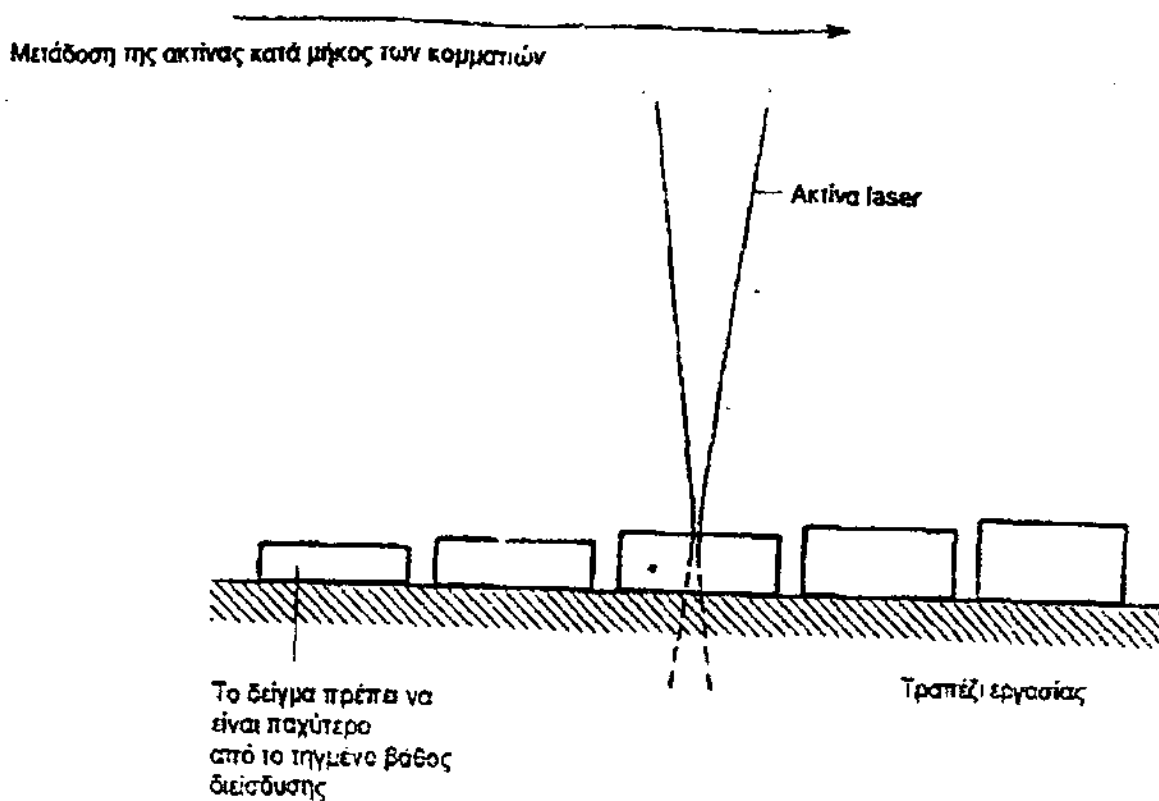
Μόλις εγκατασταθεί ιδανικά η ελάχιστη μέση θέση σε σχέση με το καθορισμένο σημείο αφετηρίας πάνω στη μηχανή του laser για μελλοντική αναφορά, η ροή του λιωμένου laser μπορεί να γίνει κατά τρόπο ώστε να βρει κανείς το πρακτικό εργασιακό βάθος της εστίασης βασιζόμενο στο βάθος διείσδυσης που επιτυγχάνεται (ο όρος ροή λιωμένου laser χρησιμοποιείται όταν η συνθήκη συγκόλλησης αναφέρεται σε ένα μοναδικό φύλλο μετάλλου π.χ. χωρίς να παραχθεί μια γραμμή ενώσεως σε επαπτόμενες επιφάνειες). Οι ροές του λιωμένου laser καθοδηγούνται καλύτερα με τη βοήθεια χαμηλών ενανθρακωμένων χαλύβδινων δειγμάτων, το κάθε ένα περίπου 50mm μήκος και 30mm πλάτος και λίγων mm παχύτερα από το προσδοκώμενο βάθος διείσδυσης της κόλλησης, σε ισχύ και ταχύτητα συγκόλλησης που χρησιμοποιείται στην παραγωγή. Οι ροές θα πρέπει να πραγματοποιηθούν στα 50mm κατά μήκος και κάτω στο κέντρο στα 30mm σε πλάτος. Όταν οι ροές μετακινούνται, απαιτούνται 5 δείγματα : ένα θα πρέπει να τοποθετηθεί με την επάνω επιφάνεια στην ελάχιστη μέση θέση της ακτίνας laser , δυο δείγματα θα πρέπει να τοποθετηθούν για να παρέχουν υψηλότερες θέσεις επιφανείας σε ελαφρά υψηλότερο βαθμό από τα ακραία σημεία

του υπολογισμένου εργασιακού βάθους συγκόλλησης, και τα δυο εναπομείναντα δείγματα σε θέσεις ύψους επιφάνειας στο μέσο ανάμεσα στην ελάχιστη μέση θέση και στα ακραία σημεία (σχήμα 4.17). Για πάχη των πέντε δειγμάτων θα πρέπει να κατεργαστούν, για να παρέχουν διακυμάνσεις στο ύψος της επιφάνειας. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν προκύπτει καθόλου σύγκριση στις θέσεις των επιφανειών των δειγμάτων και ευθυγραμμίζοντας τα δείγματα ως το τέλος όλη η λιωμένη ροή μπορεί να γίνει σε μια διαδικασία. Αφού έχουν πραγματοποιηθεί οι ροές λιωσίματος, τα δείγματα θα πρέπει να πριονιστούν στο μισό, εγκάρσια προς την κατεύθυνση της συγκόλλησης, για να αποκαλυφθεί η όψη που περιέχει τη λιωμένη ροή του βάθους διείδυσης. Η όψη θα πρέπει μετά να γυαλισθεί και να χαραχθεί με οξύ για να αποκαλύψει το βάθος λιωσίματος, που μπορεί τότε να μετρηθεί διαβήτη βερνιέρου. Ένα μεγεθυντικό γυαλί ή μικροσκόπιο μπορεί να είναι απαραίτητο, για να δει κανείς το βάθος συγκόλλησης φτιαγμένο σε χαμηλή ισχύ laser. Μόλις μετρηθούν τα βάθη ροής μπορούν να χαραχθούν ενάντια στις επιφάνειες ύψους των δειγμάτων, για να φανερωθεί η σχέση. Από αυτή την διακύμανση, το εργασιακό βάθος της εστίασης, που θα διατηρήσει το απαιτούμενο βάθος συγκόλλησης, μπορεί να εγκατασταθεί.

Σε σταθμούς εργαστηρίων, οι οποίοι τροφοδοτούν περιστρεφόμενα εξαρτήματα, όπου η ακτίνα laser είναι στις 90° από τον άξονα περιστροφής, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορθογώνια δοκιμαστικά δείγματα.

Το να βρει κανείς την ελάχιστη μέση θέση σε ένα CO<sub>2</sub> laser με ισχύ πολύ πάνω από 6KW είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του ακρυλικού καμένου αποτύπωματος, λόγω του υπερβολικού λιωσίματος που προκαλεί φτωχό καθορισμό της μέσης άκρης και τα μοναδικά σημεία πάνω στο φύλλο μετάλλου παραπλανούν, διότι ο έλεγχος του σύντομου αναγκαίου παλμού είναι δύσκολος. Γι' αυτό, για υψηλότερες ισχύς, το εργασιακό βάθος του εστιακού δείγματος, το οποίο φυσιολογικά θα είχε την επιφάνεια του τοποθετημένη στην ελάχιστη μέση θέση (που θα βρισκόταν με το καμένο αποτύπωμα στο ακρυλικό έλασμα), πρέπει να τοποθετηθεί στη θεωρητική θέση εστίασης π.χ στο μήκος εστίασης του οπτικού εξοπλισμού. Με αυτή την προσέγγιση, μπορεί να είναι αναγκαίο να γίνει μια δεύτερη σειρά από δοκιμασίες ή να χρησιμοποιηθούν αρχικά περισσότερα από 5 δείγματα για τις ροές λιωσίματος, γιατί το ανώτερο βάθος διείδυσης, που δείχνει την ελάχιστη μέση διάμετρο, μπορεί πιθανότατα να συμβεί σε ένα δείγμα διαφορετικό από αυτό που συμπίπτει θεωρητικά η θέση εστίασης.





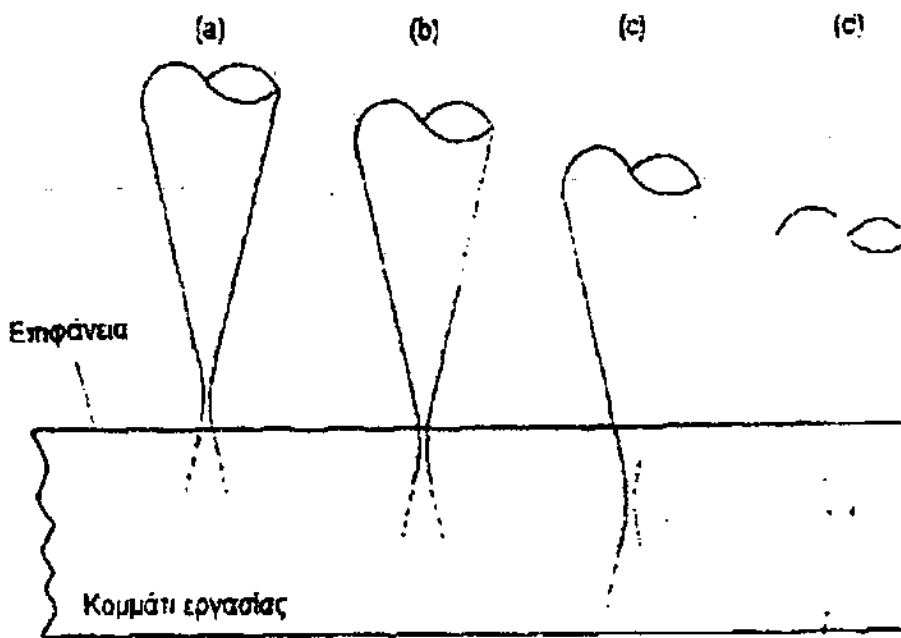
Σχήμα 4.17: Μέθοδος (με διαφορετικού πάχους κομμάτια) εύρεσης του πρακτικού βάθους εστίασης

Η εναλλακτική λύση είναι να χρησιμοποιηθεί ένα μακρύ, ρηχό, κωνικό και σφηνοειδές δείγμα. Παρ' όλα αυτά, η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει πρακτικές δυσκολίες, στο να πάρει κανείς και να γυαλίσει τομείς κοντά και σε σχέση με το υπολογισμένο εστιακό εργασιακό βάθος των άκρων εστίασης.

Ο χαμηλός ενανθρακωμένος χάλυβας συνίσταται για τεστ δειγμάτων, διότι μπορεί εύκολα να πριονιστεί, ώστε να εμφανίσει τη ροή του λιωμένου laser του βάθους διείσδυσης, και αν οι συνθήκες γυαλίσματος και τριψίματος δεν είναι εύκολα διαθέσιμες, μπορεί εύκολα να ταξινομηθεί ή να κατεργαστεί, και μετά να γυαλιστεί τρίβοντας το με ένα κομμάτι χαρτιού βρεγμένο με καρβίδια σιλικόνης, απλωμένο σε ένα κομμάτι επίπεδου γυαλιού, και δουλεύοντας μέσα από τα επίπεδα χαρτιού, αν είναι απαραίτητο. Επιπλέον, για να εμφανισθεί το βάθος της ροής λιωσίματος πιο καθαρά, ο χάλυβας μπορεί να χαραχθεί πιο εύκολα βυθίζοντας τον σε διάλυμα Νιτάλ (2ml νιτρικού οξέος, 98m βιομηχανικού διαλύματος μεθανόλης) και μετά ξεπλένοντας προσεκτικά σε νερό και στεγνώνοντας. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας χάραξης, πρέπει να προστατευτούν τα μάτια και να φορεθούν λαστιχένια γάντια.

## Θέση εστίασης

Το εστιακό σημείο ή η ελάχιστη μέση θέση διαμέτρου σε σχέση με την επιφάνεια εργασίας, πρέπει να επιλεγθούν προσεκτικά, για να διασφαλιστεί η σωστή ισχύπυκνότητας του laser και να δημιουργηθεί η οπή συγκόλλησης. Μεταξύ μερικών ερευνητών, εμφανίζεται να υπάρχει μια εικασία, όταν πραγματοποιούνται αυτογενείς συγκολλήσεις (αυτές που γίνονται χωρίς την προσθήκη παρεμβύσματος) για το αν η θέση πρέπει να είναι πάνω από την επιφάνεια ή κάτω από αυτή. Όποια και αν είναι η περίπτωση, όταν παρεκκλίνει το εργασιακό βάθος εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια κομματιού είναι ασύνετο, διότι οι μικρές αποστάσεις θα προκαλέσουν διακυμάνσεις στην ακτίνα της διαμέτρου, ειδικά σε μικρούς αριθμούς  $f$ , όπου οι γωνίες σύγκλισης και απόκλισης της ακτίνας είναι μεγάλες. Το πρόβλημα, που περιγράφεται σχηματικά στο σχήμα 4.18 και το σημείο που πρέπει να λάβει κανείς υπόψη του, είναι ότι μικρές αλλαγές στη διάμετρο, παράγουν μεγάλες αλλαγές στην περιοχή η οποία παράγει μια αντίστοιχη μείωση της ισχύς πυκνότητας και την απώλεια δυναμικού στην ικανότητα οπής. Για παράδειγμα, αν το μέγεθος του εστιακού σημείου διπλασιαζόταν για μια δεδομένη ισχύ laser, η περιοχή θα ήταν τέσσερις φορές μεγαλύτερη και η πυκνότητα ισχύος θα ήταν μόνο το ένα τέταρτο αυτής που θα είχε επιτευχθεί με το αρχικό μέγεθος σημείου. Που θα έπρεπε όμως να είναι η θέση εστίασης ; Θα πρέπει να είναι η θέση που δίνει το μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης και τα οποία μπορεί να πάρει κανείς από τα αποτελέσματα που προκύπτουν όταν εγκαθιστά το εργασιακό βάθος εστίασης. Από εμπειρία, αυτό συνήθως εμφανίζεται να είναι στην ελάχιστη μέση διάμετρο ή μόνο στη μια πλευρά της, κάτι που δείχνει ότι η ελάχιστη μέση θέση δεν εγκαταστάθηκε ακριβώς από την αρχή ή ότι πραγματικά η καλύτερη θέση εστίασης είναι στη μια πλευρά της. Όποια και αν είναι η περίπτωση, η θέση πρέπει πάντα να εγκαθίσταται πρακτικά ώστε να εξασφαλίζει τις καλύτερες διαδικασίες ανοχής και γι αυτό το λόγο, το κατά πόσο η πραγματική ελάχιστη μέση θέση είναι πάνω στην επιφάνεια εργασίας ή όχι, δεν αποτελεί την κύρια σπουδαιότητα. Όταν πραγματοποιούνται κολλήσεις που απαιτούν την προσθήκη παρεμβύσματος, η θέση εργασίας της μέσης εστιασμένης ακτίνας laser πρέπει να υπολογιστεί σε σχέση με τη θέση του παρεμβύσματος, το κενό ενώσεως και το βάθος. Κατά συνέπεια, σε σχέση με την γεωμετρία ενώσεως, η ακτινοβολία της ακτίνας laser (είτε είναι εστιασμένη είτε όχι), μέσω του σύννεφου πλάσματος, γίνεται σημαντική.



Σχήμα 4.18

Οι συνέπειες της θέσης εστίασης της ακτίνας laser στην επιφάνεια εργασίας, όταν απομακρύνεται το βάθος εστίασης. Η προσπίπτουσα ακτίνα (a) εφαρμόζεται στο χαμηλότερο σημείο του βάθους εστίασης η ακτίνα (b) μετατοπίζεται σε χαμηλότερο σημείο και οι διαμέτροι των ακτίνων  $\alpha$  και  $\beta$  είναι όμοιες. Η ακτίνα c μετατοπίζεται σε χαμηλότερο σημείο, σε απόσταση ίση με το βάθος εστίασης και (d) διπλάσια απόσταση.

Αυτές οι κινήσεις προκαλούν δραματικές αλλαγές στην ισχύ πυκνότητας του laser και είναι πολύ δύσκολο να επαναρυθμιστεί.

#### 4.4.2 Προστατευτικά αέρια, προστατευτικές μηχανές και καταστολή πλάσματος Ο ρόλος του προστατευτικού αερίου

Στη συγκόλληση με laser το προστατευτικό αέριο έχει 2 ρόλους :

- > Την προστασία της οπής συγκόλλησης και του στερεοποιημένου τηγμένου μετάλλου από οξειδωση. Έτσι αποφεύγεται η πορώδης κατάσταση και οι προσθήκες οξειδίων που συμβάλλουν στη φτωχή ποιότητα συγκόλλησης

- > Την προστασία της μετάδοσης της ακτίνας laser καθώς επέρχεται στην εστίαση από την εργασία, και την εξασφάλιση καλής συγκολλητικής διείδυσης, ελαχιστοποιώντας τη διαστολή της ακτίνας και τη διασκόρπιση της, που μπορεί να συμβεί από ατμούς και αέρια γύρω από την οπή συγκόλλησης. Ο πρώτος από αυτούς τους

ρόλους πετυχαίνεται με αρκετά αέρια, αλλά ο δεύτερος είναι πιο δύσκολος. Κατά την διάρκεια της εξαγωγής του ατμοποιημένου μετάλλου από την οπή, απορροφά την ισχύ του laser, ιονίζεται και διαμορφώνει ένα σύννεφο πλάσματος, ακριβώς πάνω από την οπή συγκόλλησης. Το σύννεφο έχει τη μορφή σαν μια αστραφτερή μπλέ/άσπρη μπάλα, διαμέτρου λίγων χιλιοστών, και στις υψηλές ισχύς laser είναι εξαιρετικά δύσκολο να το δει κανείς, εκτός αν κοιτάξει μέσα από ένα χρωματιστό γυαλί. Είναι επίσης μερικώς διαφανές από την ακτίνα laser, και αν δεν μειωθεί αρκετά, θα διασκορπίσει και θα διαστέλλει την ακτίνα laser από τη δίοδο της, προκαλώντας μείωση του συγκολλητικού βάθους διείσδυσης, λόγω της ελάτωσης της ισχύος πυκνότητας. Κάτω από σωστές συνθήκες, τα κατάλληλα προστατευτικά αέρια, καταστέλλουν τη μορφή του πλάσματος και εξασφαλίζουν την maximum μετάδοση της ακτίνας laser, και την απορρόφηση της από το κομμάτι.

Τα πιο κοινά προστατευτικά αέρια που χρησιμοποιούνται για συγκόλληση με laser είναι το αργό, το διοξείδιο του άνθρακα, το ήλιο και το άζωτο. Αυτά τα διαφορετικά αέρια δεν έχουν τα ίδια αποτελέσματα, αν χρησιμοποιηθούν σε CO<sub>2</sub> και σε Nd:YAG laser. Σαν σύγκριση ο ρόλος της καταστολής του πλάσματος στα Nd:YAG laser είναι ασήμαντος, λόγω του διαφορετικού μήκους κύματος φωτός και της παλμικής μορφής της λειτουργίας, που ελαχιστοποιεί την δημιουργία πλάσματος. Τα προστατευτικά αέρια και μηχανές για αυτούς τους δυο τύπους laser, περιγράφονται ξεχωριστά παρακάτω.

