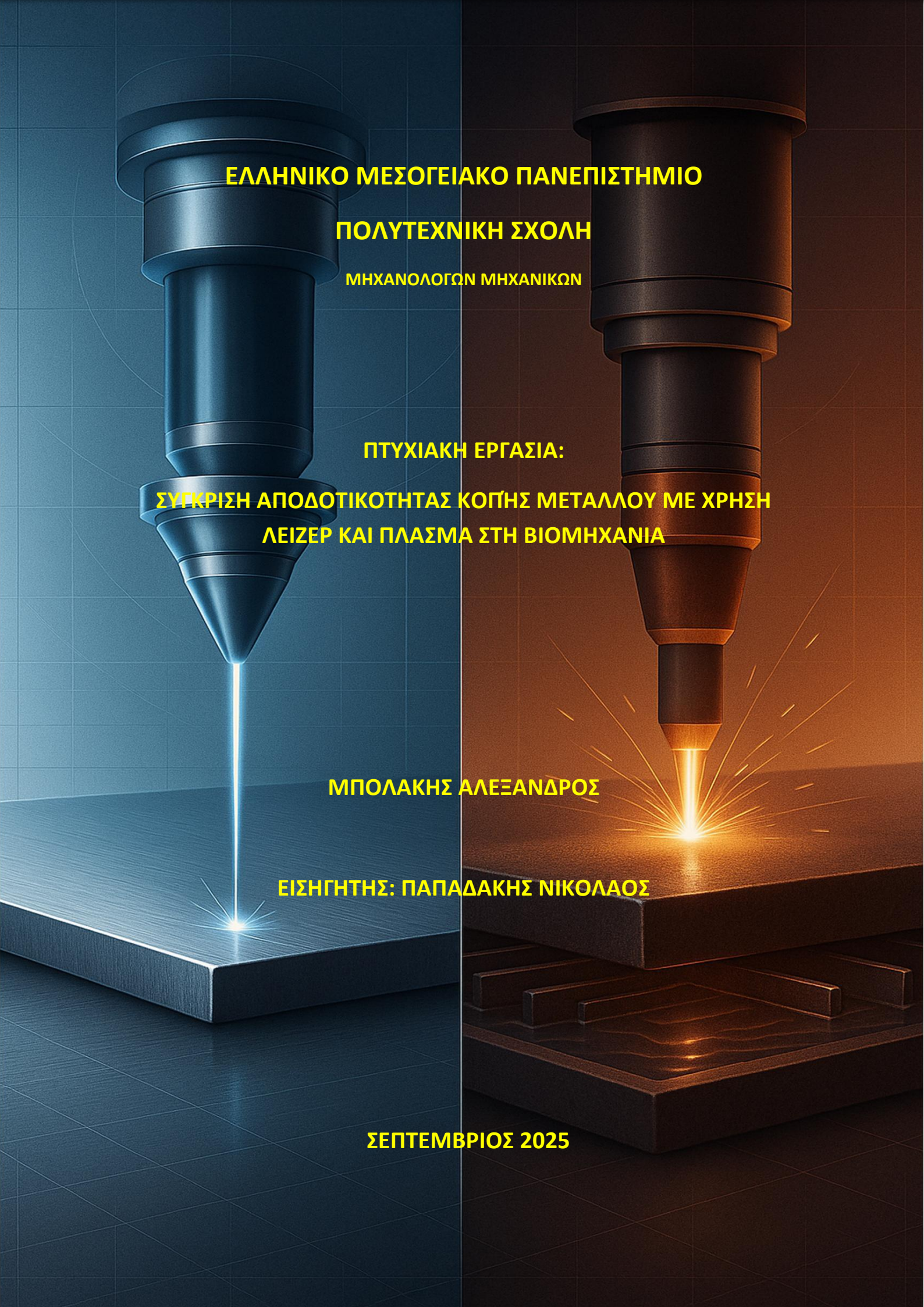


ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΟΠΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΛΕΙΖΕΡ ΚΑΙ ΠΛΑΣΜΑ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

ΜΠΟΛΑΚΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2025

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου εκτίμηση στον επιβλέπων κ. Νικόλαο Παπαδάκη για την καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη που έδειξε απέναντί μου. Ευχαριστώ τη σύζυγό μου, Λαμπρινή, που ήταν συνοδοιπόρος μου όλα αυτά τα χρόνια, τα παιδιά μου, τους συγγενείς και τους φίλους που με στήριξαν σε όλη αυτή την επίπονη διαδικασία της ολοκλήρωσης των σπουδών μου. Χωρίς τη στήριξη και βοήθειά όλα φαντάζουν ανέφικτα.

Ηράκλειο Σεπτέμβριος 2025

Αλέξανδρος Μπολάκης

Περίληψη

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία αξιολογείται συγκριτικά η κοπή μετάλλων με λέιζερ και με πλάσμα ως προς την ποιότητα τομής, γεωμετρική ακρίβεια, παραγωγικότητα και λειτουργικό κόστος για να δούμε σε τι προφίλ εταιρείας ταιριάζει καλύτερα η κάθε τεχνολογία. Ως υλικό μελέτης επιλέχθηκε ναυπηγικός χάλυβας ASTM A131 Grade A, με δοκίμια διαστάσεων 200x150mm, δύο οπές Ø20mmκαι απόσταση κέντρων 150mm, σε τέσσερα πάχη(4,8,12,16 mm).Η κοπή λέιζερ πραγματοποιήθηκε σε σύστημα fiber 6kW με βοηθητικό αέριο O_2, ενώ η κοπή πλάσματος σε σύστημα 200A με αέρα(water table). Η έρευνα συνδυάζει θεωρητική ανάλυση με πρακτική αξιολόγηση όπου περιλαμβάνει οπτικό έλεγχο(οξειδώσεις, γρέζια, HAZ), μετρολογικές μετρήσεις(διαστάσεις άνω/κάτω όψης, διάμετρος οπών, απόσταση κέντρων) για εκτίμηση λοξότητας(taper)και καταγραφή ταχυτήτων κοπής για περίγραμμα και οπές.

Λέξεις κλειδιά: laser cutting, plasma cutting, HAZ, taper, kerf,ποιότητα κοπής, παραγωγικότητα,CAPEX, OPEX.

Abstract

This thesis presents a comparative evaluation of laser and plasma metal cutting in terms of cut quality, geometric accuracy, productivity and operating cost, with the aim of identifying the company profiles for which each technology is best suited. The material under study was shipbuilding steel ASTM A131 Grade A. Specimens measured 200x150mm with two Ø20mm holes and a 150mm center to center distance, produced in four thicknesses (4,8,12,16mm).Laser cutting was performed on a 6kW fiber laser system using O_2 as the assist gas, while plasma cutting was carried out on a 200Asystem using air with a water table. The research combines theoretical analysis with a practical evaluationwhich includes visual inspection (oxidation, dross, HAZ), dimensional metrology (top/bottom face dimensions, hole diameter, hole center distance) to estimate taper, and recording cutting speeds for both the outer contour and the holes.

Key words: laser cutting, plasma cutting, HAZ, taper, kerf, cut quality, productivity, CAPEX, OPEX.