### **Προστατευτικά αέρια για συγκόλληση με Nd:YAG laser**

Ορισμένες φορές, μπορούν να επιτευχθούν ικανοποιητικές σημειακές συγκολλήσεις με Nd:YAG laser χωρίς την χρησιμοποίηση προστατευτικών αερίων. Αυτό συμβαίνει διότι η συγκόλληση είναι τηγμένη για πολύ λίγο χρονικό διάστημα, και δεν προλαβαίνουν να εισχωρήσουν επιβλαβή οξειδία, πριν συμβεί η στερεοποίηση. Παρ'όλα αυτά η επιφάνεια του σημείου οξειδώνεται και εμφανίζεται «καπνιά» από το εξατμισμένο μέταλλο. Όταν πραγματοποιούνται συνεχής συγκολλήσεις (ραφής ή εφαπτόμενες) με υπερκαλυπτόμενα σημεία, εισχωρούν οξειδία και «καπνιά» στην συγκολλητική «πισίνα». Σε αυτές τις συγκολλήσεις είναι απαραίτητα τα προστατευτικά αέρια, για να προλαμβάνουν τέτοιες «μολύνσεις» και να διατηρείται ασφαλής η ποιότητα συγκόλλησης. Για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούνται αέρια, όπως το αργό ή το άζωτο (το άζωτο μπορεί να προκαλέσει σκληρότητα στους χάλυβες), σε laser με ισχύ περίπου 300W. Σε επίπεδα ισχύος άνω των 300W, τα προστατευτικά αέρια γίνονται πιο επιβεβλημένα, και επηρεάζουν το βάθος διείσδυσης της κόλλησης και την εμφάνιση της. Πάντως οι χειριστές των Nd:YAG lasers υψηλής ισχύος, δουλεύοντας σε ισχύ κατά μέσο όρο 1KW, έχουν μειώσει το πρόβλημα της

διείσδυσης χρησιμοποιώντας 20% διοξείδιο του άνθρακα, 80% αργό ή αργό με προσθήκη 1-2% μίγμα οξυγόνου. Πάντως, αυτά τα μίγματα αερίων παράγουν ελάχιστη οξείδωση στην επιφάνεια συγκόλλησης.

Δοκιμές συγκολλήσεων με Nd:YAG laser στην Ιαπωνία, με προστατευτικά αέρια ήλιο και άζωτο, έδειξαν περίπου ίδια βάθη διείσδυσης της συγκόλλησης και με τα δυο αέρια. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας ήλιο, συμβαίνει περισσότερο η πορώδεις κατάσταση.

### **Προστατευτικά αέρια για συγκόλληση με CO<sub>2</sub> laser**

Όταν πραγματοποιείται συγκόλληση με CO<sub>2</sub> laser, η έλλειψη της διείσδυσης της κόλλησης που προκαλείται από την μορφή του πλάσματος, επικρατεί μόνο όταν χρησιμοποιείται λάθος προστατευτικό αέριο ή όταν υπάρχει συνδυασμός υψηλής ισχύος laser και χαμηλής ταχύτητας συγκόλλησης (συνήθως μικρότερη του 1 m/min και συγκεκριμένα κάτω από 0.7m/min). Σε περίπτωση πολύ χαμηλής ταχύτητας, χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός προστατευτικού αερίου, συνδυάζοντας ένα κύριο προστατευτικό αέριο και ένα ειδικό μηχάνημα καταστολής του πλάσματος, που περιγράφεται παρακάτω.

Όπου η ταχύτητα συγκόλλησης είναι πάνω από 1m/min, ο αποτελεσματικός έλεγχος του πλάσματος επιτυγχάνεται με απλά προστατευτικά μηχανήματα και την σωστή επιλογή κατάλληλων τύπων αερίων. Επομένως, από τη στιγμή που η συγκόλληση με CO<sub>2</sub> laser συμβαίνει με ταχύτητες πάνω από 1 m/min, η επιλογή των προστατευτικών αερίων και των αντίστοιχων μηχανών, πρέπει να γίνει πριν αρχίσει η λειτουργία της συγκόλλησης. Το ήλιο αποτελεί το καλύτερο από τα κοινά προστατευτικά αέρια, για τη διαμόρφωση και την υψηλή ποιότητα της συγκόλλησης με CO<sub>2</sub> laser. Αυτό συμβαίνει διότι το ήλιο έχει το υψηλότερο δυναμικό ιονισμού, που πρακτικά σημαίνει ότι απορροφά μεγαλύτερη ενέργεια πριν κατακαθήσει και πριν δημιουργηθεί μη αποδεκτή μορφή πλάσματος.

Είναι ελαφρύτερο του αέρα, δεν αιωρείται στη ζώνη συγκόλλησης για πολλή ώρα και δεν προσβάλλει την ποιότητα της. Επίσης το ήλιο συνίσταται για συγκολλήσεις με CO<sub>2</sub> laser όπου απαιτούνται υψηλής ποιότητας συγκολλήσεις και ειδικά συνίσταται για συγκολλήσεις ανοξειδωτων χαλύβων και υλικών, όπως τιτάνιο και ζirkόνιο, όπου η ποιότητα δεν πρέπει αυστηρά να προσβάλλεται από οξείδωση. Το μειονέκτημα της χρήσης του ηλίου είναι το υψηλό κόστος του. π.χ στην Μεγάλη Βρετανία το ήλιο κοστίζει 2,5 φορές περισσότερο από το αργό και 10 φορές περισσότερο από το διοξείδιο του άνθρακα και το άζωτο. Το άζωτο συμπεριφέρεται σχεδόν όμοια με το ήλιο, στην περίπτωση της μορφής του μη αποδεκτού πλάσματος. Όμως όσον αφορά την ποιότητα συγκόλλησης, προκαλεί θραύση της

συγκόλλησης σε ορισμένους χάλυβες, και πρέπει να χρησιμοποιείται με σύνεση σε συγκολλήσεις που απαιτούν υψηλή ποιότητα και αξιοπιστία.

Πάντως, γενικά, με το άζωτο επιτυγχάνεται αποδεκτή ποιότητα συγκόλλησης για αρκετές εφαρμογές και αποτελεί το πιο διαδεδομένο προστατευτικό αέριο για συγκολλήσεις χαλύβδινων ελασμάτων. Το διοξείδιο του άνθρακα, δεν συνίσταται για συγκολλήσεις με CO<sub>2</sub> laser που η λειτουργία του πραγματοποιείται με συνεχές κύμα, διότι το διοξείδιο του άνθρακα αντιδρά πολύ γρήγορα με την εστιασμένη ακτίνα laser προσβάλλει τη συγκόλληση και δημιουργεί μη αποδεκτό σύννεφο πλάσματος. Το σύννεφο είναι εξαιρετικά λαμπερό, αντανακλά το φως του laser προς τα πίσω και καταστρέφει την οπτική εστίαση. Σε συνεργασία με όλα τα παραπάνω, μπορεί να συμβεί και απώλεια της διείσδυσης της συγκόλλησης σε πολύ μικρό μήκος κόλλησης. Όταν χρησιμοποιείται CO<sub>2</sub> laser σε λειτουργία σημειακής συγκόλλησης με παλμικό κύμα, έχουν αναφερθεί καλές διεισδύσεις συγκόλλησης, χρησιμοποιώντας διοξείδιο του άνθρακα. Η παλμική λειτουργία και η μικρή διάρκεια συγκόλλησης, δεν παρέχουν αρκετό χρόνο για την δημιουργία του μη αποδεκτού πλάσματος, και έτσι επιτυγχάνεται αποδεκτή συγκόλληση.

Το αργό είναι εξαιρετικά καλό αέριο για την αποφυγή οξειδωσης. Παρ'όλα αυτά δημιουργεί πολύ γρήγορα το μη αποδεκτό σύννεφο πλάσματος, όπως το διοξείδιο του άνθρακα. Όταν χρησιμοποιείται σε CO<sub>2</sub> laser με συνεχές κύμα και κάτω από συνθήκες όπου το αργό είναι βαρύτερο από τον αέρα και δεν διαφεύγει από τη ζώνη συγκόλλησης, λιμνάζει και ξαφνικά (συχνά σε μια απόσταση 100mm από την αρχή της συγκόλλησης) δημιουργεί πυκνό πλάσμα, που προκαλεί ξαφνική απώλεια της διείσδυσης της κόλλησης.

Αυτό συμβαίνει σε περιπτώσεις όπου το αργό δεν ωθείται έξω από την λειτουργία, από το εισερχόμενο φρέσκο προστατευτικό αέριο από την μηχανή. Γενικότερα το αργό συνίσταται σε περιπτώσεις όπου μπορεί γρήγορα να απομακρυνθεί από τη ζώνη συγκόλλησης, με τη βοήθεια της βαρύτητας ή με μηχανική εξαγωγή. Πάντως το αργό είναι χρήσιμο για να συνδυαστεί με άλλα επικαλυπτόμενα αέρια, για την προστασία της σπής συγκόλλησης στα τελικά στάδια της στερεοποίησης και ψύξεως. Η χρήση του αργού σε αυτές τις περιπτώσεις, παρέχει αρκετή οικονομία και κέρδος, σε σχέση με τη χρήση ήλιου για την κατασκευή μεγάλων κατά μήκος συγκολλήσεων και όπου απαιτείται μεγάλη σειρά παραγωγής.

### **Παροχή αερίου (για CO<sub>2</sub> laser και Nd:YAG laser)**

Για μαζική παραγωγή συγκολλήσεων, η πιο κατάλληλη επιλογή για προστατευτικό αέριο, είναι η πιο φτηνή σε συνδυασμό με την ελάχιστη ποσότητα, που θα παρέχει σταθερές κολλήσεις, που θα καλύπτουν επαρκώς τις απαιτήσεις χρήσεως. Κατά συνέπεια, η παροχή

αερίου είναι ένας σημαντικός παράγοντας όσον αφορά την ποιότητα συγκόλλησης και το κόστος.

Η απαιτούμενη παροχή αερίου είναι συνήθως εξαρτώμενη από την ισχύ του laser, την πρόσβαση στην ένωση και τον περιορισμό της. Όταν συγκολλούνται επίπεδα ελάσματα χάλυβα ή άλλα εξαρτήματα εύκολα προσβάσιμα στην ένωση, σε ισχύ 3KW, παροχή αερίου μεταξύ 10 ως 20lt/min θεωρείται ικανοποιητική. Σε ισχύ μεταξύ 3 και 5KW συνίσταται παροχή 15 ως 30 lt/min, ενώ σε ισχύ μεταξύ 10-15KW συνίσταται παροχή 25-40 lt/min. Πρέπει να τονισθεί ότι οι παροχές αυτές για χάλυβα δεν αποτρέπουν την οξείδωση των σταγόνων συγκόλλησης που συμβαίνουν διαμέσου της υπολειπόμενης θερμοκρασίας μετά την δημιουργία των σταγόνων.

Όταν συγκολλούνται υλικά επιρρεπή στην οξείδωση, όπως το τιτάνιο και το ζirkόνιο, και επίσης η πρόσβαση στις ενώσεις είναι δύσκολη, μπορεί να κριθούν απαραίτητες κάποιες δοκιμές στην παροχή του προστατευτικού αερίου. Αυτές οι δοκιμές επίσης αναφέρονται και στις συγκολλητικές εφαρμογές, όπου απαιτούνται πολύ καλή ποιότητα συγκόλλησης, όπως πυρηνικά και αεροδιαστημικά εξαρτήματα.

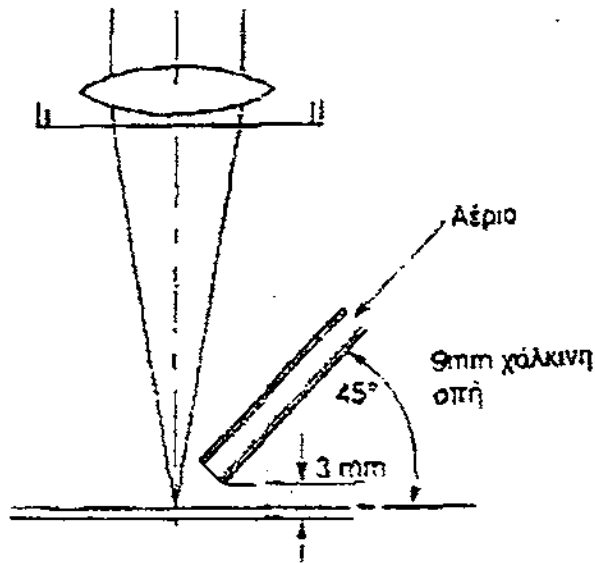
Καθώς η επιλογή της παροχής του προστατευτικού αερίου είναι σημαντική και από πλευράς ποιότητας και από πλευράς οικονομίας, πρέπει να δοθεί προσοχή και στη σωστή μέτρηση της. Για ακρίβεια, πρέπει να επιλεγεί ένας μετρητής όπου η απαιτούμενη παροχή πέφτει στο ένα τρίτο της μετρητικής σκάλας. Τέλος πρέπει να δοθεί προσοχή στην ρύθμιση του μετρητή παροχής για την σωστή εξασφάλιση της.

## **Μηχανές προστατευτικών αερίων**

### **Nd:YAG laser**

Για την συγκόλληση με Nd:YAG laser, μια απλή σωληνωτή μονόπλευρη μηχανή προστατευτικού αερίου φαίνεται στο σχήμα 4.19. και χρησιμοποιείται όπου απαιτείται ακρίβεια στις σημειακές κολλήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι η πλευρά της σωλήνωσης παρέχει καλή πρόσβαση στην περιοχή του σημείου συγκόλλησης. Όταν συγκολλούνται ενώσεις με συνεχή ραφή, χρησιμοποιείται μια δακτυλιοειδής αξονική μηχανή ως προς την ακτίνα laser, που παρέχει, αποτελεσματική προστασία στη συγκόλληση και η ευθυγράμμιση της δεν είναι τόσο κρίσιμη, όσο της μονόπλευρης σωληνωτής μηχανής. Επίσης μηχανές με αξονικά ακροφύσια είναι πιο πρακτικά, όταν τη μηχανή του laser χειρίζεται robot. Τέλος παρέχουν την κάλυψη της ολίσθησης των οπτικών εξαρτημάτων και την προστασία από το «πιτσιλίσμα» της συγκόλλησης, διότι η δύναμη, της ροής του αερίου αντιτάσσει κάθε υλικό να εισχωρήσει στη δίοδο της ακτίνας.

Σχήμα 4.19. Μια πολύπλευρη σωλήνωση προστατευτικού αερίου κατάλληλη για Nd:YAG laser και για CO<sub>2</sub> laser

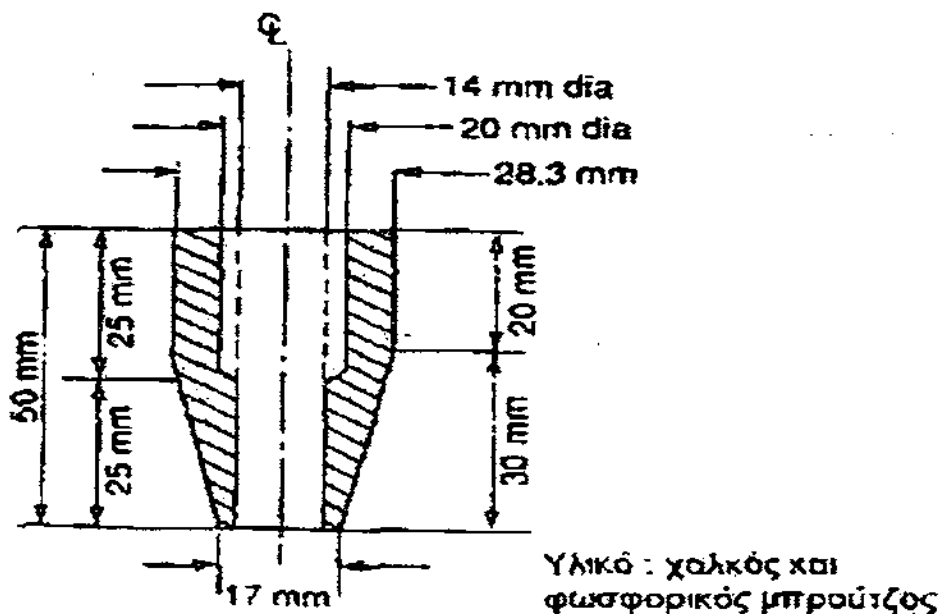


### CO<sub>2</sub> laser

Τα πλεονεκτήματα της μηχανής με αξονικά ακροφύσια που περιγράφηκαν στα Nd:YAG laser, ισχύουν και στα CO<sub>2</sub> laser όταν λειτουργούν σε επίπεδα ισχύος της τάξεως περίπου 5KW και άνω. Πολύ πάνω από αυτό το επίπεδο, αυξάνεται η πιθανότητα σχηματισμού μη αποδεκτού σύννεφου πλάσματος στην είσοδο του ακροφυσίου, καταστρέφοντας την ικανότητα εστίασης της ακτίνας laser.

Ένα απλό σχέδιο ενός μηχανήματος με αξονικά ακροφύσια για συγκόλληση με CO<sub>2</sub> laser, φαίνεται στο σχήμα 4.20. Τέτοιο μηχάνημα είναι κατάλληλο για γρήγορες συγκολλήσεις χάλυβα (με ταχύτητα μεγαλύτερη του 1m/min), με ένωση βάθους περίπου 4mm και ισχύ περίπου 5KW, και την πρόσβαση του μηχανήματος στην επιφάνεια ένωσης σε απόσταση περίπου 6mm. Η διάμετρος του στομίου του ακροφυσίου δεν είναι κρίσιμη και κυμαίνεται από 4mm ως 20 mm, χρησιμοποιώντας το σε συνεργασία με παροχή από 10lit/min ως 40lit/min. Πάντως πρέπει να τονιστεί ότι στόμια με διάμετρο λιγότερο των 4mm, προκαλούν πορώδες κατάσταση, σε αυτές τις παροχές. Αυτό οφείλεται λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης των αερίων και την προκύπτουσα μεγάλη ταχύτητα τους, που επιτρέπει στα αέρια την εισχώρηση τους στην οπή συγκόλλησης και τον εγκλωβισμό τους.





Σχήμα 4.20: Τομή ενός ακροφυσίου προστατευτικού αερίου που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα Nd:YAG laser

### Καταστολή του πλάσματος

Όταν πραγματοποιείται συγκόλληση με CO<sub>2</sub> laser με συνεχή κύματα, σε ταχύτητες κάτω του 1m/min, η αλληλεπίδραση της ακτίνας laser και του υλικού οδηγεί στην αύξηση του ατμού ή της αποβολής του πλάσματος από την οπή συγκόλλησης. Αυτό αντιδρά με το προστατευτικό αέριο και αν δεν απομακρυνθεί έγκαιρα, δημιουργεί ένα εξαιρετικά πυκνό σύννεφο πλάσματος, ακριβώς πάνω από την οπή. Το σύννεφο, που εμφανίζεται σαν μια μικρή, λαμπερή, μπλε μπάλα, με διάμετρο λίγων χιλιοστών, δεν είναι διαφανές από το φως του laser και αντανακλά ποσοστό της ακτίνας laser προς όλες τις κατευθύνσεις πριν επέλθει στο σημείο εστίασης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την διασκόρπιση της ισχύος, πριν φτάσει στην επιφάνεια του υλικού, επεκτείνοντας την συγκολλητική ζώνη τήξεως κοντά στην επιφάνεια και μειώνοντας την συγκολλητική διείσδυση. Η πιο απλή αποκατάσταση του προβλήματος είναι η αύξηση της ισχύος του laser και η αύξηση της ταχύτητας της συγκόλλησης. Αυτό όμως δεν είναι πάντα εφικτό, κυρίως όταν συγκολλούνται λεπτά ελάσματα και απαιτείται η ελάχιστη ισχύς του laser. Έτσι, απαιτείται μια εναλλακτική λύση, που δεν είναι άλλη, από τα μηχανήματα καταστολής πλάσματος, που τοποθετείται μέσα στο προστατευτικό αέριο, κατά τη ρύθμιση του. Το σχήμα 4.21 δείχνει τομές που έχουν παρθεί από τη ροή λιωσίματος, κατασκευασμένη με και χωρίς την καταστολή πλάσματος σε πάχος χάλυβα 12mm και διάφορες ταχύτητες, από

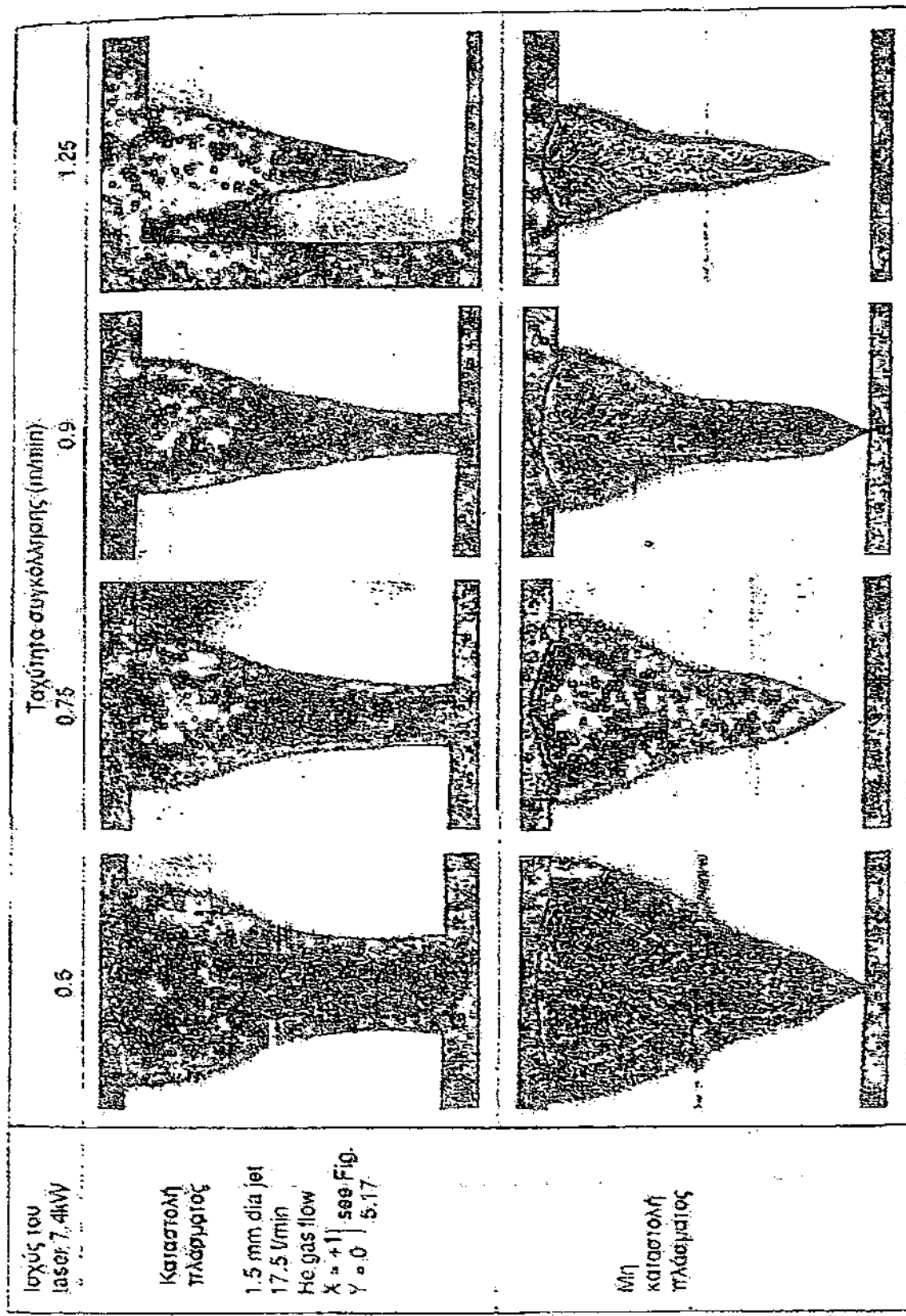
0,5 ως 1,25m/min, χρησιμοποιώντας ισχύ του laser 7,4KW στην εργασία.

Το μηχάνημα καταστολής του πλάσματος είναι ένα μικρό ακροφύσιο σε γωνία 45° και βοηθάει στην εκτόξευση συνεχούς ροής αερίου ηλίου στο σύννεφο πλάσματος, μετακινώντας το και αφήνοντας, την επιφάνεια ελεύθερη. Η ευθυγράμμιση της ροής του ηλίου, της ακτίνας laser και της μέγιστης επίδρασης του πλάσματος πρέπει να είναι ακριβής. Το ακροφύσιο ενσωματώνεται με τα προστατευτικά αέρια και δημιουργούν μια πολύ ισχυρή πλατφόρμα, για την καταπολέμηση και την απομάκρυνση, του πλάσματος.

Το σημείο συνεργασίας της ροής του ηλίου και της ακτίνας laser, η απόσταση της άκρης του ακροφυσίου από την οπή συγκόλλησης και της παροχής του προστατευτικού αερίου είναι σημαντικά, και πρέπει να εφαρμόζονται αναλόγως με το πόσο δυνατή είναι η εστίαση της ακτίνας laser. Η εμπειρία έχει δείξει ότι οι ανοχές είναι πιο σφικτές όταν χρησιμοποιούνται μορφές ακτίνων laser υψηλά εστιασμένες. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση της οξύτητας, προκαλεί την αύξηση της εξάτμισης και την μορφή της οπής με ένα πολύ μικρό άνοιγμα, στο οποίο υπάρχει ροή πλάσματος με μεγάλη ταχύτητα και παροχή αερίου για να το καταβάλλει και να το σταματήσει.

Για την εγκατάσταση του μηχανήματος καταστολής πλάσματος σε σχέση με την εστιασμένη ακτίνα laser, πρέπει κάποιος να βρει τη θέση εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια εργασίας.

Έχοντας προκαθορίσει τη θέση εστίασης, συνίσταται η παρακάτω τεχνική για την ακριβή τοποθέτηση του ακροφυσίου. Ένα επίπεδο χαλύβδινο φύλλο μετάλλου τοποθετείται και σφίγγεται στο τραπέζι εργασίας με την επάνω επιφάνεια στη θέση εστίασης της ακτίνας. Μετά σε πολύ μικρή ισχύ (2-3KW), ανοίγεται η μηχανή του laser για πάρα πολύ μικρό χρονικό διάστημα (εκατοστά του δευτερολέπτου), για να δημιουργηθεί ένα τηγμένο σημείο στην επιφάνεια του φύλλου μετάλλου. Η θέση της διαφανούς ακτίνας από το HeNe ευθυγραμμισμένο laser πρέπει να βρίσκεται στον ίδιο άξονα όπως η ακτίνα του CO<sub>2</sub> laser. Έτσι το ακροφύσιο τώρα μπορεί να προσαρμοστεί, και αν είναι απαραίτητο να συμπίπτει, με το κέντρο του τηγμένου σημείου. Ένα ελικοειδές τρυπάνι, με την ίδια διάμετρο όπως και η διάμετρο του ακροφυσίου του μηχανήματος της καταστολής του πλάσματος που χρησιμοποιήθηκε, μπορεί να εισαχθεί στο ακροφύσιο για να εξομοιώσει τη ροή του αερίου.



Σχήμα 4.21. Οι συνέπειες της καταστολής του πλάσματος στο βάθος και στη μορφή της συγκόλλησης, όταν συγκολλείται χάλυβας πάχους 12mm σε διαφορετικές ταχύτητες συγκόλλησης.

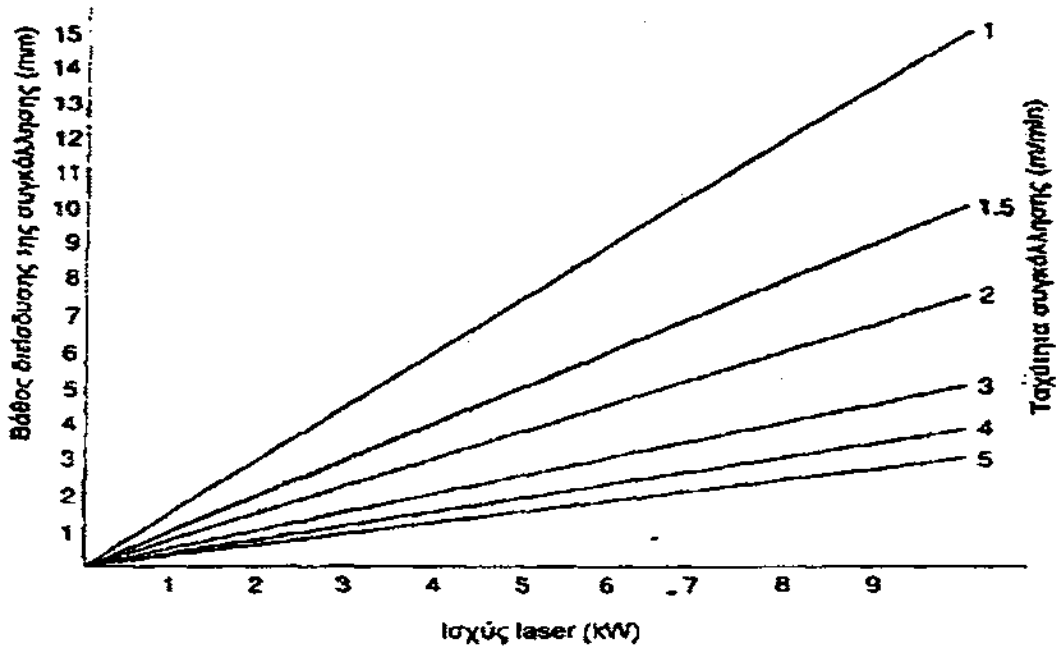
#### 4.4.3 Ισχύς του laser και ταχύτητα συγκόλλησης

Έχοντας περιγράψει τα απαραίτητα πρακτικά βήματα για τον εστιασμό της ακτίνας laser για την καλή εκτέλεση της συγκόλλησης και πώς εμπλουτίζεται αυτή με τα προστατευτικά αέρια, πρέπει να δοθεί προσοχή στον επηρεασμό της από την ισχύ του laser και την ταχύτητα της.

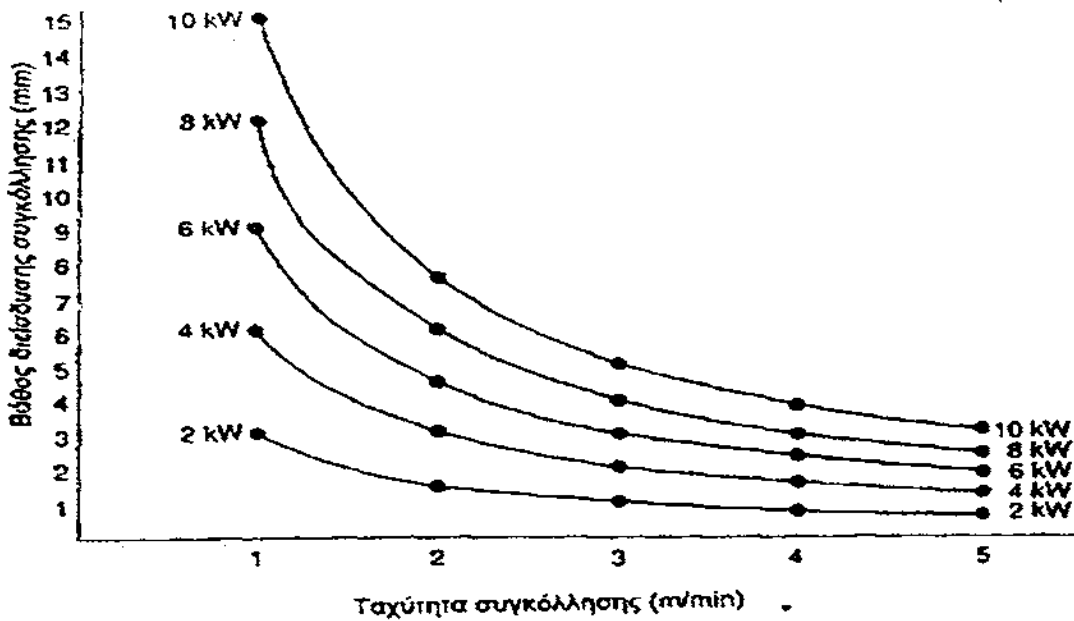
Η επήρεια αυτών των δυο παραμέτρων, όταν η συγκόλληση είναι συνεχής, είναι πιο κατανοητή στη λειτουργία των CO<sub>2</sub> laser με συνεχή μορφή κυμάτων, απ'ότι στα παλμικά Nd:YAG laser. Αυτό συμβαίνει διότι ο αριθμός Joule/παλμός δεν υποδηλώνει την πραγματική εσωτερική θερμότητα, από τη στιγμή που εξαρτάται από το μήκος παλμού και το εύρος του. Επιπλέον, η ταχύτητα συγκόλλησης εξαρτάται από την συχνότητα του παλμού και το επί τις εκατό ποσοστό υπερκάλυψης του κάθε σημείου.

#### Δημιουργία συνθηκών σε CO<sub>2</sub> laser

Η λειτουργία του CO<sub>2</sub> laser με συνεχής μορφή κύματος σε συγκόλληση χαλύβων, επιτυγχάνει βάθος διείσδυσης της κόλλησης 1,5mm για κάθε KW ισχύος, όταν χρησιμοποιείται σε σύζευξη με ταχύτητα συγκόλλησης 1m/min, αριθμό f οπτικής εστίασης από 8 ως 9 και το κατάλληλο προστατευτικό αέριο. Η σχέση αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη, όταν η ταχύτητα συγκόλλησης αυξάνει πάνω από 5m/min. Έτσι, τα γραφήματα των σχημάτων 4.22 και 4.23 μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ένας βασικός οδηγός για την επιλογή της αρχικής ισχύς του laser, για την απαιτούμενη ταχύτητα συγκόλλησης και το βάθος διείσδυσης ή και αντίθετα. Όταν χρησιμοποιούνται αυτά τα γραφήματα, πρέπει να τονιστεί ότι χαμηλότεροι αριθμοί f που χρησιμοποιούνται σε σύζευξη με μια δεδομένη ισχύ, αυξάνει την ταχύτητα συγκόλλησης, για μια δεδομένη διείσδυση.



Σχήμα 4.22: Τα βάθη της διείσδυσης συγκόλλησης που να επιτευχθούν σε χάλυβα, σε διαφορετικές ισχύς και ταχύτητες, όταν στο CO<sub>2</sub> laser χρησιμοποιούνται αριθμοί εστίασης 6-9.

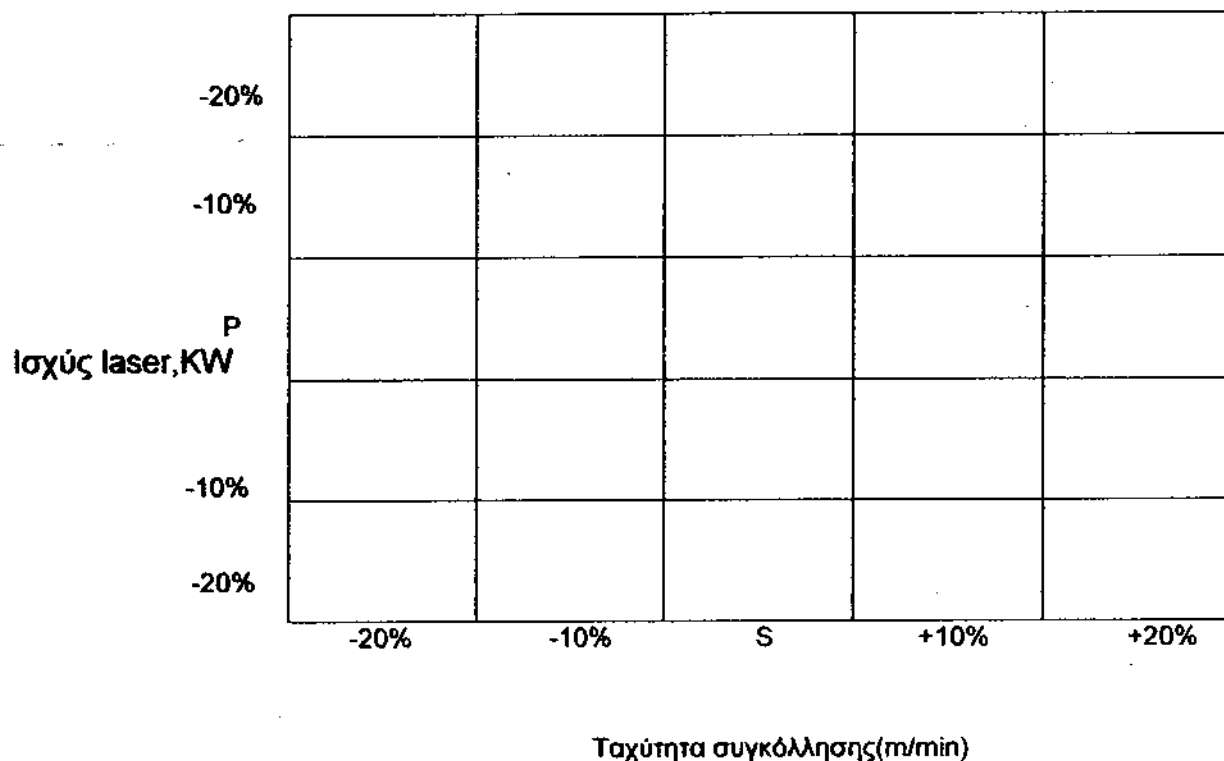


Σχήμα 4.23: Τα βάθη διείσδυσης συγκόλλησης που μπορούν να επιτευχθούν σε χάλυβα σε διαφορετικές ισχύς και ταχύτητες, όταν στο CO<sub>2</sub> laser χρησιμοποιούνται αριθμοί εστίασης f 6-9.

Ο εκλεγμένος συνδυασμός της ισχύος του laser και της ταχύτητας συγκόλλησης, τελικά, καθορίζουν την ενέργεια της συγκόλλησης ( $J/mm$  του μήκους συγκόλλησης) και συνεπώς τις εφαρμογές της συγκόλλησης και την μορφή της. Έστω και αν τα γραφήματα των σχημάτων 4.22 και 4.23 δίνουν έναν οδηγό της απαραίτητης ονομαστικής ισχύος για ένα δεδομένο βάθος διείσδυσης και ταχύτητας συγκόλλησης, το μήκος συγκόλλησης μπορεί να αποδειχτεί ακατάλληλο. Ευτυχώς, όταν πραγματοποιούνται πλήρως διεισδυτικές ενώσεις, μπορούν να γίνουν αυξήσεις της ενέργειας του laser, χωρίς τον κίνδυνο κατάρρευσης της συγκόλλησης (το τηγμένο μέταλλο ξεφεύγει από την ένωση με την επήρεια βαρύτητας) ή της δημιουργίας φυσαλλίδων, και συνεπώς το μήκος της συγκόλλησης μπορεί να αυξηθεί χωρίς την αλλαγή του αριθμού  $f$ , αυξάνοντας την ισχύ του laser ή μειώνοντας την ταχύτητα συγκόλλησης.