Περιεχόμενα

Περίληψη 3
Abstract 3
Λεξιλόγιο 7
Εισαγωγή 9
Λέιζερ 10
Αρχή λειτουργίας 10
Τεχνικά χαρακτηριστικά 12
Ανάλυση τεχνικών κοπής αναλόγως το είδος του ελάσματος. 16
Κρίση ποιότητας κοπής με λέιζερ 18
Τρόποι αντιμετώπισης άσχημων αποτελεσμάτων. 22
HAZ (Heat Affected Zone) 24
Παράγοντες που επηρεάζουν τη HAZ κατά τη διαδικασία της κοπής 25
Μέθοδοι περιορισμού 26
Συντήρηση συστήματος κοπής με laser 26
Κόστος 27
Κύριοι παράγοντες κόστους 27
Συνολική εκτίμηση 29
Plasma 29
Αρχή λειτουργίας 29
Τεχνικά χαρακτηριστικά 33
Ανάλυση τεχνικών κοπής αναλόγως το είδος του ελάσματος 38
Επίπεδα ακτινοβολίας στην κοπή μετάλλων με πλάσμα 42
Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση της ακτινοβολίας 43
Όρια έκθεσης και κανονισμοί 44
Μέτρα ατομικής και συλλογικής προστασίας 45
Συντήρηση 45
Πρόγραμμα συντήρησης 46
Κόστος 48
Συνολική εκτίμηση 49
Πειραματικό μέρος 50
Περιγραφή 50

Εξοπλισμός 50
Συλλογή εικόνων δοκιμίων..... 51
Αποτελέσματα μετρήσεων 56
Παρατηρήσεις:..... 56
Συμπεράσματα 57
Βιβλιογραφία..... 60

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση βασικών τύπων λέιζερ που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανική κοπή μετάλλων, με ενδεικτικά μήκη κύματος, πλεονεκτήματα και περιοχές εφαρμογής. 12
Πίνακας 2: Σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών λέιζερ και ενδεικτικές βιομηχανικές τιμές.. 15
Πίνακας 3: Σύγκριση τεχνικών κοπής με λέιζερ ανάλογα με το είδος του ελάσματος. 18
Πίνακας 4: Συνοπτική παρουσίαση συνηθισμένων προβλημάτων κοπής με λέιζερ, αιτιών και τρόπων αντιμετώπισης..... 24
Πίνακας 5: Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της HAZ. 26
Πίνακας 6: Μέθοδοι περιορισμού της HAZ κατά την κοπή με λέιζερ. 26
Πίνακας 7: Προτεινόμενο πρόγραμμα τακτικής συντήρησης συστήματος κοπής με λέιζερ . 27
Πίνακας 8: Παράγοντες κόστους. 28
Πίνακας 9:Πρότυπο υπολογισμού λειτουργικού κόστους ανά ώρα. 29
Πίνακας 10: Σύνοψη τεχνολογιών κοπής πλάσματος. 32
Πίνακας 11: Ενδεικτικές κλάσεις ισχύος και χρήσεις. 33
Πίνακας 12: Επιλογή αερίων ανά εφαρμογή. 35
Πίνακας 13: Οδηγός παραμέτρων ανά υλικό. 42
Πίνακας 14: Συχνά ελαττώματα ανά υλικό και διορθώσεις. 42
Πίνακας 15: Πίνακας ωρών έκθεσης σε ακτινοβολία σύμφωνα με τους οργανισμούς OSHA και ICNIRP. 44
Πίνακας 16: Κατηγορίες συντήρησης και ενδεικτικές ενέργειες. 46
Πίνακας 17: Κρίσιμα σημεία ελέγχου συντήρησης σε μηχανές κοπής πλάσματος. 46
Πίνακας 18:Ενδεικτικό εύρος αρχικού κόστους CNC plasma. 48
Πίνακας 19:Ενδεικτικά λειτουργικά κόστη ανά ώρα λειτουργίας. 48
Πίνακας 20:Παράγοντες κόστους και τρόποι βελτιστοποίησης. 49
Πίνακας 21:Αποτελέσματα οπτικής αναγνώρισης επιφάνειας κοπής. 56
Πίνακας 22:Διαστάσει δοκιμίων με κοπή πλάσμα. 56
Πίνακας 23:Διαστάσεις δοκιμίων με κοπή λέιζερ. 56
Πίνακας 24:Πίνακας ταχυτήτων κοπής πλάσμα-λέιζερ, ... 56
Πίνακας 25:Συνολική σύγκριση τεχνολογίας κοπής λέιζερ και πλάσμα.**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

Λεξιλόγιο

Όρος	Αγγλική ορολογία	Ορισμός
Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη	Heat Affected Zone (HAZ)	Περιοχή κοντά στην τομή όπου η μικροδομή/ ιδιότητες αλλάζουν από τη θερμότητα
Πλάτος τομής	Kerf	Το συνολικό πλάτος της γραμμής κοπής που αφαιρείται από το εργαλείο
Γρέζια/ Σκωρίες	Dross	Συσσωρεύσεις/ Σταγόνες λιωμένου μετάλλου στα άκρα της τομής
Αυτόματος έλεγχος ύψους	Torch Height Control (THC)	Σύστημα που κρατά σταθερή την απόσταση πυρσού- τεμαχίου
Αριθμητικός έλεγχος	CNC	Η αυτοματοποιημένη καθοδήγηση μηχανής μέσω κώδικα
Σχεδίαση/ Κατεργασία	CAD/CAM	Λογισμικό σχεδίασης και μετατροπής σε διαδρομές κατεργασίας
Ικανότητα διάτρησης	Pierce Capacity	Μέγιστο πάχος για εκκίνηση τομής από το κέντρο του υλικού
Μέγιστη αποκοπή	Severance Capacity	Απόλυτο μέγιστο πάχος που μπορεί να κοπεί(συνήθως χαμηλότερη ποιότητα/ ταχύτητα)
Βοηθητικό αέριο	Assist gas	Αέριο που απομακρύνει λιωμένο υλικό και επηρεάζει την ποιότητα/ οξείδωση
Ακροφύσιο	Nozzle	Εξάρτημα που διαμορφώνει/ συγκεντρώνει το τόξο ή τη δέσμη
Ηλεκτρόδιο	Electrode	Αναλώσιμου που φέρει/ εκκινεί το τόξο πλάσματος
Πυρσός	Torch	Κεφαλή κοπής όπου βρίσκονται ακροφύσιο, ηλεκτρόδιο, ψύξη, αέρια
Ποιότητα δέσμης	Beam Parameter Product (BPP)	Μέτρο εστιασιμότητας δέσμης λέιζερ που επηρεάζει την ακρίβεια
Μήκος κύμματος	Wave length	Χαρακτηριστικό της ακτινοβολίας λέιζερ που επηρεάζει την απορρόφηση του υλικού
Λέιζερ ινών	Fiber laser	Τύπος λέιζερ με ενεργό μέσο οπτική ίνα

Λέιζερ CO_2	CO_2 laser	Τύπος λέιζερ αερίου
Nd:YAG	Nd:YAG laser	Στερεάς κατάστασης λέιζερ για κοπή , συγκόλληση, σήμανση
Υψηλής ευκρίνειας πλάσμα	High Definition (HD) plasma	Τεχνολογία πλάσματος με υψηλή εστίαση/ ποιότητα τομής
Λεπτομερές πλάσμα	Precision/ Fine plasma	Βελτιωμένη ποιότητα έναντι συμβατικού πλάσματος
Υδατοθωρακισμένο πλάσμα	Water-shielded/ injection plasma	Τεχνική με νερό για σταθερό τόξο, μικρότερη HAZ, λιγότερες αναθυμιάσεις
Κεφαλαιουχικές δαπάνες	CAPEX	Κόστος αγοράς εγκατάστασης, παγίων(μηχανές, υποδομές)
Λειτουργικές δαπάνες	OPEX	Ρεύμα, αέρια, αναλώσιμα, service, συνδρομές- τρέχοντα έξοδα
Μέσα ατομικής προστασίας	PPE	Μάσκες, γυαλιά, γάντια, ρουχισμός
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection	Οργανισμός με όρια/ κατευθυντήριες για μη ιονίζουσα ακτινοβολία
OSHA	Occupational Safety and Health administration	Οργανισμός ασφάλειας και υγείας εργασίας
Βελτιστοποίηση στοίχισης	Nesting	Διάταξη κοπών για ελάχιστο τέμνον υλικό και σκραπ
G-code	G-code	Γλώσσα εντολών κίνησης CNC
Απόσταση κεφαλής	Standoff distance	Η απόσταση πυρσού τεμαχίου κατά την κοπή
Χρόνος μη διαθεσιμότητας	Downtime	Χρόνος που ο εξοπλισμός δεν παράγει(βλάβες, ρυθμίσεις, έλλειψη υλικού/αερίων
Μέγεθος εστίασης	Spot size	Διάμετρος της εστιασμένης δέσμης στο σημείο κοπής
Θέση εστίασης	Focus position/ focus offset	Σχετική θέση του «waist» ως προς την επιφάνεια ή το πάχος του υλικού

Εισαγωγή

Η μεταλλουργία και γενικότερα οι κατεργασίες μετάλλων αποτελούν θεμέλιο λίθο της ανθρώπινης τεχνολογικής εξέλιξης. Από την προϊστορική εποχή, όταν ο άνθρωπος ανακάλυψε και κατεργάστηκε τον χαλκό και τον σίδηρο, έως τη σύγχρονη βιομηχανία, η ικανότητα διαμόρφωσης των μετάλλων καθόρισε την ανάπτυξη των πολιτισμών, την παραγωγή εργαλείων, όπλων, μηχανών και βιομηχανικών υποδομών(Smith, 2019). Η πρόοδος στις μεταλλουργικές κατεργασίες υπήρξε στενά συνδεδεμένη με την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη, καθώς επέτρεψε την κατασκευή πιο ανθεκτικών και αποδοτικών προϊόντων(Askeland & Wright, 2016).

Στην πορεία της ιστορίας, οι τεχνικές κατεργασίας πέρασαν από απλές μεθόδους σφυρηλάτησης και χύτευσης σε ποιο σύνθετες διεργασίες, όπως η μηχανουργική κατεργασία, η συγκόλληση και η θερμική επεξεργασία. Ιδιαίτερα από τη Βιομηχανική Επανάσταση και έπειτα, η ανάπτυξη νέων υλικών και μηχανουργικών τεχνολογιών οδήγησε στην ανάγκη για πιο ακριβείς ταχύτερες και οικονομικότερες μεθόδους κοπής και μορφοποίησης μετάλλων(Kalpakjian et al.,2014).

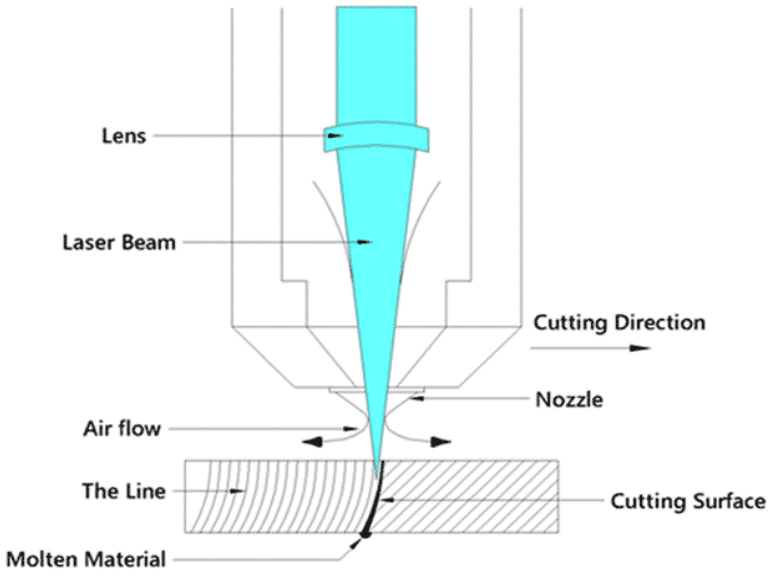
Η κοπή μετάλλων αποτελεί μια από τις βασικότερες κατεργασίες, καθώς συνδέετε με σχεδόν κάθε στάδιο παραγωγής στη βιομηχανία. Παραδοσιακές μέθοδοι, όπως η μηχανική κοπή με εργαλεία ή η οξυγονοκοπή, παρότι παραμένουν σε χρήση, έχουν σε μεγάλο βαθμό συμπληρωθεί από προηγμένες τεχνικές, όπως η κοπή με λέιζερ και η κοπή με πλάσμα. Οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται στη χρήση υψηλής ενέργειας(φωτονικής ή ηλεκτρικού τόξο) για τον καθαρό και ταχύ διαχωρισμό των μετάλλων, προσφέροντας πλεονεκτήματα ως προς την ακρίβεια, την ποιότητα κοπής και την παραγωγικότητα(Ion, 2005; Powel, 1993).

Στο πλαίσιο αυτό η παρούσα εργασία εστιάζει στη σύγκριση της αποδοτικότητας κοπής μετάλλου με χρήση λέιζερ και πλάσμα, αναλύοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μεθόδου, καθώς και την εφαρμογή τους σε διάφορους τύπους μετάλλων. Μέσα από αυτή τη μελέτη επιδιώκεται να αναδειχθεί η συμβολή των σύγχρονων τεχνικών κοπής στην εξέλιξη της βιομηχανικής παραγωγής και να τεκμηριωθεί η καταλληλότητά τους σε διαφορετικά πεδία εφαρμογής.

Λέιζερ

Αρχή λειτουργίας

Η κοπή μετάλλων με λέιζερ αποτελεί μία προηγμένη και εξαιρετικά ακριβή θερμική κατεργασία, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στη σύγχρονη βιομηχανία για την επεξεργασία μεταλλικών φύλλων και εξαρτημάτων. Η βασική αρχή λειτουργίας της μεθόδου στηρίζεται στη συγκέντρωση μιας ακτίνας λέιζερ υψηλής έντασης σε ένα πολύ μικρό και καλά εστιασμένο σημείο της επιφάνειας του μετάλλου. Η ενέργεια της ακτίνας αυτής απορροφάται από το υλικό, με αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας σε τοπικό επίπεδο, που οδηγεί στην τήξη, την εξάχνωση ή ακόμα και την καύση του μετάλλου, ανάλογα με το είδος του υλικού και τις συνθήκες κοπής(Luvertini et al.,2020). Παράλληλα, ένα βοηθητικό αέριο – συνήθως οξυγόνο, άζωτο ή αργό – διοχετεύεται στην περιοχή κοπής υπό πίεση. Ο ρόλος του βοηθητικού αερίου είναι κρίσιμος, καθώς συμβάλλει στην απομάκρυνση του λιωμένου ή εξαχνωμένου υλικού από τη ζώνη επεξεργασίας, διασφαλίζοντας καθαρή και ακριβή τομή(ACCURL, 2024; Baison laser, 2024). Επιπλέον, το είδος του αερίου μπορεί να επηρεάσει τόσο την ποιότητα της κοπής όσο και τη θερμική επίδραση στο τεμάχιο: για παράδειγμα, το οξυγόνο ενισχύει τη διαδικασία καύσης και αυξάνει τη θερμική απόδοση, ενώ το άζωτο και το αργό είναι αδρανή αέρια και μειώνουν την οξείδωση, προσφέροντας υψηλότερη ποιότητα στην τελική κοπή. Η τεχνολογία λέιζερ προσφέρει εξαιρετική ακρίβεια, υψηλή ταχύτητα κοπής, ελάχιστη παραμόρφωση του υλικού και δυνατότητα επεξεργασίας σύνθετων γεωμετριών. Λόγω αυτών των πλεονεκτημάτων, η κοπή με λέιζερ έχει καθιερωθεί ως μία από τις πιο αποδοτικές μεθόδους στην κατεργασία μεταλλικών υλικών, ιδίως σε τομείς όπου η ποιότητα και η λεπτομέρεια παίζουν καθοριστικό ρόλο, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που καλύπτει από τη βαριά βιομηχανία έως την ιατρική τεχνολογία και τις μικροκατασκευές(Zealot Manufacturing, 2025; EVS Metal, 2025).



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας κοπής με λέιζερ.



Εικόνα 2:Κεφαλή κοπής λέιζερ.

Στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται τα παρακάτω είδη λέιζερ:

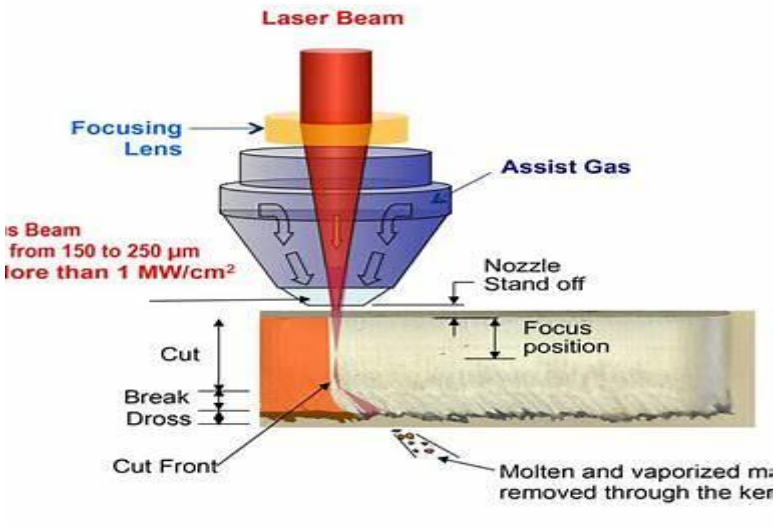
- **CO_2 Laser**: Χρησιμοποιεί μείγμα αερίων(διοξείδιο του άνθρακα) και εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία. Κατάλληλο για πάχη μέχρι 20mm(Mac Tech,2025).
- **Fiber laser**: Εκπέμπει μέσω οπτικών ινών. Προσφέρει υψηλότερη απόδοση, μικρότερη συντήρηση και καλύτερη εστίαση. Ιδανικό για κοπή λεπτών και ανακλαστικών μετάλλων(Mac Tech,2025; Zealot Manufacturing,2025;EVS Metal, 2025).
- **Nd:YAG (Ιττριο-Αλουμίνιο-Γρανάτη)**: Κατάλληλο για συγκόλληση και κοπή λεπτών μετάλλων με μεγάλη ακρίβεια(Abdel Ghany & Newishy, 2025).

Πίνακας 1: Σύγκριση βασικών τύπων λέιζερ που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανική κοπή μετάλλων, με ενδεικτικά μήκη κύματος, πλεονεκτήματα και περιοχές εφαρμογής.

Τύπος λέιζερ	Μήκος κύματος	Πλεονεκτήματα	Κατάλληλο για
CO_2 laser	~10.6 μm	Κόβει παχύτερα υλικά, καλύτερο φινίρισμα	Πάχη έως 20mm, μη μεταλλικά υλικά
Fiber laser	~1.06 μm	Υψηλή απορρόφηση, γρήγορη ταχύτητα, μικρό spot	Λεπτά μεταλλικά ελάσματα
Nd: YAG	~1.06 μm	Ιδανικό για συγκόλληση και κοπή λεπτών μετάλλων	Εξειδικευμένες εφαρμογές

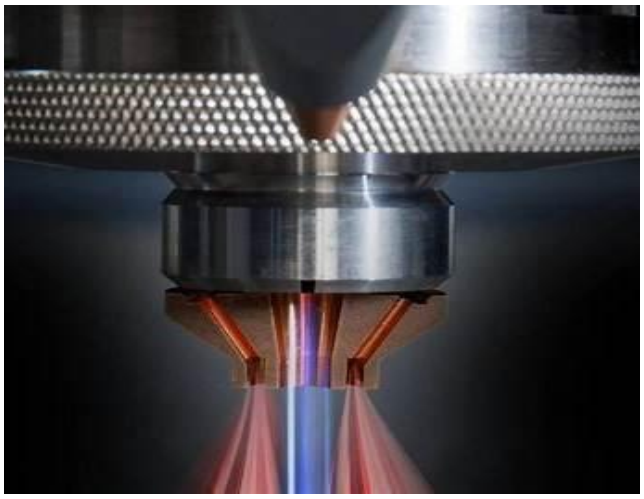
Τεχνικά χαρακτηριστικά

Η αποτελεσματικότητα και η ποιότητα της κοπής με λέιζερ εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ίδιου του λέιζερ, της δέσμης που παράγει, καθώς και των παραμέτρων που ρυθμίζονται κατά τη διαδικασία κατεργασίας. Η κατανόηση αυτών των χαρακτηριστικών είναι απαραίτητη για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας και τη βέλτιστη ρύθμιση των μηχανημάτων κοπής(Lucertini et al.,2020).



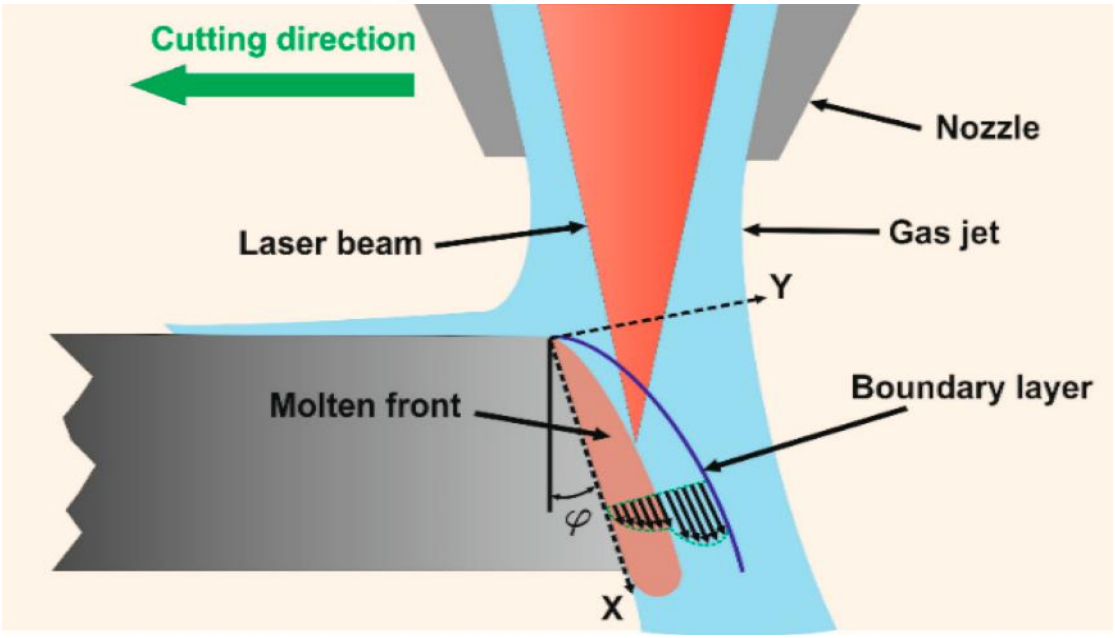
Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα αρχής λειτουργίας λέιζερ.

- **Ισχύς λέιζερ(Laser Power):** Η ισχύς του λέιζερ, που εκφράζεται συνήθως σε Watt ή kilowatt, καθορίζει την ικανότητα του συστήματος να κόψει διαφορετικά υλικά και πάχη. Υψηλότερη ισχύς επιτρέπει την κατεργασία παχύτερων μεταλλικών φύλλων και αυξάνει την ταχύτητα κοπής, ωστόσο συνοδεύεται από μεγαλύτερη θερμική επίδραση στο υλικό. Στην κοπή μετάλλων, οι συνήθεις ισχύς κυμαίνονται από 1 έως 12 kW, με τα συστήματα υψηλής απόδοσης να ξεπερνούν ακόμη και τα 20 kW (Zealot Manufacturing, 2025).



Εικόνα 4: Πραγματική απεικόνιση ακροφυσίου λέιζερ κατά τη διαδικασία κοπής με gas assist.