Έτσι, είναι φανερό ότι είναι απαραίτητοι κάποιοι πειραματισμοί για την δημιουργία αποτελεσματικών συνθηκών συγκόλλησης (ισχύς laser και ταχύτητα συγκόλλησης), για τη δημιουργία σωστής μορφής συγκόλλησης, για την επιβεβαίωση του απαιτούμενου αξιόπιστου βάθους συγκόλλησης και των αποδεκτών παραμέτρων ανοχής. Μια εύκολη μέθοδος αποτελεί η παραγωγή ενός συγκολλητικού καλύμματος, που θα παρέχει επίσης και τις απαιτούμενες ανοχές. Το κάλυμμα αυτό δημιουργείται με την παραγωγή ροής τήξεως σε δοκιμαστικά δείγματα και ακολουθώντας μια απλή διαδικασία. Τα εξαρτήματα που θα συγκολληθούν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν δοκιμαστικά δείγματα, αν αποτελούν φτηνής εμπορικής αξίας. Τα δείγματα αυτά πρέπει να υποστούν τομές, πριν πραγματοποιηθεί κάθε βήμα κατασκευής του συγκολλητικού καλύμματος. Επίσης τα πάχη τους πρέπει να είναι αυτά των απαιτούμενων βαθών διείσδυσης της κόλλησης ( $75 \times 25mm$  είναι ένα πρακτικό μέγεθος.)

Η διαδικασία κατασκευής του συγκολλητικού καλύμματος ξεκινάει με την επιλογή της ισχύος laser, που θα παράγει το απαιτούμενο βάθος διείσδυσης και την ταχύτητα συγκόλλησης. Για παράδειγμα, ας επιλέξουμε από το σχήμα 4.22 ισχύ  $4KW$  για βάθος συγκόλλησης  $3mm$  και ταχύτητα συγκόλλησης  $2m/min$ . Με αυτές τις συνθήκες χαράζουμε έναν πίνακα με άξονες την ισχύ του laser και την ταχύτητα συγκόλλησης. Οι άξονες αυτοί θα ποικίλλουν με βήματα  $+10\%$  και  $-10\%$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 4.24.



Σχήμα 4.24: Πίνακας που βεβαιώνει την αντίθεση της ισχύος και της ταχύτητας συγκόλλησης για ανθεκτικές συνθήκες. Η ισχύς (P) και η ταχύτητα (S) επιλέγονται από τα σχήματα 4.22 και 4.23 σε σχέση με το βάθος διείσδυσης.

Στις επιλεγμένες ισχύ και ταχύτητα (4KW και 2m/min) φτιάχνουμε μια ροή τήξεως στο δοκιμαστικό κομμάτι και αν είναι οπτικά ορατό το πλήρες βάθος διείσδυσης, τοποθετούμε ένα σημάδι (✓) στο αντίστοιχο κουτάκι στον πίνακα, όπου συναντιούνται η ισχύς και η ταχύτητα. Μετά τοποθετούμε σημάδια (✓) σε όλα τα κουτάκια προς τα πάνω κάθετα και οριζόντια προς τα αριστερά (πίνακας 4. V), όπου η ισχύς είναι 4KW και πάνω. Από την άλλη πλευρά, αν η ροή τήξεως αποτύχει να διεισδύσει, τοποθετούμε ένα σημάδι (X) στα κουτάκια κάθετα προς τα κάτω και δεξιά, όπου η ισχύς είναι 4KW και κάτω. Η πρώτη ροή τήξεως θα απομονώσει μια στερεή περιοχή στη γωνία του πίνακα όπου η διείσδυση μπορεί να επιτυχανθεί μπορεί και όχι. Αν η ροή τήξεως αποτύχει να διεισδύσει, τότε η ισχύς πρέπει να αυξηθεί κατά 10% (ή να μειωθεί η ταχύτητα συγκόλλησης αν δεν διατίθεται παραπάνω ισχύ) και οι πειραματισμοί επαναλαμβάνονται μέχρι να επιτυχανθεί η διείσδυση και τα κουτάκια συμπληρώνονται αναλόγως. Για το δικό μας παράδειγμα θα υποθέσουμε ότι η διείσδυση επιτυγχάνεται πλήρως με την πρώτη ροή τήξεως. Σε αυτή την περίπτωση η δεύτερη ροή τήξεως θα πρέπει να πραγματοποιηθεί με την ισχύ μειωμένη κατά 10% (3,6KW στην εργασία). Θα υποθέσουμε ότι δεν είναι οπτικά ορατή η πλήρης διείσδυση και κατά συνέπεια ο πίνακας συμπληρώνεται όπως δείχνει ο πίνακας 4.V.

4,8	✓	✓	✓	✓	
4,4	✓	✓	✓	✓	
4	✓	✓	✓		
3,6			X	X	X
3,2			X	X	X
	1,6	1,8	2	2,2	2,4

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.Υ

Από τον παραπάνω πίνακα μπορούμε να καταλάβουμε ότι το πλήρες βάθος διείσδυσης επιτυγχάνεται στις επιλεγμένες συνθήκες ισχύος και ταχύτητας, αλλά αν η ισχύ μειωθεί λίγο κάτω από 4KW θα συμβεί ανεπιθύμητο βάθος διείσδυσης. Μια ισχύ της τάξεως των 4,4KW και μια ταχύτητα 1,8m/min θα προσφέρει μια ολική ποικιλία ανοχής της τάξεως του 10%. Επίσης από τον πίνακα είναι φανερό ότι ισχύς 4KW και ταχύτητα 2,2m/min δεν είναι κατάλληλες συνθήκες για το απαιτούμενο βάθος διείσδυσης, λόγω της μείωσης της ενέργειας, αλλά αυξάνοντας την ισχύ στα 4,4KW στην ίδια ταχύτητα το βάθος διείσδυσης μπορεί να επιτυχανθεί, διενεργώντας μια τρίτη δοκιμασία ροής τήξεως. Αν αυτό δεν έχει επιτυχία, τότε μια τέταρτη δοκιμασία ροής τήξεως είναι απαραίτητη αυξάνοντας την ισχύ στο επίπεδο των 4,8KW. Σαν εναλλακτική λύση, τα αποτελέσματα του πίνακα μπορούν να μετακινηθούν προς τα δεξιά, μειώνοντας τον εστιακό αριθμό  $f$  και επαναλαμβάνοντας την εργασία. Όποιο και αν είναι το αποτέλεσμα, οι ροές των τήξεων πρέπει τελικά να δημιουργηθούν σε αυτούς τους συνδυασμούς της ισχύος και ταχύτητας όπου τα σημαδεμένα κουτάκια αντιπροσωπεύουν τις πρακτικές ανοχές εργασίες. Αυτή η πράξη είναι απαραίτητη για την διασφάλιση του αποδεκτού μήκους συγκόλλησης, και είναι σημαντική όταν συγκολλούνται λεπτές επιφάνειες.

Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να λυθεί, φτιάχνοντας κολλήσεις σε διαφορετικούς συνδυασμούς ισχύος και ταχύτητας, για πρακτικές αυξήσεις του διαθέσιμου εύρους ισχύος. Ύστερα από τις τομές των συγκολλήσεων, σχεδιάζουμε τα αποτελέσματα σε κάθε συνδυασμό ισχύος και ταχύτητας. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί πολύ χρόνο, αλλά αξίζει τον κόπο, αν απαιτείται ακριβής αναλογία μήκους κόλλησης και βάθους.



## Δημιουργία συνθηκών σε Nd:YAG laser

Όταν χρησιμοποιείται ένα παλμικό Nd:YAG laser, το βάθος διείσδυσης δεν είναι δυνατό να γενικευτεί για μία δεδομένη ισχύ laser και ταχύτητα συγκόλλησης. Αυτό συμβαίνει διότι, διαφορετικά μοντέλα παλμικού Nd:YAG laser λειτουργούν σε διαφορετικά συστήματα συγκόλλησης, που εξαρτώνται από τη μέση ισχύ, το μήκος παλμού και τους βαθμούς συχνότητας. Κατά συνέπεια, ορισμένα lasers μπορούν να επιτύχουν μόνο συγκόλληση με ραφή, παράγοντας μια σειρά από καλυπτόμενα σημεία συγκόλλησης. Άλλα παλμικά Nd:YAG laser μπορούν να επιτύχουν γρηγορότερες σημειακές συνεχείς κολλήσεις, με την ικανότητα τους να παράγουν μια συνεχής μετακινούμενη τηγμένη συγκολλητική «πισίνα» ή οπή.

Τα Nd:YAG laser με επίπεδα εξωτερικής ισχύος κάτω από 500W δεν μπορούν να επιτύχουν ισχύ πυκνότητας για συγκολλητική οπή και, κατά συνέπεια, οι κολλήσεις έχουν την ελάχιστη αγωγιμότητα. Σε χαμηλές ισχύς (λιγότερο των 400W) και σε απαραίτητα μήκη παλμού για την συγκόλληση (τυπικά 4-8ms), το βάθος διείσδυσης συνήθως, ελαχιστοποιείται στη διάμετρο του σημείου που παράγεται. Πάντως, οι διάμετροι των σημείων είναι συνήθως της τάξεως των 0,5-1mm και οι συγκολλήσεις είναι ιδανικές για πολύ λεπτά υλικά (π.χ λεπίδες ξυραφιών).

Οι ελάχιστες αγωγήμες συνεχείς κολλήσεις επιτυγχάνονται με καλυπτόμενα σημεία συγκόλλησης σε σχέση, με το χαμηλό επαναλαμβανόμενο ρυθμό, που είναι απαραίτητος για τα χαμηλής ισχύος lasers λόγω των απαιτούμενων μεγάλων παλμικών μηκών. Σαν αποτέλεσμα κάθε σημείο συγκόλλησης στερεοποιείται πριν ο παλμός (που φτιάχνει το επόμενο σημείο) συνεχίσει το ρυθμό του. Για την κατασκευή στεγανών συγκολλήσεων με αυτό τον τρόπο, η απαραίτητη κάλυψη του σημείου πρέπει να είναι τουλάχιστον 70%. Το καλυπτόμενο σημείο σε συνδυασμό με τον επαναλαμβανόμενο παλμό και την διάμετρο του σημείου (η ακριβής διάμετρος που παράγεται από ένα συγκεκριμένο σημείο συγκόλλησης), καθορίζουν την πιθανή ταχύτητα συγκόλλησης, που υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

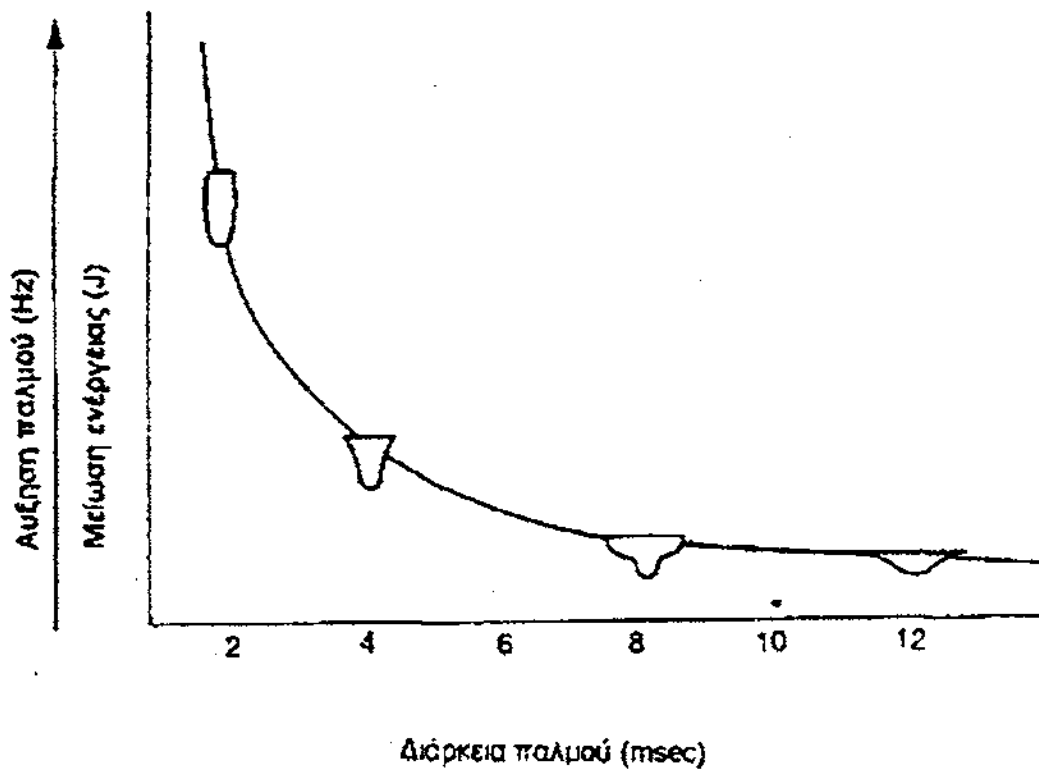
$$\text{Ταχύτητα συγκόλλησης(m/min)} = (\text{Διάμετρος σημείου(mm)} - \text{Μήκος υπερκάλυψης}) \times \text{Επαναλαμβανόμενος βαθμός(Hz)} \times 60$$

Σε ισχύς μεταξύ 400 και 600W και σε συνδυασμό με μικρά μήκη παλμών (τυπικά <5ms) και υψηλούς επαναλαμβανόμενους βαθμούς, η θερμότητα συγκόλλησης μπορεί να αυξηθεί στο επίπεδο που η στερεοποίηση δεν συμβαίνει μεταξύ των παλμών και η συγκολλητική «πισίνα» διατηρείται. Κατά συνέπεια η ταχύτητα συγκόλλησης δεν καθορίζεται

πια με τον προηγούμενο τύπο. Η νέα γενιά Nd:YAG lasers στηρίζονται σε αυτό το γεγονός και με τις υψηλές ισχύς (τυπικά μεγαλύτερες των 800W), τους μικρά χρονικά παλμούς (τυπικά μικρότεροι των 2ms) και τους υψηλά επαναλαμβανόμενους βαθμούς παλμών (τυπικά στα 500Hz), μπορούν να παράγουν και να διατηρήσουν την οπή μέσα στην εργασία με υψηλή αναλογία βάθους και μήκους. Πάντως, σε αυτά τα επίπεδα ισχύος, βαθύτερες κολλήσεις μπορούν να επιτυχανθούν με μεγαλύτερα μήκη παλμών και επαναλαμβανόμενους βαθμούς άνω των 25Hz.

Υπάρχει μια γενική κατεύθυνση της μορφής της συγκόλλησης που συμβαίνει, καθώς το μήκος παλμού και ο επαναλαμβανόμενος ρυθμός εναρμονίζονται σε σχέση με την ισχύ του laser. Η πορεία της μορφής της συγκόλλησης φαίνεται διαγραμματικά στο σχήμα 4.25. Το διάγραμμα επίσης δείχνει την ενέργεια της συγκόλλησης (joules) και την ενέργεια του παλμού που απελευθερώνεται από το laser, που μετριέται παίρνοντας ένα μικρό δείγμα από την ενέργεια συγκόλλησης καθώς φεύγει από το laser.

Η μορφή του παλμού είναι μια πιο πρόσφατη ευκολία στα Nd:YAG lasers και ορισμένα lasers προσφέρουν αξιόλογο έλεγχο που περιέχει έλεγχο στη μύτη του τρυπανιού και στην κοπή. Στην συγκόλληση, η μορφή του παλμού παρέχει τη χρήση του «προπαλμού». Αυτός ο προπαλμός είναι ένας πολύ μικρός παλμός με πολύ μεγαλύτερο μέγεθος, από τον άμεσο ακόλουθο κύριο παλμό. Είναι χρήσιμος για συγκόλληση υψηλών ανακλαστικών υλικών, διότι εξασφαλίζει γρήγορη ζεύξη της ακτίνας laser μέσα στην εργασία. Αντίστροφα, ένας μικρός μεγέθους και επιμήκης προπαλμός, προπορευόμενος από έναν μεγαλύτερου μεγέθους κύριου παλμού, μπορεί να ελαχιστοποιήσει την διαπεραστικότητα, όταν συγκολλούνται πολύ λεπτά φύλλα μετάλλου, που απορροφούν πολύ το φως του laser.



Σχήμα 4.25: Η πορεία της μορφής της συγκόλλησης σε σχέση με την διάρκεια του παλμού όταν συγκολλούμε με Nd:YAG laser.

Για την δημιουργία των συνθηκών συγκόλλησης, πρέπει πρώτα να αποφασιστεί το βάθος διεσόδου της συγκόλλησης και το απαιτούμενο σχήμα. Ένα τυπικό Nd:YAG laser των 250W μπορεί άνετα να επιτύχει 1,5mm βάθος σε χάλυβα και ένα laser 1 KW μπορεί να επιτύχει βάθος 5mm. Αν πρέπει να κατασκευαστούν σημειακές κολλήσεις, αυτές οι ισχύς των laser μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν οδηγός για το μέγεθος του απαιτούμενου laser. Το σχήμα 4.25 μπορεί να υποδηλώσει το απαραίτητο μήκος του παλμού, για να δώσει το απαιτούμενο σχήμα του συγκολλητικού σημείου. Από την άλλη πλευρά, αν απαιτούνται συνεχής κολλήσεις, κρίνονται απαραίτητοι κάποιοι πειραματισμοί με τις υψηλές ισχύς για το καθορισμό της ταχύτητας συγκόλλησης. Δοκιμασίες έχουν δείξει ότι μπορεί να επιτυχανθεί 0,5mm βάθος συγκόλλησης με ταχύτητα συγκόλλησης 3m/min σε επαναλαμβανόμενο βαθμό παλμού 500Hz, όταν χρησιμοποιείται ισχύ 1 KW.

Για να πραγματοποιηθούν βαθιές και στενές ενώσεις σε υψηλές ταχύτητες, απαιτούνται μικρού μήκους παλμοί. Πάντως πρέπει να δοθεί προσοχή, όταν χρησιμοποιούνται μικροί παλμοί (<1msec) και υψηλή ισχύ (τυπικά 1 KW), καθώς μπορεί να συμβεί υπόσκαψη της συγκόλλησης διαμέσου υπερβολικής εξάτμισης και αποβολή του υλικού.

Όταν αυξάνεται η ισχύς του laser, μπορεί να αυξηθεί και η γωνία απόκλισης της ακτίνας στα περισσότερα Nd:YAG laser. Αυτό επηρεάζει τη θέση εστίασης και το υποδεικνυόμενο μέγεθος του σημείου. Όταν αυξάνεται η ισχύς είναι επίσης απαραίτητο η προσαρμογή του τηλεσκοπίου διαστολής της ακτίνας laser, για την μεγιστοποίηση της πυκνότητας ισχύος, που επιτυγχάνεται από τη χρήση της οπτικής εστίασης.

## Προετοιμασία των υλικών πριν την συγκόλληση

Καθώς έχουν καθοριστεί οι παράμετροι συγκόλλησης, η απόδοση τους εξαρτάται από την προετοιμασία των επιφανειών ενώσεως, τον εξοπλισμό της ένωσης και την ευθυγράμμιση της ακτίνας laser με το κέντρο της ένωσης. Για υψηλό βαθμό συγκόλλησης, οι επιφάνειες ενώσεως πρέπει να μην έχουν πρόσθετες μολύνσεις όπως λιπαντικά, βαφές και οξειδία. Αν τα εξαρτήματα πρέπει να συγκολληθούν αυτογενώς, οι επιφάνειες τους πρέπει να είναι λείες και σε πολύ καλή επαφή. Οι επιφάνειες ενώσεως για πολύ λεπτά κομμάτια μπορούν να τροχιστούν, πλανιστούν ή και να περάσουν από τέρνο, ώστε τα εμπλεκόμενα κομμάτια να έχουν πολύ καλή εφαρμοστικότητα. Αυτές οι πράξεις είναι απαραίτητες για την αποφυγή δυο κύριων προβλημάτων : κενά μεταξύ των ενώσεων και άσχημο ταίριασμα μεταξύ των επιφανειών, που μπορούν να συμβούν και τα δυο. Τα κενά μεταξύ των ενώσεων είναι το πιο σοβαρό πρόβλημα και είναι ίδιας σημασίας με την ευθυγράμμιση της ακτίνας laser με την γραμμή ενώσεως.

Ο χημικός καθαρισμός των κομματιών (όπως πλύσιμο με ακάθαρτο πετρέλαιο, αιθέρα) και ο καθαρισμός των ατμών με τριχλωροαιθυλαίνιο, πρέπει να γίνονται μακριά από τη ζώνη συγκόλλησης και τις γραμμές μετάδοσης της ακτίνας laser, διότι οι ατμοί που παράγονται από αυτά τα μέσα καθαρισμού εξασθενούν τη μετάδοση της ακτίνας laser, προκαλώντας θερμικό σφάλμα. Επίσης τα μέσα καθαρισμού πρέπει να ξεπλένονται ικανοποιητικά και μετά να στεγνώνονται πριν πραγματοποιηθεί η συγκόλληση, αλλιώς θα έχουμε τα φαινόμενα του «πιτσιλίσματος» της συγκόλλησης και της πορώδους κατάστασης. Μη απομακρυσμένα μέσα καθαρισμού που περιέχουν θειικά άλατα και φωσφορικά άλατα, είναι αρκετά επιρρεπή σε αυτά τα φαινόμενα.

### 4.5 Διαδικασίες ελέγχου και παρακολούθησης

Οι περισσότερες εφαρμογές των συγκολλήσεων με laser είναι σε προϊόντα όπου χρειάζονται υψηλά επίπεδα ποιότητας κόλλησης. Τέτοιες εφαρμογές μπορεί να είναι στα διυλιστήρια καυσίμων, στις λεπίδες πριονιών, στα διάφορα μέρη αυτοκινήτου κ.α. Οι διαδικασίες συγκόλλησης και οι συνθήκες των υλικών πρέπει να προνοηθούν και να προσεχτούν ιδιαίτερα, για την εξασφάλιση της απαιτούμενης ποιότητας συγκόλλησης.

Για να ελεγχθεί η ποιότητα των συγκολλήσεων σε χαμηλό κόστος και σε χαμηλής παραγωγής εξαρτήματα, είναι πολλές φορές πρακτικό να αποσυρθεί ένα εξάρτημα (μετά από ένα πολύ μικρό αριθμό παραγωγής) και να εξετασθεί. Αν βρεθεί μη αποδεκτό σφάλμα, τότε αποσύρεται προσωρινά από την παραγωγή, διορθώνεται και επανέρχεται στη μαζική

παραγωγή. Ωστόσο η συγκόλληση με laser αποφεύγεται για χαμηλού κόστους εξαρτήματα και για χαμηλή παραγωγή. Αυτό συμβαίνει διότι η συγκόλληση με laser έχει υψηλό κόστος λειτουργίας και εξοπλισμού. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι καταστροφικοί έλεγχοι για την ποιότητα της συγκόλλησης μπορούν να αποδεικτούν εξαιρετικά ζημιωτικοί από πλευράς χρόνου και υλικού, αλλά κυρίως από οικονομικής πλευράς.

Η εναλλακτική λύση είναι η προσπάθεια εξασφάλισης της καλής ποιότητας συγκόλλησης με τον έλεγχο και την διατήρηση των συνθηκών συγκόλλησης σε ικανοποιητικά επίπεδα, πετυχαίνοντας έτσι πολλαπλές συγκολλήσεις με αποδεκτή ποιότητα και, όπου είναι δυνατόν, τον έλεγχο της ποιότητας με μη καταστρεπτικές μεθόδους (M.K.M).

Επιπροσθέτως, υπάρχουν σοβαρές νομικές συνέπειες που αφορούν την ασφάλεια και την προστασία του κοινού. Είναι απαραίτητο το ενδιαφέρον του κατασκευαστή, για την εξασφάλιση της ποιότητας της παραγωγής και το απαιτούμενο επίπεδο ασφαλείας. Πολλοί κατασκευαστές προσφέρουν εμπιστοσύνη και αξιοπιστία στα προϊόντα τους, εργαζόμενοι με τα μέτρα ασφαλείας, όπως αναφέρει το BS 5750/ISO 9000/EN 29000, που είναι διεθνώς αναγνωρισμένο. Δουλεύοντας με κάποια σπάνια μέτρα ασφαλείας, ο έλεγχος της διαδικασίας, του laser και των M.K.M μπορεί να αποδειχτεί ωφέλιμος.

Αυτή η παράγραφος, ασχολείται με τις πρακτικές διαδικασίες ελέγχου και παρακολούθησης της ποιότητας της συγκόλλησης. Οι κύριοι παράμετροι που συνεισφέρουν στην καλή ποιότητα των συγκολλήσεων είναι οι παρακάτω :

- Υλικά.
- Συνθήκες συγκόλλησης.
- Περιοδικός έλεγχος συγκόλλησης.
- Έλεγχος εξοπλισμού.
- Έλεγχος διαδικασίας συγκόλλησης.

Οι τρεις πρώτοι παράμετροι είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για την απαιτούμενη παραγωγή και πρέπει να συμπεριλαμβάνονται σε όλους τους ελέγχους. Οι δυο τελευταίοι παράμετροι είναι επιθυμητοί για την ασφάλεια της ποιότητας της συγκόλλησης. Ωστόσο, ορισμένοι παράμετροι βρίσκονται στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης, ή ακόμα και σε πειραματικό στάδιο, και απαιτούν επαγγελματική εξειδίκευση.

#### 4.5.1 Υλικά

Από τη στιγμή που έχουν επιλεγεί τα υλικά που πρόκειται να συγκολληθούν με laser και η συγκολλησιμότητά τους έχει εξασφαλισθεί και αποδεκτεί σε σχέση με τις απαιτήσεις της παραγωγής, πρέπει να προσεκτούν ιδιαίτερα οι προδιαγραφές και οι χημικές αναλύσεις του κατασκευαστή των υλικών. Εν συνεχεία, όλες οι σειρές των μεταγενέστερων υλικών πρέπει να ταιριάζουν με τις οδηγίες και να ζητηθεί από τον προμηθευτή πιστοποιητικό επιβεβαίωσης. Αυτό μπορεί να ακούγεται αυστηρό, αλλά μικρές αλλαγές στη σύσταση των κραμάτων των υλικών μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά σφάλματα στη συγκόλληση π.χ υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, θείο, φώσφορο κ.α προκαλούν ρωγμές στερεοποίησης. Επίσης μη αποδεκτές επικαλύψεις ψευδαργύρου στον χάλυβα προκαλούν αποβολή του συγκολλητού μετάλλου, φουσαλλίδες και πορώδης κατάσταση (παράγραφος 4.3).

Η επιφάνεια του υλικού δεν πρέπει να περιέχει σκουριά και άλλες ακαθαρσίες, κυρίως λάδι και λιπαντικά. Όταν υπάρχει σκουριά, πρέπει να απομακρύνεται με άλεσμα ή τρόχισμα, ενώ τα λάδια και τα λιπαντικά με χημικά καθαριστικά, όπως ακετόνες κ.α. Πρέπει να σημειωθεί, ότι οι καθαριστικοί παράγοντες που παράγουν ατμούς, πρέπει να απομακρύνονται από τη δίοδο μετάδοσης της ακτίνας laser για την αποφυγή της στρέβλωσης της.

Οι επιφάνειες που θα ενωθούν πρέπει να βρίσκονται σε πολύ κοντινή απόσταση (εκτός αν χρησιμοποιείται παρέμβυσμα) και να μην έχουν ακαθαρσίες. Καθώς η συγκόλληση με laser δεν χρησιμοποιεί προσμίγματα, ο καθαρισμός πρέπει να γίνεται πριν την συγκόλληση, ειδικά αν τα υλικά που θα συγκολληθούν είναι επιρρεπή στην γρήγορη οξειδωση (όπως το τιτάνιο).

#### 4.5.2 Συνθήκες συγκόλλησης

Για την παραγωγή πάσης φύσεως συγκολλήσεων είναι ουσιώδης και βασική προϋπόθεση η δημιουργία αποδεκτών συνθηκών συγκόλλησης. Ο εξοπλισμός συγκόλλησης και οι συνθήκες πρέπει να καταγράφονται σε δελτία πληροφοριών σε συνάρτηση με τις απαιτούμενες εφαρμογές και την κάθε λειτουργία που γίνεται κατά την διαδικασία συγκόλλησης. Τα δελτία πληροφοριών πρέπει να περιέχουν τον τύπο του laser, τον εξοπλισμό χειρισμού, τον τύπο οπτικής εστίασης, το οπτικό μήκος εστίασης, το μηχάνημα και ο τύπος του προστατευτικού αερίου και κάθε άλλη πληροφορία για τον βοηθητικό εξοπλισμό (όπως την καταστολή του πλάσματος, τα παρεμβύσματα κ.α). Το δελτίο πρέπει επίσης να ξεκαθαρίζει την ισχύ του laser, την ταχύτητα συγκόλλησης και τον τύπο του προστατευτικού αερίου. Τέλος, πρέπει να γνωστοποιεί στον χειριστή ότι οι συνθήκες συγκόλλησης δεν πρέπει να μεταβληθούν χωρίς την σύμφωνη γνώμη του επίσημου εξουσιοδοτημένου

υπεύθυνου. Ακόμα και τότε, οι αλλαγές στις συνθήκες συγκόλλησης πρέπει να προέρχονται σε σχέση με τις απαιτήσεις της συγκόλλησης και να καταγραφούν απαραίτητως στο δελτίο πληροφοριών.

Σε σχέση με τις συνθήκες συγκόλλησης, πρέπει να προσεχτεί η τοποθέτηση της θέσης εστίασης. Όλος ο εξοπλισμός που δεν είναι δυνατόν να ελέγχεται συνέχεια, πρέπει να επαληθεύεται η λειτουργία τους κατά τακτικά χρονικά διαστήματα, και κυρίως πριν την μαζική παραγωγή.

### **Ισχύς του laser**

Η ισχύς του laser συνήθως ελέγχεται από θέση κοντά στην πηγή του laser από θερμιδόμετρο ή από θερμοστήλη. Ορισμένα laser μπορούν να φανερώσουν την διαθέσιμη ισχύ όταν το εξωτερικό διάφραγμα της ακτίνας είναι κλειστό και η ισχύς που μετρείται από την συσκευή διπλασιάζεται, καθώς η ακτίνα αποθηκεύεται. Άλλοι τύποι laser φανερώνουν την ισχύ τους κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Ελέγχοντας και μετρώντας την ισχύ της ακτίνας laser κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα για την ασφάλεια της ποιότητας της συγκόλλησης, καθώς η ισχύς μπορεί συνήθως να καταγραφεί και να αποθηκευτεί σε σχέση με τον αριθμό των συγκολλήσεων. Πάντως, όταν η ισχύς του laser μετρηθεί κοντά στην πηγή του και η ακτίνα μεταδίδεται στην εργασία από έναν αριθμό καθρεπτών, όπως συμβαίνει συνήθως στα CO<sub>2</sub> laser, υπάρχει μια μικρή απώλεια της ισχύος της ακτίνας (περίπου 3% για κάθε καθρέπτη), η οποία αυξάνει κατά το πέρασμα του χρόνου ζωής των καθρεπτών. Κατά συνέπεια η ισχύς του laser στην εργασία μπορεί να είναι διαφορετική από την μετρούμενη. Για να αποφευχθεί μια τέτοια κατάσταση, θα πρέπει να μετρηθεί η ισχύς πριν την οπτική εστίαση, χρησιμοποιώντας παρόμοιο μηχανήμα με αυτό που φαίνεται στο σχήμα 4.26.



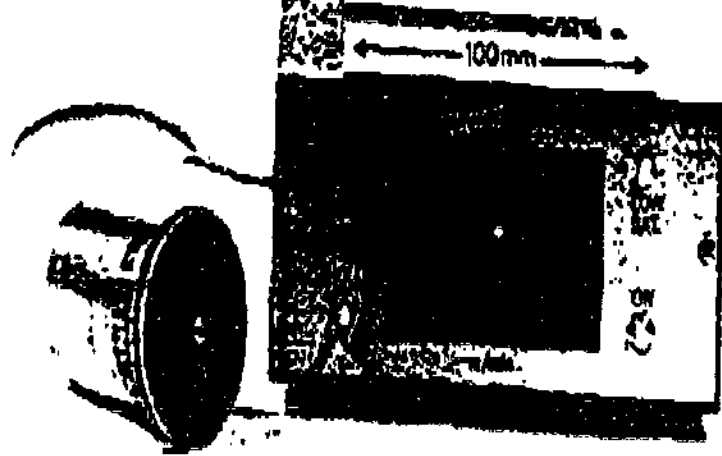
Σχήμα 4.26: Συσκευή μέτρησης ισχύος της μη εστιασμένης ακτίνας laser. Δουλεύει τοποθετώντας το απορροφητικό στρώμα (μαύρος δίσκος) στη δίοδο της ακτίνας laser.

Αυτό το μηχάνημα είναι πολύ απλό στη χρήση του και μπορεί να μετρήσει ισχύ ακτινών μέχρι 10KW, τοποθετώντας το απορροφητικό στρώμα στη δίοδο της ακτίνας για 30 δευτερόλεπτα, διαβάζοντας τη μέση ισχύ στο διαβαθμισμένο όργανο. Το μέγεθος του απορροφητικού στρώματος εξαρτάται από τη διάμετρο της ακτίνας για την maximum απαιτούμενη ισχύ. Το στρώμα αυτό πρέπει να επιλεγεί ανάλογα με το μέγεθος της ισχύος. Η εκτίμηση της ισχύος που θα μετρηθεί πρέπει να είναι 15-20% περισσότερη από την maximum ισχύ του laser που θα χρησιμοποιηθεί. Αυτά τα μηχανήματα είναι κατάλληλα για όλα τα laser (συνεχούς κύματος ή παλμού CO<sub>2</sub> και Nd:YAG). Είναι ωφέλιμη η προμήθεια δυο όμοιων τέτοιων μηχανημάτων, ώστε το ένα να ελέγχει την απόδοση του άλλου περιοδικά.

### Ταχύτητα συγκόλλησης

Η ταχύτητα συγκόλλησης είναι ίσως η πιο εύκολη παράμετρος για να καθοριστεί και να ελεγχθεί, και σε ορισμένες περιπτώσεις καθορίζεται με την βοήθεια βαθμονομημένων σημείων ή με ένα ρολόι χειρός. Η πιο ακριβής μέθοδος είναι η μέτρηση με ένα απλό ηλεκτρονικό ανιχνευτή ταχύτητας (σχήμα 4.27) και να αναγνωσθεί η ψηφιακή μέτρηση. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να καταγραφούν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της συγκόλλησης. Πάντως, όπως όλος ο εξοπλισμός, πρέπει και αυτό το μηχάνημα να διακριβωθεί.





Σχήμα 4.27: Ηλεκτρονικό μόνιτορ που επιτρέπει την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ταχύτητας συγκόλλησης

### **Προστατευτικό αέριο**

Το προστατευτικό αέριο είναι ένας ευαίσθητος παράγοντας που επηρεάζει την μορφή της συγκόλλησης. Επ' ακριβώς, το προστατευτικό αέριο τροφοδοτείται με την απονομή των μηχανημάτων διαμέσου μιας συσκευής με ένα προσαρμοσμένο αισθητήρα που δείχνει την απουσία της σωστής παροχής του αερίου. Ο αισθητήρας αυτός μπορεί να σταματήσει τη λειτουργία της συγκόλλησης, αν δεν υπάρχει παροχή αερίου ή αν η παροχή μειωθεί κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια.

Το προστατευτικό αέριο εφαρμόζεται στην οπή συγκόλλησης, για να αποφευχθεί η αποσύνθεση του τηγμένου μετάλλου. Επίσης πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην ασφάλεια των φυσικών ρευμάτων ή των ρευμάτων από διαρροή αερίων, για να μην εμποδιστεί η παροχή του προστατευτικού αερίου γύρω από την οπή. Αυτό μπορεί να ακούγεται απίθανο, αλλά στην πραγματικότητα τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα είναι πολύ συνηθισμένα στην αυτόματη λειτουργία εργασίας και έχουν συμβεί περιστατικά όπου πλαστικοί σωλήνες πεπιεσμένου αέρα έχουν διατρηθεί από το πιτσάλισμα της συγκόλλησης.

### **Θέση εστίασης**

Στην παράγραφο 4.4 περιγράφεται με λεπτομέρεια, πως βρίσκεται η θέση της εστίασης της ακτίνας laser με τη βοήθεια των δοκιμαστικών δοκιμίων. Ο ίδιος τρόπος δοκιμασίας και εξέτασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον έλεγχο της μετακίνησης της μέσης θέσεως εστίασης. Πάντως, καθώς η θέση εστίασης ελέγχεται (χωρίς να έχει εγκατασταθεί πλήρως), πρέπει να διασφαλιστεί ότι το δοκιμαστικό δοκίμιο θα είναι στην ίδια θέση με αυτή των

κομματιών παραγωγής. Ένα ερώτημα που τίθεται είναι γιατί η ελάχιστη μέση θέση εστίασης πρέπει να μετακινηθεί, όταν καθοριστεί. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι, αλλά ο κυριότερος είναι οι ακαθαρσίες στην οπτική εστίαση, που συνήθως προκαλούνται από σκόνη ή από εξάτμιση του συγκολλημένου μετάλλου. Οι ακαθαρσίες απορροφούν την ενέργεια της ακτίνας και θερμαίνουν τον οπτικό μηχανισμό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την διαστολή, την παραμόρφωση και την μεταβολή του οπτικού μήκους εστίασης. Σαν εναλλακτική λύση, στην περίπτωση των CO<sub>2</sub> laser, αν στην πορεία μετάδοσης του laser ως την οπτική εστίαση παρεμβάλλεται ένας καθρέπτης, η θέση εστίασης παραμορφώνεται από τις ακαθαρσίες ή από την έλλειψη μέσου ψύξεως. Έτσι, η γωνιακή διάδοση της ακτίνας μπορεί να αλλάξει και μετά να μεταβληθεί το οπτικό μήκος εστίασης.

Αν η ελάχιστη μέση θέση μετακινηθεί αμέσως μετά την οπτική εστίαση, τότε η διαφορά της ελάχιστης μέσης θέσης οφείλεται στην αντοχή που προσφέρει ο κατασκευαστής των οπτικών εξαρτημάτων. Τα μήκη κύματος κάποιων κατασκευαστών οπτικών κυμαίνονται από -5% ως +5%, π.χ. 2 ίδια οπτικά μήκη κύματος των 200mm μπορεί να έχουν, στην χειρότερη περίπτωση, ελάχιστες μέσες θέσεις περίπου 20mm μακρύτερα. Άρα, η ελάχιστη μέση θέση σε σχέση με τη μορφή της συγκόλλησης, πρέπει να εγκαθίσταται όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.4, κάθε φορά που μεταβάλλεται η οπτική εστίαση.

Το θέμα της θέσης εστίασης, που συνήθως παρουσιάζει τα μεγαλύτερα προβλήματα και απαιτεί ειδική προσοχή, είναι η ευθυγράμμιση της εστιασμένης ακτίνας laser με την γραμμή ενώσεως. Δυστυχώς οι στενές κολλήσεις με laser επιβάλλουν αντοχή στην ευθυγράμμιση.

Πάντως τα μοντέρνα συστήματα laser μπορούν γενικά να «δείξουν» ακριβώς την ακτίνα laser. Το laser HeNe (< 0,5mW για λόγους ασφαλείας) εφαρμόζεται ομοαξονικά στην κεντρική γραμμή της διόδου της ακτίνας laser και η εστιασμένη ακτίνα μπορεί εύκολα να ελέγχεται στην εργασία από ένα μικρό (μικρότερο από 1mm διάμετρο) κόκκινο σημείο του HeNe laser και έτσι η θέση της ακτίνας μπορεί να ευθυγραμμιστεί στην γραμμή ενώσεως πριν αρχίσει η λειτουργία της συγκόλλησης. Φυσικά, είναι απαραίτητος ο περιοδικός έλεγχος της ομοαξονικής ευθυγράμμισης του HeNe laser. Αυτό μπορεί να γίνει πάλλοντας το laser συγκόλλησης, με μικρή ισχύ, για να κατασκευαστεί ένα σημειακό τηγμένο σημάδι στην επιφάνεια του δοκιμαστικού δοκιμίου και μετά ασφαρίζοντας το κόκκινο σημείο του HeNe laser ομοκεντρικά με το τηγμένο σημείο. Έτσι, η γραμμή ενώσεως μπορεί να ρυθμιστεί σε σχέση με το HeNe σημείο, για να διασφαλιστεί ότι η ακτίνα συγκόλλησης θα ακολουθήσει τη δίοδο της γραμμής ενώσεως.