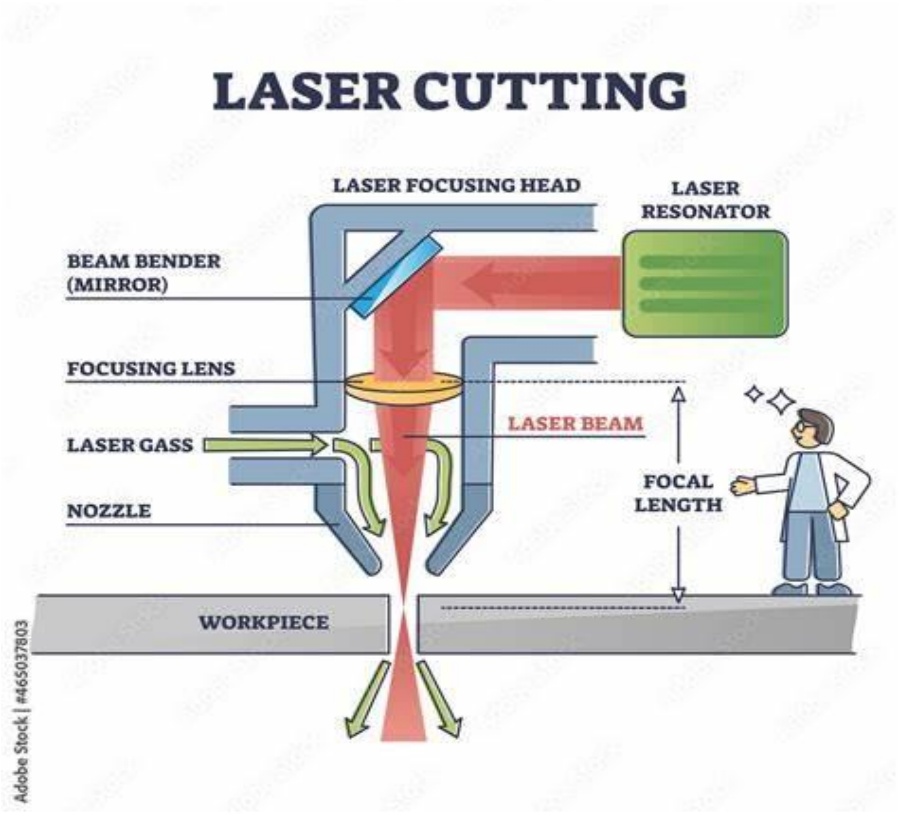
- **Μήκος κύματος(Wavelength):** Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας λέιζερ επηρεάζει την απορρόφησή της από το μέταλλο. Για παράδειγμα, τα λέιζερ CO_2 έχουν μήκος κύματος περίπου 10,6 μm και είναι πιο αποδοτικά σε μη μεταλλικά υλικά, αλλά χρησιμοποιούνται και σε μέταλλα με κατάλληλη ρύθμιση. Τα λέιζερ ινών (fiber lasers), με μήκος κύματος γύρω στο 1 μm, έχουν υψηλότερη απορρόφηση από μεταλλικά υλικά και θεωρούνται πιο κατάλληλα για βιομηχανική κοπή μετάλλων (Mac-Tech,2025).
- **Διάμετρος και εστίαση δέσμης(Beam Diameter and Focus):** Η διάμετρος της δέσμης λέιζερ καθώς και η ικανότητα εστίασής της σε ένα πολύ μικρό σημείο (spot size) είναι καθοριστικής σημασίας για την ακρίβεια και την ποιότητα κοπής. Όσο μικρότερο είναι το σημείο εστίασης, τόσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα ενέργειας και η δυνατότητα δημιουργίας καθαρών, λεπτομερών κοπών. Η σωστή ρύθμιση της εστίασης μειώνει επίσης τη θερμική παραμόρφωση του υλικού(Springer, 2019).



Εικόνα 5:Διορατική απεικόνιση της αλληλεπίδρασης του assist gas με τη λιωμένη επιφάνεια

Εικόνα 6:Διορατική απεικόνιση της αλληλεπίδρασης του assist gas με τη λιωμένη ζώνη.

- **Ταχύτητα κοπής(Cutting speed):** Η ταχύτητα με την οποία κινείται η δέσμη λέιζερ σε σχέση με το υλικό επηρεάζει την ποιότητα της τομής. Υψηλότερη ταχύτητα μειώνει τον χρόνο επεξεργασίας αλλά απαιτεί ισχυρότερη δέσμη και σταθερή απομάκρυνση του λιωμένου υλικού. Αντίθετα, χαμηλότερη ταχύτητα μπορεί να αυξήσει την ακρίβεια αλλά και τη θερμική επίδραση στο τεμάχιο(Mac-Tech, 2025).
- **Τύπος και πίεση βοηθητικού αερίου(Assist gas type and pressure):** Η επιλογή του κατάλληλου βοηθητικού αερίου είναι κρίσιμη για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας. Οξυγόνο χρησιμοποιείται συνήθως για την κοπή χάλυβα, διότι ενισχύει τη διαδικασία καύσης και αυξάνει την ταχύτητα κοπής. Το άζωτο ή το αργό χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται καθαρή τομή χωρίς οξείδωση, όπως σε ανοξείδωτους χάλυβες ή αλουμίνιο. Η πίεση του αερίου επηρεάζει την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης του λιωμένου υλικού(Baison Laser, 2024; ACCURL, 2024).



Εικόνα 7: Σχηματικό διάγραμμα της αρχής λειτουργίας κοπής λέιζερ.

- **Ποιότητα δέσμης(Beam Quality – BPP: Beam Parameter Product):** Η ποιότητα της δέσμης καθορίζει το πόσο αποτελεσματικά μπορεί να εστιαστεί η ακτίνα λέιζερ σε ένα μικρό σημείο. Χαμηλότερες τιμές BPP υποδεικνύουν υψηλότερη ποιότητα δέσμης, άρα και πιο ακριβή και καθαρή κοπή. Η ποιότητα δέσμης σχετίζεται άμεσα με τον σχεδιασμό του συστήματος λέιζερ και επηρεάζει την απόδοση και τη δυνατότητα κοπής σύνθετων σχημάτων(Mac-Tech, 2025).

Πίνακας 2: Σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών λέιζερ και ενδεικτικές βιομηχανικές τιμές.

Παράμετρος	Περιγραφή	Τυπικές τιμές στη βιομηχανία
Ισχύς λέιζερ	Δυνατότητα κοπής πάχους και ταχύτητα κατεργασίας	1-12kW (έως 20 kW
Μήκος κύματος	Απορρόφηση από το υλικό	CO_2: ~10.6μm Fiber/Nd:YAG: ~1μm
Διάμετρος και εστίαση	Καθορίζει την ακρίβεια κοπής	Spot size: 0.01-0.1mm
Ταχύτητα κοπής	Ποιότητα τομής και χρόνος παραγωγής	0,5-20m/min
Βοηθητικό αέριο	Καθαρή τομή, απομάκρυνση λιωμένου υλικού	O_2για χάλυβα , N_2/Ar για ανοξείδωτα και αλουμίνιο, 8-20Bar
Ποιότητα δέσμης(BPP)	Δυνατότητα ακριβούς εστίασης	<2mm·mrad

Ανάλυση τεχνικών κοπής αναλόγως το είδος του ελάσματος.

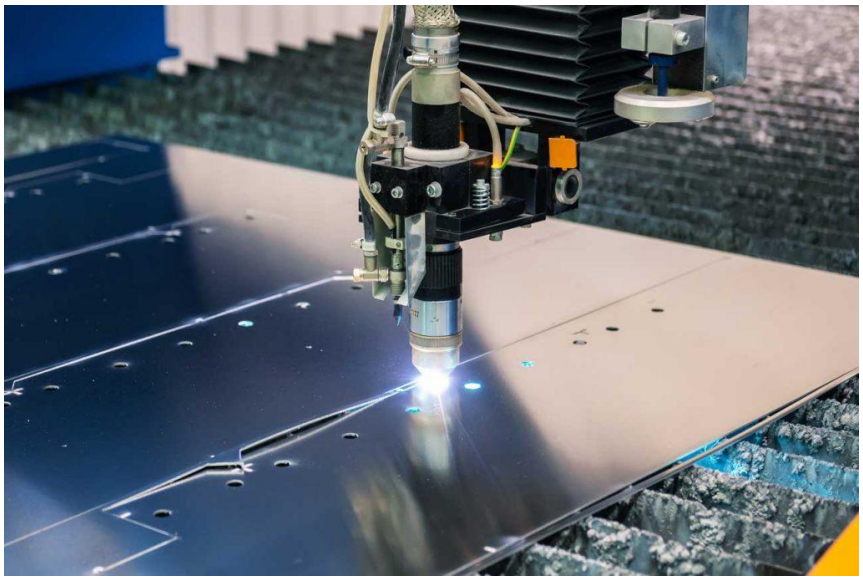
Η απόδοση και η ποιότητα της κοπής μετάλλων με λέιζερ εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το είδος του επεξεργαζόμενου ελάσματος. Παράγοντες όπως η χημική σύσταση, η ανακλαστικότητα, η θερμική αγωγιμότητα, το πάχος και η επιφανειακή κατάσταση του υλικού επιβάλλουν την προσαρμογή των παραμέτρων λειτουργίας του λέιζερ. Η σωστή επιλογή των τεχνικών κοπής σε συνάρτηση με το είδος του μετάλλου διασφαλίζει την ποιότητα της τομής, τη μηχανική ακρίβεια και την ελαχιστοποίηση θερμικών παραμορφώσεων.

- **Κοπή λεπτών ελασμάτων (έως 3 mm):**Τα λεπτά ελάσματα επεξεργάζονται με μικρότερη ισχύ λέιζερ, καθώς απαιτείται λιγότερη ενέργεια για τη διείσδυση της ακτίνας στο υλικό. Συνήθως χρησιμοποιείται άζωτο ως βοηθητικό αέριο για την αποφυγή οξείδωσης, ειδικά σε ανοξείδωτα υλικά ή αλουμίνιο. Η κοπή είναι ιδιαίτερα γρήγορη και ακριβής, με πολύ μικρό θερμικά επηρεαζόμενο ζώνη (HAZ – Heat Affected Zone). Η ποιότητα της ακμής είναι υψηλή και δεν απαιτεί επιπλέον κατεργασία(ACCURL, 2024).
- **Κοπή μεσαίου πάχους ελασμάτων (4 – 10 mm):**Σε αυτή την κατηγορία απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς λέιζερ (συνήθως από 3 έως 6 kW), καθώς και προσεκτική ρύθμιση της εστίασης. Η χρήση οξυγόνου σε χαλύβδινα ελάσματα ενισχύει τη θερμική κοπή μέσω της καύσης, ενώ σε ανοξείδωτα και κράματα επιλέγεται άζωτο ή αργό για καθαρότερες τομές. Η ταχύτητα κοπής μειώνεται σε σχέση με τα λεπτότερα ελάσματα, ενώ η θερμική παραμόρφωση γίνεται πιο εμφανής αν δεν υπάρχει σωστή ψύξη ή υποστήριξη του τεμαχίου(Zealot Manufacturing, 2025).
- **Κοπή παχέων ελασμάτων (άνω των 10 mm):**Η κοπή παχύτερων μεταλλικών φύλλων απαιτεί υψηλής ισχύος λέιζερ (άνω των 6 έως 12 kW) και βελτιστοποιημένη γεωμετρία εστίασης. Η ακτίνα πρέπει να παραμένει σταθερή καθ' όλο το βάθος του υλικού για να εξασφαλιστεί συνεχής και ομοιόμορφη διείσδυση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η θερμική επηρεαζόμενη ζώνη είναι μεγαλύτερη και συχνά απαιτείται μεταγενέστερη κατεργασία της τομής (π.χ. λείανση ή απογρέζωση). Οξυγόνο χρησιμοποιείται ευρέως, καθώς ενισχύει τη θερμική διαδικασία και μειώνει την απαιτούμενη ισχύ(EVS Metal, 2025).



Εικόνα 8: Ποιότητα κοπής παχέους ελάσματος έπειτα από κοπή με λέιζερ και πλάσμα.

- **Κοπή υψηλής ανακλαστικότητας υλικών (π.χ. αλουμίνιο, χαλκός, ορείχαλκος):**Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν ιδιαίτερη πρόκληση λόγω της υψηλής ανακλαστικότητας και θερμικής αγωγιμότητας τους. Απορροφούν λιγότερη ενέργεια, με αποτέλεσμα χαμηλή απόδοση κοπής και αυξημένο κίνδυνο επιστροφής ενέργειας στον οπτικό εξοπλισμό του λέιζερ. Σε αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται λέιζερ ινών (fiber laser) υψηλής ισχύος με μικρότερο μήκος κύματος (~1 μm) που απορροφάται πιο αποτελεσματικά από τα συγκεκριμένα μέταλλα. Το άζωτο συνιστάται ως βοηθητικό αέριο για την επίτευξη καθαρής κοπής χωρίς επιφανειακή αλλοίωση(Mac- Tech, 2025).



Εικόνα 9:Κοπή αλουμινίου/ υψηλής ανακλαστικότητας.

- **Κοπή ελασμάτων με επικάλυψη ή βαφή:** Τα επιστρωμένα ή βαμμένα μεταλλικά ελάσματα απαιτούν ρύθμιση της ισχύος και του ύψους κεφαλής λέιζερ ώστε να αποφεύγεται η εξάτμιση της επίστρωσης πριν την κοπή του υποστρώματος. Η χρήση αερίου καθαρισμού και η καλή ψύξη συμβάλλουν στην προστασία της ακμής και στην αποφυγή ρύπανσης της επιφάνειας κοπής. Η κατεργασία γίνεται συχνά σε δύο στάδια: προθέρμανση και κύρια κοπή(Caristan, 2004).

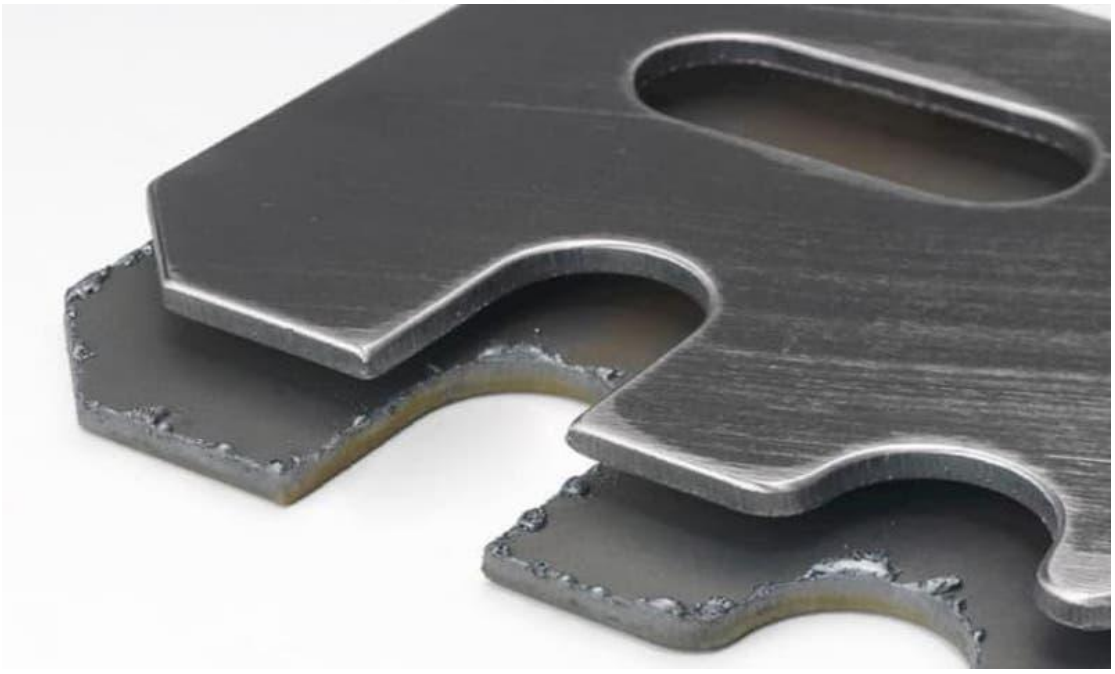
Πίνακας 3: Σύγκριση τεχνικών κοπής με λέιζερ ανάλογα με το είδος του ελάσματος.

Είδος ελάσματος	**Ισχύς λέιζερ**	**Βοηθητικό αέριο**	**Σχόλια/ Ιδιαιτερότητες**
Λεπτά φύλλα(≤3mm)	1-3kW	N_2	Γρήγορη, καθαρή κοπή, ελάχιστο HAZ
Μεσαία(4-10mm)	3-6kW	O_2(χάλυβας)/ N_2(Inox/Al)	Χαμηλότερη ταχύτητα, ανάγκη καλής εστίασης
Παχιά(>10mm)	6-12kW	O_2	Αυξημένη HAZ, ανάγκη απογρέζωσης
Υψηλής ανακλαστικότητας	Fiber υψηλής ισχύος	N_2	Αλουμίνιο, χαλκός ορείχαλκος- δύσκολη κοπή
Επικαλυμμένα/ Βαμμένα	Μεσαία ισχύς	N_2/ καθαριστικό αέριο	Απαιτείται έλεγχος για αποφυγή ρύπανσης ακμής

Κρίση ποιότητας κοπής με λέιζερ.