Ελέγχοντας οπτικά το HeNe κόκκινο σημείο σε σχέση με τη γραμμή ενώσεως, είναι συνήθως τέλειο για μια συγκόλληση, αλλά μη πρακτικό για μια μαζική παραγωγή συγκολλήσεων. Στην δεύτερη περίπτωση, η ευθυγράμμιση επιτυγχάνεται με την προσεκτική

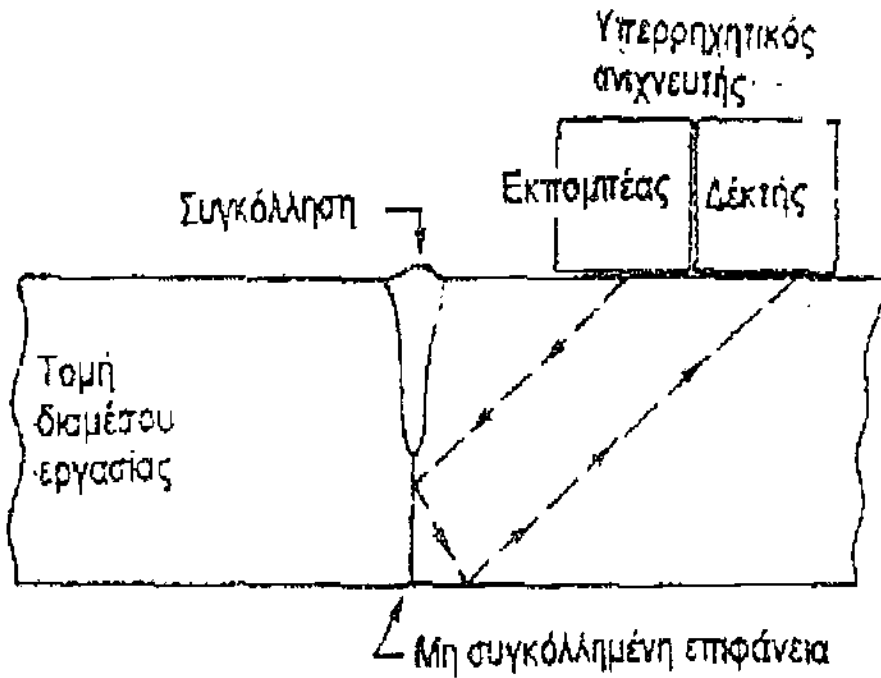
διαστασιοποίηση του μήκους ενός από τα δυο κομμάτια που θα συγκολληθούν και τοποθετώντας προσεκτικά το διαστασιοποιημένο κομμάτι ακριβώς αντίθετα από ένα προτοποθετημένο εμπόδιο στον εξοπλισμό εργασίας, εξασφαλίζοντας έτσι ότι η ένωση θα βρίσκεται πάντα στο σωστό σημείο. Αν αυτό δεν είναι δυνατό, τότε απαιτείται ένα μηχάνημα που αφήνει ίχνη, αναγνωρίζοντας έτσι τη γραμμή ενώσεως. Δυστυχώς, τέτοιου είδους μηχανήματα δεν είναι ακόμα κατάλληλα για συγκόλληση με laser, ωστόσο αυτές οι τεχνικές είναι εξελισσόμενες και σύντομα, θα υπάρχουν διαθέσιμες για τη λειτουργία που αναπτύσσουμε.

#### 4.5.3 Περιοδικός έλεγχος συγκόλλησης

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζουμε τις απαραίτητες θεμελιώδεις απαιτήσεις που θα παρέχουν ποιότητα στα σημεία συγκόλλησης. Με την προϋπόθεση ότι όλες οι απαιτήσεις είναι σωστές και δεν μεταβάλλονται κατά την διάρκεια της συγκόλλησης, η μορφή της τελικής συγκόλλησης μπορεί να θεωρηθεί σωστή. Ωστόσο, δεν μπορεί κανείς να είναι 100% σίγουρος ότι οι συνθήκες δεν θα μεταβληθούν κατά τη λειτουργία της συγκόλλησης. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης συγκόλλησης κύκλου, μια ελαφριά ακαθαρσία στην οπτική εστίαση ή ένα φτωχό σύστημα ψύξεως με νερό, μπορεί να παραμορφώσει θερμικά και να μειώσει την εστιασμένη ισχύ πυκνότητας και να προκαλέσει ανεπίτρεπτη απώλεια της δεισδύσης της κόλλησης. Έτσι θεωρείται απαραίτητος ο παιρετέρω έλεγχος της μορφής της συγκόλλησης.

Θεωρώντας ότι η λειτουργία της συγκόλλησης είναι η δεδομένη, ορισμένες φορές δεν είναι αρκετή η οπτική εξέταση μιας αποδεκτής συγκόλλησης. Για παράδειγμα, μια συγκόλληση όπου έχει δεισδύσει καλά και στα δυο ελάσματα και παρουσιάζει καθαρή και λεία κορυφή και σωστή μορφή συγκόλλησης, μπορεί να γίνει με ασφάλεια αποδεκτή. Σε μια συγκόλληση όμως, όπου λείπουν αυτά τα χαρακτηριστικά και παρουσιάζει ορατές φυσαλλίδες στη κόλληση, είναι μη αποδεκτή, και δείχνει καθαρά ότι κάτι δεν πήγε καλά κατά τη διάρκεια της. Σε περιπτώσεις που η διαμόρφωση της ένωσης ή η δόμηση της δεν επιτρέπει την επαρκή οπτική εξέταση, είναι ορισμένες φορές απαραίτητη η χρήση της τεχνικής των υπερηχητικών ακτινών, για τον έλεγχο της θέσης της συγκόλλησης και του βάθους της (η τεχνική αυτή όμως είναι πολύ ακριβή και απαιτεί πολύ χρόνο και συνεπώς δεν είναι πάντα κατάλληλη σε ένα κέντρο μαζικής παραγωγής). Αυτή η τεχνική είναι ικανοποιητική, και η μέθοδος για να βρεθεί η κόλληση που δεν έχει δεισδύσει σωστά ή που δεν έχει ακολουθήσει τη σωστή γραμμή ενώσεως φαίνεται στο σχήμα 4.28. Δυστυχώς πολλά εξαρτήματα που έχουν συγκολληθεί με

laser, δεν προσφέρονται για υπερηχητικούς ελέγχους λόγω του ότι δεν επιτρέπουν την πρόσβαση και χαλαρώνουν τη ζεύξη των υπερηχητικών ακτίνων.



Σχήμα 4.28: Η αρχή της παλμικής ηχούς, μη καταστροφική του μόνιτορ συγκόλλησης. Η συχνότητα συνήθως 1MHz έως 5MHz ταξιδεύει στο υλικό και ανακλάται αν συναντήσει μια επιφάνεια. Όπως φαίνεται ο ανιχνευτής μπορεί να μεταδώσει και να δεχτεί το ανακλαστικό κύμα, από έναν συγκεκριμένο στόχο.

Πολλές φορές είναι πιθανό να πρέπει να ελεγχθεί η αποδοχή της συγκόλλησης με διάφορα τεστ αποδείξεως, π.χ. εξασκώντας πίεση σε ένα συγκολλημένο κύλινδρο ή σε ένα οικιακό θερμαινόμενο σώμα, όπου το εξάρτημα υπόκεινται σε δοκιμαστική πίεση, όπου απαιτείται για τη σωστή λειτουργία του. Έτσι αν η συγκόλληση δεν αποτύχει, πρέπει να θεωρηθεί ότι είναι ασφαλής για τις απαιτήσεις εργασίας. Ωστόσο, υπάρχουν διάφορα τέτοια τεστ, όπως το τεστ ύπαρξης ρωγμών. Αυτό το τεστ είναι διαδεδομένο κυρίως στα θερμαινόμενα καπάκια των μικροκυκλωμάτων συσκευασίας. Πάντως, οι δοκιμασίες αποδείξεως πρέπει να επιλέγονται με προσοχή και να καλύπτουν όλες τις απαιτήσεις εφαρμογής.

Οι συγκολλήσεις σε ένα κομμάτι που δεν μπορούν να ελεγχθούν με τις μη καταστροφικές μεθόδους που αναφερθήκαμε, συνήθως ελέγχονται με μεθόδους που καταστρέφουν το εξάρτημα. Ο τύπος και η εκλογή της δοκιμασίας εξαρτώνται από το ίδιο το εξάρτημα και τις εφαρμογές του. Συνήθως τα τεστ περιλαμβάνουν εφελκυσμό, διάτμηση και μακρο-τομές. Η πιο δύσκολη εκλογή είναι η συχνότητα των ελέγχων που είναι απαραίτητη. Η απόφαση αυτή πρέπει να παρθεί σε σχέση με την συνολική αξιοπιστία της λειτουργίας της συγκόλλησης, π.χ

τη μορφή του εξοπλισμού, την αξία του εξαρτήματος και τον αριθμό της παραγωγής. Η μορφή του εξοπλισμού εξαρτάται από το σχεδιασμό και τη συντήρηση του. Ωστόσο η ικανοποιητική περίοδος λειτουργίας των εξαρτημάτων και η συντήρησή τους, είναι θέμα εμπειρίας. Για παράδειγμα, η συχνότητα καθαρισμού των οπτικών εξαρτημάτων εστίασης εξαρτάται από τη χρήση, και αν η καπνιά του εξατμισμένου μετάλλου και το «πιπίλισμα» της συγκόλλησης πριν απομακρυνθούν, κατακρυσμύνουν στη ζώνη συγκόλλησης.

Η αξία του εξαρτήματος είναι ίσως το μεγαλύτερο μειονέκτημα για να παρθούν δείγματα από καταστρεπτικές δοκιμασίες, αφού η λειτουργία της συγκόλλησης, είναι συχνά το τελευταίο στάδιο της παραγωγής. Η λειτουργία αυτή είναι πολύ ακριβή και το συνολικό κατασκευαστικό κόστος εξαιρετικά δαπανηρό. Σε αυτές τις περιπτώσεις την καλύτερη λύση αποτελεί η δοκιμασία ενός εξαρτήματος ομοίωμα, που αντιπροσωπεύει το υλικό και τη διαμόρφωση της συγκόλλησης.

Έχοντας μειώσει το πρόβλημα του κόστους των εξαρτημάτων, μένει η πιο δύσκολη υπόθεση, η συχνότητα των καταστρεπτικών δοκιμασιών. Δεν υπάρχει σαφής απάντηση σε αυτό, και γενικά, το πρόγραμμα των καταστρεπτικών τεστ καθορίζεται από την εμπειρία και τα επίσημα έγγραφα. Αυτό βασίζεται στο βαθμιαίο παρατεινόμενο αριθμό παραγωγής, σε σχέση με τα προγράμματα συντηρήσεων του εξοπλισμού, πριν ξεκινήσει ο καταστρεπτικός έλεγχος του δείγματος. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να ελεγχθεί 1 συγκόλληση στις 10, και αν είναι αποδεκτή μπορούν να κατασκευαστούν 50 πριν την επόμενη δοκιμασία και αν συνεχιστεί έτσι, θα καθιστεί απαραίτητη μόνο 1 συγκόλληση στις 100, και ακόμα περισσότερες.

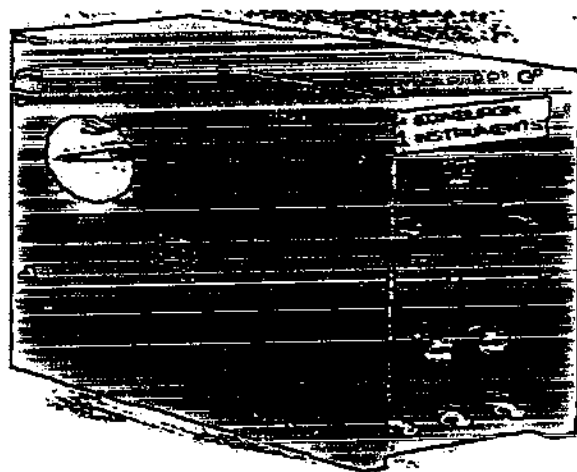
#### **4.5.4 Έλεγχος εξοπλισμού**

Όταν βρεθεί, κατά την περιοδική δοκιμασία, μια ανεπαρκής μορφή συγκόλλησης και όλες οι απαιτήσεις του φύλλου πληροφοριών έχουν εκπληρωθεί, η αιτία κυρίως εστιάζεται στη λειτουργία του laser και στο σύστημα μετάδοσης της ακτίνας.

Η πρώτη πιθανότητα λάθους είναι στον μετρητή της ισχύος. Η λάθος ανάγνωση του μετρητή ισχύος προκαλεί φτωχή απόδοση της συγκόλλησης και επιδείνωση της ποιότητας της ακτίνας, είτε στη πηγή του laser ή κατά τη διάρκεια μετάδοσης στην οπτική εστίαση. Επίσης είναι πιθανό, ειδικά στα CO<sub>2</sub> laser, ότι ένα οπτικό λάθος ή ένα λάθος στο laser μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση ή και διαφορά στη δομική μορφή της ακτίνας, επηρεάζοντας έτσι το μέγεθος του σημείου εστίασης και τελικά την ισχύ πυκνότητας της συγκόλλησης. Τέλος οι πολυχρησιμοποιημένες λάμπες «φλας» στο Nd:YAG laser μπορούν να προκαλέσουν το ίδιο πρόβλημα. Για να εξετασθεί η κατά μήκος μορφή των ακτίνων laser και η δομική μορφή τους, έχουν αναπτυχθεί αρκετοί τύποι αναλυτές των ακτίνων laser. Αυτά τα μηχανήματα

χρησιμοποιούνται για να ελεγχθούν τα χαρακτηριστικά της ακτίνας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και παρέχουν μια ασφάλεια ποιότητας. Επίσης, αν τα χαρακτηριστικά της ακτίνας, δεν ανταποκρίνονται στις αποδεκτές απαιτήσεις, το σήμα θα σταματήσει τη λειτουργία της πριν κατασκευαστούν και άλλες συγκολλήσεις.

Αν ο αναλυτής της ακτίνας laser χρησιμοποιείται σε μια μηχανή παραγωγής συγκολλήσεων, συνίσταται να τοποθετηθεί σε δυο συγκεκριμένες θέσεις, εντός του συστήματος μετάδοσης της ακτίνας. Πρώτα, για την παρακολούθηση της ακτίνας laser κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, συνίσταται ο αναλυτής να τοποθετηθεί πριν και κοντά στην οπτική εστίαση, για να ελέγχεται η ακτίνα στο τέλος της και στην μη εστιασμένη μετάδοση. Ύστερα, σαν δεύτερη θέση, αν συμβεί φθορά στην μορφή της ακτίνας, ο αναλυτής μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα στην έξοδο της ακτίνας από τη μηχανή laser. Έτσι, οι δυο αυτές θέσεις, μπορούν να καθορίσουν, σε περίπτωση φθοράς της ακτίνας, αν η ακτίνα φθαρεί κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, μεταξύ του laser και της οπτικής εστίασης ή μέσα στην πηγή του laser. Έτσι κάποιος μπορεί εύκολα να διαπιστώσει ότι η διάμετρος και η μορφή θα είναι διαφορετικές στις δυο υποδεικνυόμενες θέσεις και να έχει μια σαφή εικόνα από φωτογραφίες, που έχουν παρθεί όταν το σύστημα έχει εγκατασταθεί. Έτσι καταγράφεται η προσδοκόμενη διάμετρος και μορφή σε κάθε θέση, κάτω από φυσιολογικές συνθήκες. Οι αναλυτές των ακτινών laser συνήθως είναι ένα ορθογώνιο κουτί, σχήμα 4.29, με μια διαμπερή σπή στην μια πλευρά, από όπου διαπερνά η ακτίνα. Μέσα στην σπή υπάρχει μια ακίδα, που διαπερνάει με μεγάλη ταχύτητα την ακτίνα laser. Η μεταβολή της έντασης του φωτός, που σαρώνει κατά μήκος την ακτίνα laser, μεταφέρεται σε ένα σύστημα αισθητήρων και μετατρέπεται σε ηλεκτρονικό σήμα, που επιτρέπει το σχηματισμό μιας εικόνας που αντιπροσωπεύει την ισχύ πυκνότητας της ακτίνας, όπως και τη μορφή της.



Σχήμα 4.29. Αναλυτής μιας ακτίνας laser. Το εύχρηστο και μικρό κουτί δίνει την δυνατότητα της εύκολης χρήσης από τον χειριστή.

Ορισμένοι αναλυτές παρέχουν εικόνες μόνο δυο διαστάσεων από τη μορφή της ακτίνας και σ'αυτές τις περιπτώσεις ο αναλυτής παίρνει δυο όψεις της ακτίνας ανά 90°. Οι δυο εικόνες αυτές εφαρμόζονται σε μια οθόνη ταλαντωτή. Πιο πρόσφατοι αναλυτές, έχουν την ικανότητα να παρέχουν φωτογραφίες των ακτινών σε 3 διαστάσεις, με την βοήθεια γραφικών από ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Αυτός ο εξοπλισμός όμως κοστίζει ακριβά, και απαιτεί χειρισμούς από τελείως εξειδικευμένους εργαζόμενους.

Τέλος ορισμένοι αναλυτές μπορούν να ελέγχουν και το μέγεθος του σημείου εστίασης. Όμως αυτό είναι θεωρητικό, αφού το σημείο εστίασης καθορίζεται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και μπορεί να είναι σημαντική η διαφορά λόγω ύπαρξης των ατμών συγκόλλησης και πλάσματος.