Η ποιότητα της κοπής μετάλλων με λέιζερ είναι ένα κρίσιμο στοιχείο που καθορίζει τόσο την αποδοτικότητα της διαδικασίας όσο και την καταλληλότητα του τελικού προϊόντος για περαιτέρω χρήση ή συναρμολόγηση. Η αξιολόγηση της ποιότητας βασίζεται σε ένα σύνολο τεχνικών και οπτικών παραμέτρων, οι οποίες συσχετίζονται με την ακρίβεια της κατεργασίας, τη θερμική επίδραση στο υλικό και την αισθητική του τεμαχίου(Ion,2005;Powell,1993).

- **Ομαλότητα και καθαρότητα τομής:** Η επιφάνεια της κοπής πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο λεία και απαλλαγμένη από γρέζια, σταγόνες ή σκωρίες. Η παρουσία γρεζιών υποδηλώνει ανεπαρκή ρύθμιση των παραμέτρων, όπως η ταχύτητα κοπής ή η πίεση του βοηθητικού αερίου. Η καθαρή και γυαλιστερή επιφάνεια δείχνει σωστή εστίαση της δέσμης και βέλτιστη απομάκρυνση του υλικού(Ion,2005).

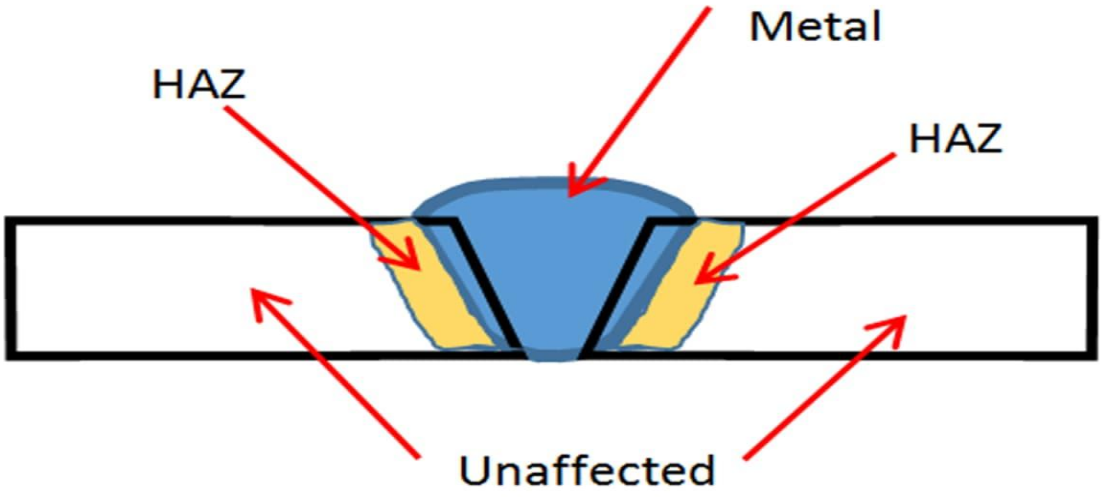


Εικόνα 10: Λεία και καθαρή τομή λέιζερ χωρίς γρέζια ή σκωρίες.

- **Γεωμετρική ακρίβεια:** ακρίβεια της κοπής αναφέρεται στη διατήρηση των διαστάσεων σύμφωνα με τις προδιαγραφές του σχεδίου. Η τεχνολογία λέιζερ επιτρέπει υψηλά επίπεδα ακρίβειας, συνήθως ±0,1 mm ή και καλύτερα. Οι αποκλίσεις μπορεί να οφείλονται σε μη σωστή ευθυγράμμιση της δέσμης, ανεπαρκή στήριξη του υλικού ή θερμική παραμόρφωση κατά την κοπή(Powell,1993).
- **Κατακόρυφο προφίλ τομής:** ιδανική κοπή με λέιζερ έχει κατακόρυφες ή ελαφρώς λοξές πλευρές. Η υπερβολική κλίση του προφίλ υποδεικνύει ανεπαρκή ενέργεια λέιζερ ή λανθασμένη θέση εστίασης. Σε συνδυασμό με την ταχύτητα κοπής, το κατακόρυφο προφίλ επηρεάζει την εφαρμογή του τεμαχίου σε μηχανικές ή δομικές συναρμογές(Ion,2005).
- **Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ):** Η ζώνη θερμικής επίδρασης είναι η περιοχή γύρω από την τομή που έχει υποστεί αλλοίωση στη μικροδομή ή στις μηχανικές ιδιότητες λόγω της θερμότητας. Μικρή και καλά ελεγχόμενη HAZ είναι δείκτης ποιοτικής κοπής. Μεγάλη HAZ σηματοδοτεί υπερβολική θερμική φόρτιση και μπορεί να οδηγήσει σε παραμορφώσεις ή αστοχίες σε κρίσιμες εφαρμογές(Ion,2005).

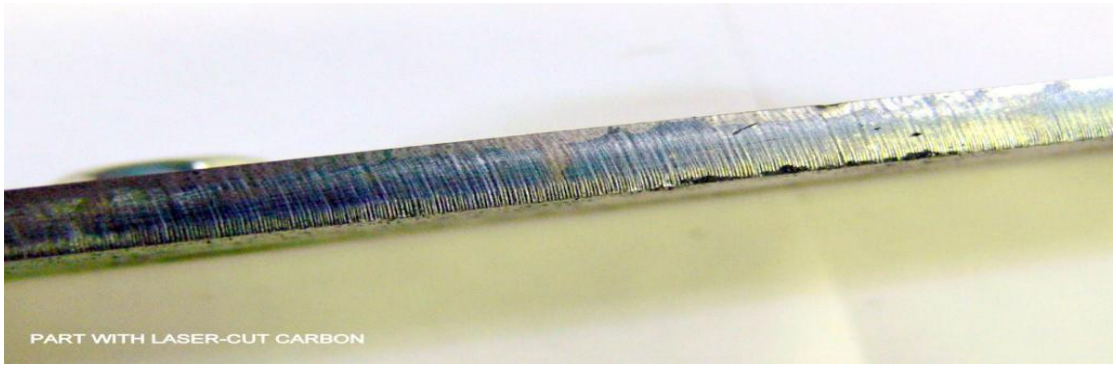


Εικόνα 11:Υψηλή HAZ λόγω υψηλής ισχύος και χαμηλής πίεσης.



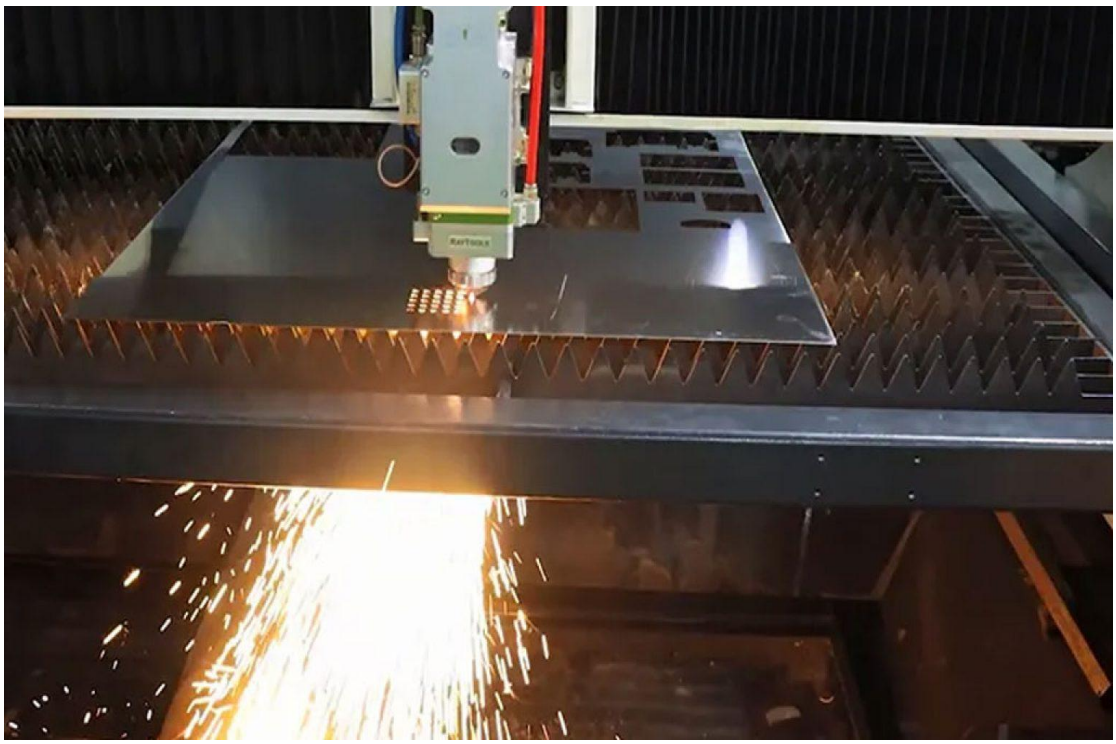
Εικόνα 12:Σχηματική παρουσίαση της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης(HAZ)γύρω από την κοπή.