#### 4.5.5 Έλεγχος διαδικασίας συγκόλλησης

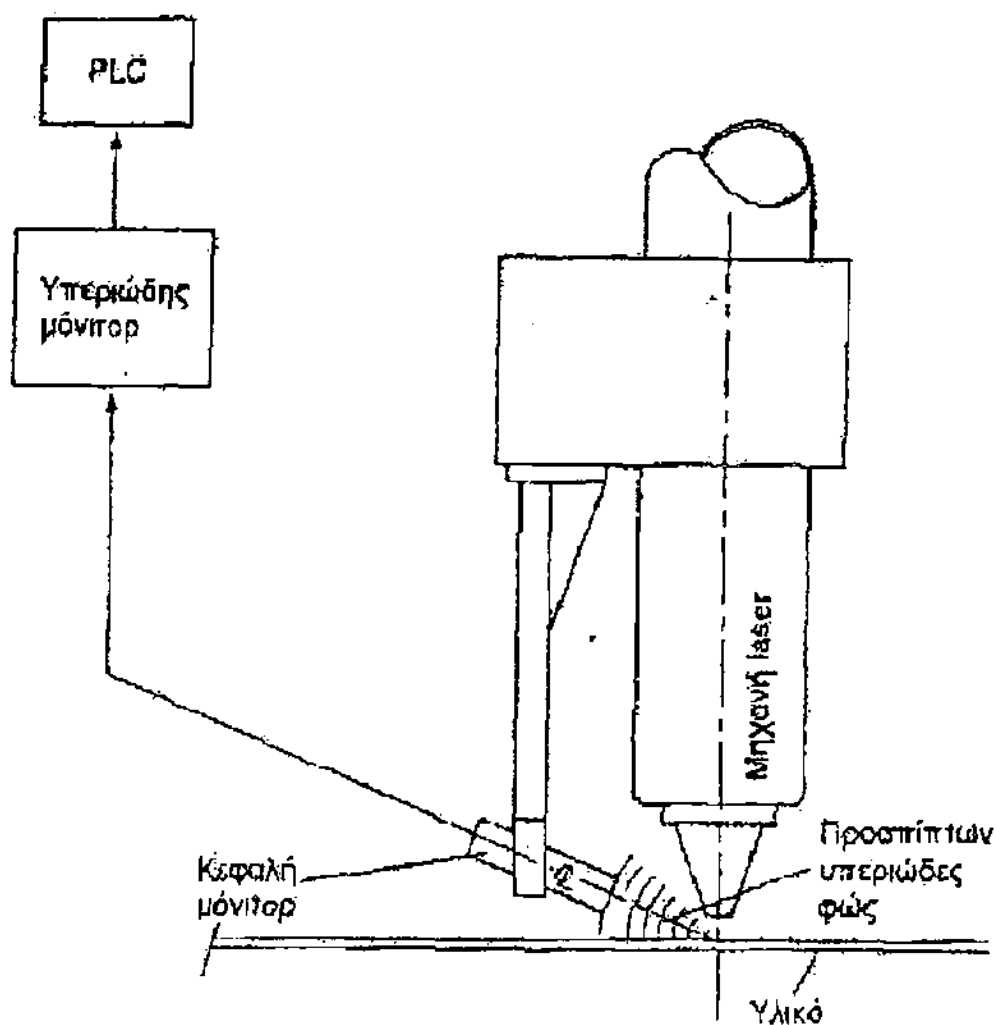
Μέχρι τώρα έχουμε περιγράψει τον έλεγχο της ποιότητας της συγκόλλησης, των συνθηκών συγκόλλησης και των χαρακτηριστικών των ακτινών laser. Παρ' όλους τους παραπάνω ελέγχους, η ασφάλεια της ποιότητας και πάλι δεν μπορεί να εγγυηθεί για διάφορους λόγους. Για παράδειγμα, ένα σφάλμα που συμβαίνει στην οπτική εστίαση π.χ θερμική παραμόρφωση ή ρωγμή στους φακούς, θα παραμορφώσει το σημείο εστίασης και θα μεταβληθεί η εστιασμένη ισχύ πυκνότητας του laser. Έτσι, ατέλειες στα υλικά ή απρόβλεπτες ακαθαρσίες (όπως υγρασία που εισχωρεί στη ζώνη συγκόλλησης ή ακαθαρσίες συγκόλλησης), επηρεάζουν την απορροφητικότητα της ενέργειας της ακτίνας laser στην εργασία και κατά συνέπεια παράγουν μη αποδεκτή μορφή συγκόλλησης.

Για να επιτυχανθεί 100% ασφάλεια ποιότητας, απαιτείται ένας αισθητήρας που θα επιβεβαιώνει την αποδεκτή μορφή συγκόλλησης, περικλείοντας την απαιτούμενη περιοχή ενώσεως. Για τις συγκολλήσεις με laser συναντιούνται 2 προσεγγίσεις με αρκετή επιτυχία. Η πρώτη με υπερηχητικό έλεγχο, όπως περιγράφηκε πιο πάνω, και η δεύτερη με υπεριώδη έλεγχο (UV). Οι θερμικές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για λεπτές κολλήσεις, αλλά δεν είναι κατάλληλες για συγκολλήσεις με laser.

Ο υπεριώδης έλεγχος υποδεικνύει το βάθος συγκόλλησης σε σχέση με την κάλυψη της γραμμής ενώσεως. Λειτουργεί τυπικά 30mm πίσω από την οπή, για να προστατέψει τους υπεριώδεις ανιχνευτές από θερμική καταστροφή και από το «πιτσιλίσμα» της συγκόλλησης. Έτσι, αν αναπτυχθούν λεπτοί υπεριώδεις ανιχνευτές για την πρόσβαση στις ενώσεις και αν επιτυχανθεί η απαιτούμενη επιφανειακή εφαρμογή, επιτυγχάνεται η ασφάλεια της συγκόλλησης, ειδικά στις εργασίες με μερική διείσδυση και στις τυφλές συγκολλήσεις.

Ο έλεγχος με υπεριώδεις ακτίνες, σχήμα 4.30, υποδεικνύει επίσης την μεταφορά της

ενέργειας της ακτίνας laser στην εργασία, βλέποντας τη μέση υπεριώδη ακτινοβολία στο σύννεφο του πλάσματος μπροστά στην οπή συγκόλλησης. Όμως δεν υπολογίζει το βάθος συγκόλλησης και δεν δείχνει αν η συγκόλληση περιβάλλει τη γραμμή ενώσεως. Πάντως, αν εγκατασταθεί σωστά, μπορεί να ανιχνεύσει τις αλλαγές στο σύστημα εστίασης, στο προστατευτικό αέριο, στην ισχύ και στην ταχύτητα συγκόλλησης. Κατά συνέπεια, εκτός από τις φανερές μετατροπές στις παραμέτρους (όπως στην ισχύ και στην ταχύτητα που ελέγχονται από αλλού), ανιχνεύει τις ακαθαρσίες ή τις ρωγμές στην οπτική εστίαση ή τις μετατροπές στις συνθήκες της επιφάνειας του εξαρτήματος.



Σχήμα 4.30: Γενική μορφή μιας υπεριώδους συγκολλητικής κεφαλής σε σχέση με την μηχανή laser και το υλικό.

Για την επιτυχή χρήση του UV, πρέπει πρώτα να εκτιμηθούν οι συνθήκες συγκόλλησης και η αντοχή τους και μετά να μετρηθεί η απόδοση του UV, από την παραγωγή του πλάσματος. Από αυτές τις μετρήσεις βεβαιώνεται και η αποδεκτή χρήση του UV.



Το πλάσμα και κατά συνέπεια, το σήμα του UV δεν είναι σταθερά. Στην πραγματικότητα υπάρχει ένα ισχυρό σήμα ρύθμισης λόγω της μορφής και της κατάρρευσης του πλάσματος, με συνεχή διαδοχή. Το UV σήμα ελέγχεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα και βασίζεται σε ένα μέσο σήμα. Το σήμα αυτό είναι ψηφιακό, για να είναι ικανή η σύγκριση με τις προηγούμενες αξίες σήμανσης. Τέλος, εγκαθιστώντας το σύστημα UV ελέγχου απαιτεί προσεκτικούς πειραματισμούς για την ασφάλεια των αποδεκτών ορίων λειτουργίας και την μελλοντική περιοδική δοκιμασία.

#### **4.6 Αίτια εμφάνισης σφαλμάτων και τα συμπτώματά τους**

Όπως περιγράφηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, η απόδοση της συγκόλλησης εξαρτάται από το υλικό που συγκολλείται. Κάποια υλικά συγκολλούνται πιο εύκολα από κάποια άλλα. Επίσης οι επικαλύψεις και η ποικιλία στα πάχη, προκαλούν σημαντικές αλλαγές, που σε ορισμένες περιπτώσεις ανακόπτουν τη διαδικασία συγκόλλησης.

Ο παρακάτω πίνακας σφαλμάτων αγνοεί αυτά τα περιστατικά, και υποθέτει ότι οι συνθήκες συγκόλλησης και οι παράμετροι της έχουν κατάλληλα διαμορφωθεί για ένα φυσιολογικό και εύκολο υλικό, και τελικά κάτι δεν πήγε καλά.

## ΣΥΜΠΤΩΜΑ

## ΠΙΘΑΝΗ ΑΙΤΙΑ

<p>Εαφνική απώλεια διεύθυνσης της συγκόλλησης.</p>	<p>-Απώλεια ισχύος, -Έλεγχος και μέτρηση ισχύος. -Απροσδόκητη αύξηση της ταχύτητας της συγκόλλησης. -Η οπτική εστίαση δεν λειτουργεί σωστά (αν το οπτικό όργανο είναι φακός, έλεγχος αν έχει ραγμές. Αν είναι αντανακλαστικό όργανο, έλεγχος αν η ακτίνα βρίσκεται στον οπτικό άξονα). -Το κομμάτι είναι έξω από την εστίαση. Έλεγχος του τραπέζιου εργασίας ή αν έχει μετακινηθεί η οπτική εστίαση.</p>
<p>Βαθμιαία απώλεια διεύθυνσης της συγκόλλησης μετά από περίοδο λίγων ημερών.</p>	<p>-Η οπτική εστίαση και οι καθρέπτες της ακτίνας μετάδοσης έχουν ακαθαρσίες. Καθαρισμός, λίγων ημερών. -Η ακτίνα laser και το σύστημα εστίασης της, έχουν μετατοπιστεί. Έλεγχος ευθυγράμμισης. -Στο Nd:YAG laser η λάμπα &lt;φλας&gt; ή η λάμπα ανακλαστήρας, έχουν ακαθαρσίες. Έλεγχος, καθαρισμός, αντικατάσταση.</p>
<p>Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, η συγκολλητική διεύθυνση μειώνεται βαθμιαίως και η φωτεινότητα του σύννεφου του πλάσματος αυξάνει γύρω από την οπή.</p>	<p>-Η θέση εστίασης μετακινείται λόγω της θερμικής κίνησης του κομματιού -Έλεγχος σφικτήρων κομματιού. -Αναποτελεσματική χρήση του προστατευτικού πλάσματος αερίου. Έλεγχος εξοπλισμού. -Η θέση εστίασης μετακινείται κατά μήκος του θερμικού φακού και του ειρμού μετάδοσης της ακτίνας. Έλεγχος οπτικών οργάνων για καθαρότητα και έλεγχο αναποτελεσματικής ψύξεως.</p>
<p>Κάθε φορά που η λειτουργία της συγκόλλησης επαναλαμβάνεται, μειώνεται η διεύθυνση της κόλλησης σε μια στενή σταγόνα της επιφάνειας τήξεως και το σύννεφο πλάσματος πάνω από την οπή χάνει τη φωτεινότητα του και γίνεται κίτρινο.</p>	<p>-Εαφνική απώλεια ισχύος πυκνότητας Έλεγχος θερμικής ανάπτυξης στο σύστημα μετάδοσης της ακτίνας, διασκορπίζοντας την ακτίνα laser. Μπορεί να φανεί χρήσιμο ένα καθαριστικό αέριο από στεγνό άζωτο στο σύστημα μετάδοσης της ακτίνας.</p>
<p>Υπερβολικό «πιτσίσμα» της συγκόλλησης</p>	<p>-Η ισχύς του laser είναι πολύ δυνατή. -Υπερβολική μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης. -Οι επιφάνειες κόλλησης έχουν μολυνθεί από λάδι, βαφές, οξείδια κ.α. Έλεγχος καθαριότητας. -Η αναλογία του προστατευτικού αερίου πολύ μεγάλη, διασκορπώντας το ρευστό μέταλλο. -Το προστατευτικό ακροφύσιο του αερίου έχει βουλώσει, αυξάνοντας την ταχύτητα αερίων. Έλεγχος και καθαρισμός. -Υπερβολική ανάπτυξη σκουριάς κάτω από τη γραμμή ένωσης της συγκόλλησης. Το μέταλλο λιώνει και εκτοξεύεται από την οπή συγκόλλησης. Έλεγχος και καθαρισμός.</p>
<p>Φυσαλλίδες στην επιφάνεια</p>	<p>-Ανεπαρκές προστατευτικό αέριο. Έλεγχος. -Περιεκτικότητα οξυγόνου πολύ υψηλή. Έλεγχος αν τα συστατικά του υλικού έχουν μεταβληθεί. Μπορεί να κριθεί απαιτητή η χημική ανάλυση. -Οι συγκολλημένες επιφάνειες μπορεί να έχουν μολυνθεί πριν τη συγκόλληση. Έλεγχος και καθαρισμός. -Το υλικό μπορεί να περιέχει συστατικά επιρρεπή στην εξαέρωση π.χ. ψευδάργυρο. Αυτά τα υλικά δεν είναι κατάλληλα για συγκόλληση με laser. -Υπερβολική επικάλυψη με ψευδάργυρο στο χάλυβα. -Ανάπτυξη κάπνας και πιτσίσματος στη ζώνη συγκόλλησης. Έλεγχος, καθαρισμός. -Ανάπτυξη σκουριάς στη διόδο κάτω από την γραμμή ένωσης του συγκολλημένου μετάλλου, τήξη και κατάλοιπα στην οπή συγκόλλησης. Έλεγχος και καθαρισμός διόδου.</p>
<p>Ραγμές συγκόλλησης</p>	<p>-Έχουν αλλοιωθεί τα συστατικά του μετάλλου. Ειδικότερα έλεγχος για αύξηση του άνθρακα, θείου και φωσφόρου. -Αλλαγή και αντίστοιχος έλεγχος στο σχεδιασμό της ένωσης και των διαστάσεων, στο σφίξιμο του κομματιού. Αύξηση των τάσεων συστολής κατά τη στερεοποίηση.</p>

**ΣΥΜΠΤΩΜΑ****ΠΙΘΑΝΗ ΑΙΤΙΑ**

Κατάρευση της συγκόλλησης

- Αύξηση ισχύος ή μείωση της συγκολλητικής ταχύτητας.  
Έλεγχος συστήματος.
- Ανάπτυξη διακένων στις επιφάνειες συγκόλλησης.  
Πιθανή λοξοδρόμηση της ακτίνας laser.  
Έλεγχος προεργασίας και θέση για συγκόλληση.
- Υπερβολική ροή αερίων ή ταχύτητα αυτών.  
Έλεγχος για μπούκομα ακροφυσίων των αερίων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ LASER

#### 5.1 Γενικά

Τα συστήματα της συγκόλλησης με laser είναι πολύ ασφαλή, με την προϋπόθεση ότι λειτουργούν και συντηρούνται σύμφωνα με τα ασφαλή standard, τις νομικές απαιτήσεις και τις οδηγίες του κατασκευαστή. Για να εξασφαλιστούν αυτές οι απαιτήσεις, πρέπει να υπάρχει κάποιος ειδικός που έχει γνώση και εκπαίδευση πάνω στο θέμα.

Οι νομικές και οι ασφαλή απαιτήσεις για ασφαλή εργασία με τα laser, διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Στην Ευρώπη, τα κράτη μέλη του EEC και του EFTA έχουν συμφωνήσει στα ασφαλή μέτρα, προτεινόμενα από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα για την Ηλεκτροτεχνική Προτυποποίηση (CENELEC). Στην Αγγλία η εφαρμογή του CENELEC 482S1, παρουσιάζεται στο BS 7192:1989. Στις Ηνωμένες Πολιτείες οδηγίες για την ασφαλή χρήση των laser παρουσιάζονται στο ANSI Z1316.1

Σε αυτό το κεφάλαιο υπάρχουν στοιχεία, πληροφορίες, προφυλάξεις και προτεινόμενες ενέργειες για την ασφαλή χρήση του εξοπλισμού του laser. Οι πληροφορίες που παρουσιάζονται σκοπεύουν να υποδείξουν τα πιο ασφαλή μέτρα που σχετίζονται με τις συγκολλήσεις laser και έναν οδηγό για την ασφαλή χρήση τους.

Οι κίνδυνοι που παρουσιάζονται στο χειρισμό της συγκόλλησης με laser παρουσιάζονται σε τρεις γενικούς τομείς : ακτίνα laser, ηλεκτρικά και χημικά με καπνούς.

#### 5.2 κίνδυνοι

##### 5.2.1 Κίνδυνοι από ακτίνες laser

Μια μη εστιασμένη ακτίνα laser, διαφεύγοντας από τη δίοδο μετάδοσης, είναι ικανή να μεταδοθεί σε απόσταση μεγαλύτερη των 100 μέτρων στον αέρα πριν η φυσική του απόκλιση του προκαλέσει εξάπλωση σε μια διογκωμένη διάμετρο, όπου η ισχύ πυκνότητας είναι πολύ χαμηλή για να προκαλέσει βλάβη. Για τη συγκόλληση, η ακτίνα laser εστιάζεται σε ένα σημείο όπου η ισχύ πυκνότητας είναι πολύ μεγάλη, και η προσπίπτουσα ακτίνα προκαλεί καψίματα. Μπροστά από το εστιασμένο σημείο η ακτίνα προσπίπτει πιο γρήγορα από το μη εστιασμένο σημείο, και γενικά πλησιάζει μια ασφαλή διάμετρο μετά τα λίγα μέτρα. Η ακριβής απόσταση εξαρτάται από τον αριθμό  $f$  της εστίασης. Όσο μικρότερο είναι αυτό το νούμερο, τόσο

μεγαλύτερο είναι το μήκος της προσπίπτουσας ακτίνας. Μπορεί να προκύψει κίνδυνος όμως, λόγω του περάσματος ή της αντανάκλασης της εστιασμένης ακτίνας, στο κομμάτι. Αυτοί οι κίνδυνοι συμβαίνουν συνήθως όταν η ακτίνα laser συναντά μια γυαλιστερή επιφάνεια μετάλλου σε μια γωνία  $20^\circ$  και μεγαλύτερη από τη φυσική θέση.

Οι ανεξέλεγκτες ακτίνες laser ή το διαφεύγον ανακλώμενο φως laser από τη ζώνη συγκόλλησης, μπορεί να προκαλέσει σοβαρή βλάβη στα μάτια και καψίματα στο δέρμα για όποιον «συναντήσει» τη δίοδο του laser φωτός. Πρέπει να τονιστεί ότι το laser φως που προέρχεται από τα CO<sub>2</sub> και Nd:YAG lasers είναι αόρατο στο μάτι και ακόμα αν μπορεί να το δει κάποιος (διότι ταξιδεύει με 186.000 μίλια το δευτερόλεπτο) μπορεί ακαριαία να τον «χτυπήσει» αν περνά από τη δίοδο του.

Το μήκος κύματος του φωτός από ένα Nd:YAG laser (1,06μm) είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο για τα μάτια, διότι ο φακός του ματιού μπορεί να εστιάσει αυτό το μήκος κύματος σε ένα πολύ μικρό σημείο του αμφιβληστροειδούς και να προκαλέσει τύφλωση. Προφανώς, ο αμφιβληστροειδής δεν προκαλεί πόνο και αυτή η μορφή τύφλωσης δεν αντιλαμβάνεται αμέσως.

Το μήκος κύματος από ένα CO<sub>2</sub> laser (10,6μm) δεν μεταδίδεται από τον φακό του ματιού, και η ζημιά που συμβαίνει σε αυτή την περίπτωση είναι στο μπροστινό σημείο του ματιού, με καψίματα του κερατοειδούς και κάποιας μορφής καταρράκτη. Σε αυτές τις περιπτώσεις συνιστώνται περιοδικά τεστ στα μάτια για γρήγορη ένδειξη, σε περίπτωση βλαβών.

Ωστόσο δεν πρέπει να υποτιμηθεί και ο κίνδυνος του καψίματος στο σώμα. Μια μη εστιασμένη υψηλής ισχύος ακτίνα laser, με αρκετών χιλιοστών διάμετρο, μπορεί άνετα να ακρωτηριάσει ανθρώπινο μέλος (τέτοιου είδους ατυχήματα έχουν περισσότερες πιθανότητες να συμβούν όταν την ακτίνα laser χειρίζεται ένα σύστημα robot).

Εκτός όμως από την ανθρώπινη βλάβη, το laser φως μπορεί να προκαλέσει πυρκαγιές και να λιώσει εύκολα σωλήνες και καλύμματα καλωδίων, προκαλώντας πολλές φορές ανεπιθύμητες επικύνδινες καταστάσεις, επηρεάζοντας την ασφαλή λειτουργία άλλων εγκαταστάσεων. Επίσης ένα μη εστιασμένο laser πολλαπλής ισχύος, μπορεί εύκολα να κάψει πυρότουβλα και χαλύβδινα ελάσματα. Τέλος, τα HeNe (ηλίου-νέου) laser, που αναπτύσσονται μέσα σε δίοδους ακτινών, δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερους κινδύνους, αν η ισχύ τους είναι κάτω του 0,5mW. Ωστόσο, κάποια συστήματα HeNe laser έχουν μεγαλύτερη ισχύ, της τάξεως του 0,8mW. Η απ'ευθείας θέαση των ακτινών με ισχύ πάνω των 0,5mW πρέπει να αποφευχθεί.

### 5.2.2 Ηλεκτρικοί κίνδυνοι

Όλος ο εξοπλισμός του laser προϋποθέτει υψηλή τάση. Επίσης, προϋποθέτει υψηλής ισχύος ενσωματωμένους συμπυκνωτές και διάφορα επικύνδινα εξαρτήματα που διατηρούν την αποθηκευμένη ενέργεια, όταν το σύστημα είναι κλειστό. Ακόμα περισσότερο, ορισμένα CO<sub>2</sub> laser έχουν RF (radio frequency) διέγερση, που πρέπει να περιφράσσεται κατά τη λειτουργία, για να προστατεύεται ο άνθρωπος από την ακτινοβολία. Γενικότερα, όλα τα laser είναι εξαιρετικά επικύνδινα από ηλεκτρικής άποψης. Στην πραγματικότητα, στην Ευρώπη και στις USA τα ατυχήματα που οφείλονται στα ηλεκτρικά, είναι περισσότερα από αυτά που αφορούν τα μάτια και το δέρμα. Πολλοί άνθρωποι έχουν πάθει ηλεκτροπληξία, όταν εργάζονταν με εξοπλισμό του laser. Επίσης πολλά ατυχήματα αφορούν ανθρώπους που δουλεύουν μόνοι σε υψηλών τάσεων κυκλώματα.

Όλα αυτά δείχνουν τη σημασία της εκπαίδευσης, της εργασίας σε ζευγάρια και την εργασία σε σωστές διαδικασίες. Τέλος το HSE Electricity at Work Act συμβουλεύει μόνο πλήρως εκπαιδευμένους ανθρώπους να χειρίζονται τον ηλεκτρικό εξοπλισμό του laser.

### 5.2.3 Κίνδυνοι από χημικά και αναθυμιάσεις

Τα αέρια που εξατμίζονται από τα CO<sub>2</sub> laser περιέχουν μονοξείδιο του άνθρακα. Πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερη προσοχή, αν το laser λειτουργεί σε μια ανεπαρκώς αεριζόμενη περιοχή. Το ιδανικό θα ήταν, τα εξατμισμένα αέρια να περνάνε μέσω σωλήνα έξω από το κτίριο, σε σημείο καθαρό από κατοικημένες περιοχές.

Τα παράθυρα εξόδου του laser και η μετάδοση της οπτικής εστίασης (που είναι κατασκευασμένα από αρσενικό γάλλιο και από σεληνικό ψευδάργυρο), είναι τοξικά επικύνδινα, αν πάθουν βλάβη. Ο κίνδυνος αυξάνεται αν αυτά τα υλικά υπερθερμανθούν, με αποτέλεσμα την αποσύνθεση τους και την οξειδωση τους. Αυτά, προκαλούν τοξικά οξείδια του αρσενικού και του σεληνίου. Η μορφή τους είναι σαν επικάθηση κόνεως, που καθιζάνουν στο σημείο της θερμικής βλάβης, και πρέπει να προσεχτούν ιδιαίτερα.

Όταν τήκονται τα συγκολλημένα μέταλλα, ελευθερώνονται μολυντικά αέρια που έχουν την μορφή μεταλλικής σκόνης, μεταλλικές οξειδίες αναθυμιάσεις και χημικά αέρια. Όλα αυτά είναι πολύ επικύνδινα για την υγεία, ειδικά αν το μέταλλο περιέχει επικύνδινα συστατικά, όπως κάδμιο και βηρύλλιο. Έτσι, σχεδόν όλες οι αναθυμιάσεις είναι βλαβερές και πρέπει να μην εισπνοηθούνε.

## 5.3 Πρακτικές προφυλάξεις

### 5.3.1 Προφυλάξεις από την ακτίνα laser

Όλη η εργασία που έχει σχέση με την μετάδοση της ακτίνας laser και τα συστήματα εστίασης της, όπως ο χειρισμός, η εγκατάσταση, η ρύθμιση και η συντήρηση, πρέπει να γίνουν από ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό. Ολόκληρη η δίοδος μετάδοσης της ακτίνας laser, από το σημείο όπου η ακτίνα φεύγει από το laser, ως την έξοδο της από το μηχάνημα, πρέπει να είναι κλειστή. Όλα τα κανάλια εισόδου στη δίοδο μετάδοσης του laser, πρέπει να διαθέτουν ηλεκτρικά προσαρμοσμένα συνδετικά ελάσματα, που επανέρχονται αυτόματα στο ανοικτό κύκλωμα και επίσης, αυτόματα κλείνουν τη μετάδοση της ακτίνας laser, όταν το κανάλι έχει μετατοπιστεί. Όταν ευθυγραμμιστεί ο καθρέπτης σε ένα CO<sub>2</sub> laser, είναι απαραίτητο να προσπεραστούν αυτές οι προστατευτικές διατάξεις.

Το μηχάνημα laser, είτε είναι στατικό, είτε μετακινούμενο, πρέπει να χειρίζεται μέσα από μια ασφαλή περίφραξη. Όλες οι εισοδοί πρέπει να διαθέτουν διακόπτες, οι οποίοι σταματούν την μετάδοση της ακτίνας laser, αν οι εισοδοί είναι ανοικτές. Σαν διπλό μέσο προστασίας, το ίδιο κλειδί που ξεκινάει το χειρισμό του laser, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για το άνοιγμα των εισόδων περίφραξης. Αυτό κάνει απαραίτητο το κλείσιμο της λειτουργίας του laser, για την είσοδο στην περίφραξη.

> Οι σωλήνες της μετάδοσης της ακτίνας και τα απαραίτητα καλώδια, πρέπει να τοποθετηθούν έτσι ώστε να μην χτυπηθούν και καταστραφούν από γεραμούς, οχήματα και άλλου, παρομοίου, είδους μηχανήματα.

> Τα τοιχώματα περίφραξης της ασφάλειας πρέπει να είναι φτιαγμένα από υλικά που απορροφούν την ακτίνα laser και δεν πιάνουν φωτιά (ενδείκνυται χάλυβας ή τούβλα). Πρέπει επίσης να βρίσκονται σε απόσταση από την πηγή του laser φωτός, όπου η ισχύς πυκνότητας του laser είναι πολύ χαμηλή, για να προκαλέσει λιώσιμο και φωτιά. Στην περίπτωση των στάσιμων μηχανών ακτινών laser, αυτές οι δυο απαιτήσεις δεν προκαλούν σοβαρό πρόβλημα, αφού η μηχανή του laser και των αερίων, ελαχιστοποιούν την περιοχή όπου κάθε ανακλώμενο φως μπορεί να διαφύγει. Το φως αντανακλά σε μία ίση και αντίθετη γωνία, από τη γωνία πρόσπτωσης και επίσης, αν η μηχανή του laser έχει τοποθετηθεί φυσιολογικά στην επιφάνεια εργασίας, κάθε ανακλώμενο φως θα ανακλαθεί πάλι προς τη μηχανή και θα απορροφηθεί από αυτή. Ο μεγαλύτερος όμως κίνδυνος προέρχεται από τις μηχανές laser που χειρίζονται σε κάθε διεύθυνση. Αυτές μπορούν να μεταφερθούν μακριά

από την εργασία, και να προκαλέσουν ατύχημα και στα τοιχώματα περίφραξης. Σε αυτή την περίπτωση η ακτίνα, δυστυχώς αποκλίνει. Σε μια απόσταση από την μηχανή του laser ίση με το μήκος εστίασης, η διάμετρος της ακτίνας γίνεται ίση με την διάμετρο της ακτίνας που προσπίπτει στην οπτική εστίαση και θα έχει ακόμα επικύνδινη ισχύ πυκνότητας (τυπικά  $10\text{W}/\text{mm}^2$ ). Όμως, 5 φορές μακρύτερα του μήκους εστίασης, η ακτίνα θα είναι 6 φορές μεγαλύτερη σε διάμετρο και η ισχύς πυκνότητας μειώνεται κατά 36 φορές και σε λιγότερο επικύνδινο επίπεδο. Παρόλα αυτά, αναλόγως με την αρχική ισχύ του laser ακόμα και σε αυτό το επίπεδο μπορεί να προκαλέσει καψίματα στο δέρμα και ζημιά στα μάτια (για την αποφυγή του καψίματος στο δέρμα και των βλαβών στα μάτια, η ισχύς πυκνότητας από ένα  $\text{CO}_2$  laser πρέπει να είναι κάτω του  $0,1\text{W}/\text{mm}^2$ ).

Το όλο νόημα είναι ότι, πρέπει να υπάρχει μια επαρκής απόσταση μεταξύ των τοιχών περίφραξης και της μηχανής του laser, ώστε η ισχύς πυκνότητας της ακτίνας όταν χτυπάει στον τοίχο να μην μπορεί να προκαλέσει, σε καμία περίπτωση, αρκετή θερμότητα και σαν συνέπεια, το λιώσιμο και το κάψιμο της περίφραξης.

> Οι περιφράξεις στα παράθυρα των Nd: YAG laser είναι φτιαγμένα από ειδικό υλικό από τον κατασκευαστή του laser και είναι αρκετά ακριβά. Τα γυάλινα και τα ακρυλικά ελάσματα είναι διαπερατά από το  $1,06\mu\text{m}$  μήκους κύματος του Nd:YAG laser φωτός, και δεν πρέπει να χρησιμοποιείται, εκτός αν προστεθεί μια ειδική απορροφητική ταινία επικάλυψης. Λόγω του υψηλού κινδύνου βλάβης των ματιών από ένα Nd:YAG laser, ενδείκνυται ένα κλειστό κύκλωμα τηλεόρασης (εκτός από τα παράθυρα) για την παρακολούθηση της λειτουργίας της συγκόλλησης. Με την προσθήκη όλων των παραπάνω, η συγκόλληση μπορεί να γίνει με απόλυτη ασφάλεια.

> Οι περιφράξεις στα παράθυρα των  $\text{CO}_2$  laser είναι φτιαγμένα από ακρυλικό υλικό, όπως το περσπέξ (άθραυστος ύαλος). Αν μια πλανώμενη ακτίνα laser με επαρκή ισχύ πυκνότητας χτυπήσει αυτό το υλικό, παράγει γρήγορα μαύρο καπνό. Σε αυτή την περίπτωση η κινητοποίηση του χειριστή και του άλλου προσωπικού πρέπει να είναι άμεση. Ένα καλό και επαρκές σύστημα ασφαλείας για το  $\text{CO}_2$  laser, είναι η περίφραξη με διπλό υαλωμένο τζάμι που περιλαμβάνει 2 ακρυλικά ελάσματα πάχους  $6\text{mm}$ , που χωρίζονται από ένα κενό, γεμισμένο με νερό. Αυτά τα τζάμια μπορούν να δεχτούν την ακτίνα laser για αρκετά λεπτά πριν συμβεί φωτιά στο πρώτο έλασμα. Για ακόμα περισσότερη ασφάλεια, μέσα στο νερό είναι ενσωματωμένος ένας ευαίσθητος αισθητήρας. Έτσι, τη στιγμή που το νερό διαφεύγει από το παράθυρο, αν συμβεί φωτιά στο πρώτο έλασμα, ο αισθητήρας δίνει σήμα στο laser να σταματήσει τη λειτουργία,



> Στην εγκατάσταση ενός Nd:YAG laser , είναι απαραίτητη η προσέγγιση της μηχανής laser και η ρύθμιση ανάλογα, όταν χρησιμοποιείται μικρή ισχύ laser. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ακολουθώντας τις γενικές οδηγίες για την προστασία των ματιών (π.χ.για τη Μεγάλη Βρετανία : Eyes Regulation 1974,Certificate of Approval No.2(5)), πρέπει το προσωπικό απαραίτητα να προμηθευτεί προστατευτικά γυαλιά.

> Όταν τοποθετούνται τα κομμάτια για συγκόλληση με laser, είναι ιδιαίτερα σημαντική η εκτίμηση της διεύθυνσης των ανακλάσεων του laser φωτός από το κομμάτι. Επίσης ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται και η κλίση της ζώνης συγκόλλησης σε σχέση με τη θέση των παραθύρων, ώστε τα παράθυρα να μην κείτονται στη δίοδο κάθε ανάκλασης από τη ζώνη συγκόλλησης. Αυτό το φαινόμενο απαιτεί ειδική προσοχή όταν η εργασία γίνεται με υλικά υψηλής ανακλαστικότητας, όπως το αλουμίνιο και ο χαλκός.

> Η πρόσβαση στη μηχανή του laser πρέπει να επιτρέπεται σε άτομα που έχουν την αίσθηση του κινδύνου της ακτίνας laser. Επίσης σαν πρόσθετο μέτρο προστασίας μπορούν να τοποθετηθούν ειδικές πινακίδες που υποδεικνύουν την ύπαρξη ακτίνας laser και την αναγκαιότητα των γυαλιών προστασίας.

> Πειραμαμένοι χειριστές της ακτίνας laser και προϊστάμενοι πρέπει να επιβλέπουν συνεχώς το νεότερο προσωπικό, την ασφάλεια λειτουργίας και την τακτική συντήρηση όλου του εξοπλισμού.

### **5.3.2 Ηλεκτρικές προφυλάξεις**

(Οι παρακάτω πληροφορίες αναφέρονται μόνο στα laser)

> Τα ηλεκτρικά συστήματα των laser δουλεύουν σε τρία επίπεδα τάσεων :

- Χαμηλή τάση (τυπικά 24V)
- Μέση τάση ( 115-450V)
- Υψηλή τάση (της τάξεως του KV)

Στα δυο τελευταία επίπεδα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή. Πάντως, η συντήρηση και η επισκευή όλων των παραπάνω, πρέπει να γίνονται από ειδικούς μηχανικούς στον ηλεκτρισμό σε συνεργασία με τις οδηγίες του κατασκευαστή του laser.

> Πριν την επισκευή ή τη συντήρηση του εξοπλισμού, όλο το σύστημα πρέπει πάντα να απομονώνεται από την ηλεκτρική παροχή. Αν είναι δυνατόν, θα ήταν πολύ χρήσιμο το κλειδί με λουκέτο του απομονωτήρα στη θέση off, αλλιώς θα πρέπει να μετακινηθούν οι γενικές ασφάλειες. Τέλος είναι απαραίτητη η βεβαίωση της θέσεως όλων των υψηλών τάσεων συμπυκνωτών και η σύνδεση τους με τη γη, χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους καθετήρες.

> Τα καλώδια και οι τελικές συνδέσεις πρέπει να είναι σωστά τοποθετημένα, όταν γίνεται αντικατάσταση τμημάτων, για την αποφυγή της πιθανότητας σχηματισμού τόξου στις συνδέσεις.

> Για την κατασκευή του εξοπλισμού και των εξαρτημάτων, μπορεί να κριθεί απαραίτητο η εργασία να γίνεται σε «ζωντανά» κυκλώματα και ακολουθώντας τις οδηγίες του κατασκευαστή. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο μηχανικός δεν πρέπει ποτέ να εργάζεται μόνος και η διαδικασία της εργασίας πρέπει να συζητηθεί και να συμφωνηθεί με τον Υπεύθυνο Ασφαλείας. Ωστόσο, πρέπει να τοποθετηθούν ετικέτες προειδοποίησης σε περιοχές με ηλεκτρικούς κινδύνους και όπου κριθεί απαραίτητο, να τοποθετηθούν ειδικές μπάρες απαγόρευσης εισόδου γύρω από τις επικύνδινες ζώνες.

### 5.3.3 Προφυλάξεις από χημικά και αναθυμιάσεις

> Σε περίπτωση υποψίας θερμικής βλάβης των οπτικών υλικών αρσενικού γαλλίου και σεληνικού ψευδαργύρου (τα οποία όταν θερμανθούν παράγουν επικαθημένη σκόνη τοξικών οξειδίων), πρέπει να περάσουν ορισμένα λεπτά για την πλήρη καθίζηση των οξειδίων, πριν γίνει κάποια διαδικασία (συντήρηση, επιθεώρηση κ.α). Για αυτές τις διαδικασίες πρέπει να φορεθούν οπωσδήποτε μάσκα προσώπου και πολυεθυλενικά γάντια. Η καθιζάμενη σκόνη πρέπει να σκουπιστεί καλά με υγρά μαντήλια, για το μάζεμα των οξειδίων. Τα μαντήλια αυτά μετά πρέπει να εκπλυθούν σε νερό για να διασκορπιστεί η σύνθεση της σκόνης οξειδίου, σε αυτό.

> Σε κάθε διαδικασία που εκτελείται, αν βρεθούν οπτικά υλικά αρσενικού γαλλίου και σεληνικού ψευδαργύρου, που είναι μη ωφέλιμα και τελείως ακατάλληλα, πρέπει να λαμβάνονται σαν τοξικά απόβλητα και να απομακρύνονται αναλόγως.

> Όλες οι αναθυμιάσεις των συγκολλήσεων είναι εξαιρετικά επικύνδινες και πρέπει να χρησιμοποιηθούν συστήματα εξαγωγής και επίσης η ζώνη συγκόλλησης πρέπει να εξαερίζεται επαρκώς (πάντως η εξαέρωση δεν πρέπει να αποσυνθέτει το προστατευτικό αέριο μπροστά από την οπή συγκόλλησης). Υπάρχουν δυο είδη συστημάτων εξαγωγής : αυτά που απομακρύνουν μόνο συγκεκριμένα απόβλητα και αυτά που απομακρύνουν όλα τα αέρια και κάποια συγκεκριμένα απόβλητα. Για τις διαδικασίες συγκόλλησης, ο τελευταίος τύπος που χρησιμοποιείται είναι μια επέκταση του πρώτου συστήματος όπου οδηγούνται τα αέρια εξαγωγής έξω από το κτίριο σε υψηλό επίπεδο, και μακριά από παράθυρα, από εισαγωγή αέρα και κατοικιμένες περιοχές. Η εκλογή του τύπου και του μεγέθους του συστήματος εξαγωγής εξαρτάται, από τα υλικά που θα συγκολληθούν, το μέγεθος της παραγωγής και τη συγκέντρωση των παραγόμενων αναθυμιάσεων. Π.χ οι οδηγίες υγιεινής της Μεγάλης Βρετανίας (Guidance Note EH40) αναφέρει ότι η συγκέντρωση των αναθυμιάσεων συγκόλλησης δεν πρέπει να ξεπερνά το ποσό των  $5\text{mg}/\text{m}^3$ . Αυτή η εκτίμηση δεν είναι απλή και απαιτεί ειδικό εξοπλισμό για την αντιμετώπιση του. Συνεπώς, για την εξασφάλιση όλων των απαιτήσεων που χρειάζονται, πρέπει να ξεκαθαριστεί η κατάσταση της διαδικασίας και να ζητηθεί η συμβουλή του προμηθευτή του συστήματος εξαγωγής των αναθυμιάσεων.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- >Christopher Dawes "Laser Welding : A Practical Guide"
- >Δρ. Α.Α Καράμπελα <Εξοικονόμηση ενέργειας. Εφαρμογές των laser στην βιομηχανία
- >David Havrilla, Philip Anthony "Laser Cutting, Process Fundamentals and Troubleshooting Guideline"
- >David Havrilla "Laser Welding Design and Process Fundamentals and Troubleshooting Guideline"
- >Powell, Dr. J. "CO<sub>2</sub> Laser Cutting", Springer- Verlag, 1993.
- >Hiltz, C.B. "Understanding Laser Technology", PennWell Books.