- **Οξείδωση και αλλοιώσεις ακμής:** Η χρήση του κατάλληλου βοηθητικού αερίου είναι καθοριστική για την αποφυγή οξειδώσεων. Σε κοπή με οξυγόνο, η ακμή μπορεί να αποκτήσει ένα σκούρο, οξειδωμένο φιλμ, το οποίο ενδέχεται να είναι αποδεκτό σε ορισμένες εφαρμογές ή να απαιτεί απομάκρυνση. Σε κοπές υψηλής αισθητικής ή υψηλής καθαρότητας (π.χ. ανοξείδωτος χάλυβας), προτιμάται το άζωτο για πλήρως καθαρές τομές(Ion,2005).



Εικόνα 13:Ακμή με εμφανή οξείδωση.

- **Παραμόρφωση του τεμαχίου:** Η θερμική ενέργεια που εισάγεται κατά την κοπή μπορεί να προκαλέσει μικρές ή μεγαλύτερες παραμορφώσεις, ειδικά σε λεπτότερα ελάσματα. Η σωστή επιλογή παραμέτρων (ισχύς, ταχύτητα, αέριο, σταθεροποίηση του τεμαχίου) μειώνει σημαντικά το φαινόμενο. Η παραμόρφωση μπορεί να αξιολογηθεί οπτικά αλλά και με μετρήσεις επιπεδότητας ή απόκλισης(Powell,1993).



Εικόνα 14: Παραμόρφωση και ανύψωση τεμαχίου.

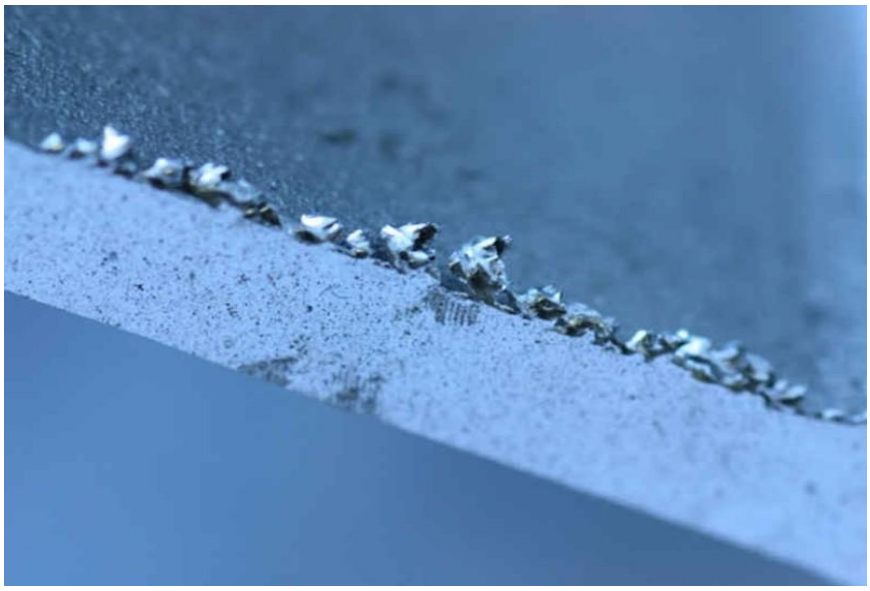
Τρόποι αντιμετώπισης άσχημων αποτελεσμάτων.

Κατά τη διαδικασία κοπής μετάλλων με λέιζερ, ενδέχεται να προκύψουν ανεπιθύμητα αποτελέσματα όπως γρέζια, παραμορφώσεις, ακαθαρσίες στην ακμή ή χαμηλή ακρίβεια. Η εμφάνιση αυτών των προβλημάτων μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του τελικού προϊόντος και να οδηγήσει σε καθυστερήσεις ή αυξημένο κόστος λόγω ανακατεργασιών. Η σωστή διάγνωση της αιτίας και η εφαρμογή κατάλληλων διορθωτικών παρεμβάσεων είναι ουσιώδης για την εξασφάλιση ποιοτικής και σταθερής παραγωγής.

- **Γρέζια και ακαθαρσίες στην ακμή κοπής:**

Αιτία: Μη επαρκής πίεση βοηθητικού αερίου, λανθασμένη εστίαση δέσμης ή υπερβολική ταχύτητα κοπής.
Αντιμετώπιση:

1. Αύξηση της πίεσης του βοηθητικού αερίου για καλύτερη απομάκρυνση του λιωμένου υλικού.
2. Ρύθμιση του ύψους εστίασης ώστε η δέσμη να επικεντρώνεται ακριβώς στο πάχος του υλικού.
3. Μείωση της ταχύτητας κοπής για πιο ολοκληρωμένη τήξη και αποβολή του υλικού(Ion,2005).



Εικόνα 15:Παράδειγμα τομής με εμφανή γρέζια.

- **Ακανόνιστη ή λοξή τομή:**

Αιτία: Κακή ευθυγράμμιση της κεφαλής λέιζερ ή διακυμάνσεις στην ισχύ.
Αντιμετώπιση:

1. Έλεγχος και ευθυγράμμιση του συστήματος κατευθυντήρων της δέσμης.
2. Καθαρισμός οπτικών φακών και αντικατάστασή τους αν χρειάζεται.

3. Σταθεροποίηση της ισχύος μέσω σωστής συντήρησης της γεννήτριας λέιζερ(Powell,1993).

- **Υπερβολική θερμική επίδραση και παραμορφώσεις:**

Αιτία: Υψηλή ισχύς σε συνδυασμό με χαμηλή ταχύτητα κοπής ή ανεπαρκής στήριξη του τεμαχίου.
Αντιμετώπιση:

1. Αύξηση της ταχύτητας κοπής για μείωση της διάρκειας έκθεσης στη θερμότητα.
2. Επιλογή χαμηλότερης ισχύος όταν το υλικό το επιτρέπει.
3. Στήριξη του τεμαχίου σε κατάλληλες θέσεις για αποφυγή στραβώματος(Ion,2005).

- **Οξειδωμένες ή μαυρισμένες ακμές:**

Αιτία: Χρήση οξυγόνου σε ευαίσθητα ή ανοξείδωτα μέταλλα.
Αντιμετώπιση:

1. Αντικατάσταση του οξυγόνου με άζωτο ή αργό, ειδικά για ανοξείδωτους χάλυβες ή αλουμίνιο.
2. Ρύθμιση της πίεσης και καθαρότητας του αερίου για καθαρότερη κοπή(Ion,2005).

- **Απώλεια ακρίβειας σε σύνθετα σχήματα:**

Αιτία: Μηχανική αστάθεια, θερμική διαστολή ή λάθος στον προγραμματισμό CNC.
Αντιμετώπιση:

1. Βελτιστοποίηση του G-code (τροχιάς κοπής) ώστε να μειώνεται η συγκέντρωση θερμότητας.
2. Χρήση σταθερού τραπεζιού εργασίας και μηχανισμών στήριξης.
3. Προθέρμανση υλικών σε κρίσιμες κοπές για να ελαχιστοποιηθεί η θερμική διαστολή(Powell,1993).

- **Ανακλαστικότητα και κακή απορρόφηση του λέιζερ:**

Αιτία: Υλικά όπως ο χαλκός ή το αλουμίνιο αντανακλούν μεγάλο ποσοστό της ενέργειας.
Αντιμετώπιση:

1. Επιλογή laser ινών (fiber laser) με μικρότερο μήκος κύματος (~1 μm) που απορροφάται καλύτερα.
2. Επικάλυψη της επιφάνειας με ματ ή απορροφητική στρώση σε εξαιρετικά αντανακλαστικά μέταλλα(Ion, 2005).

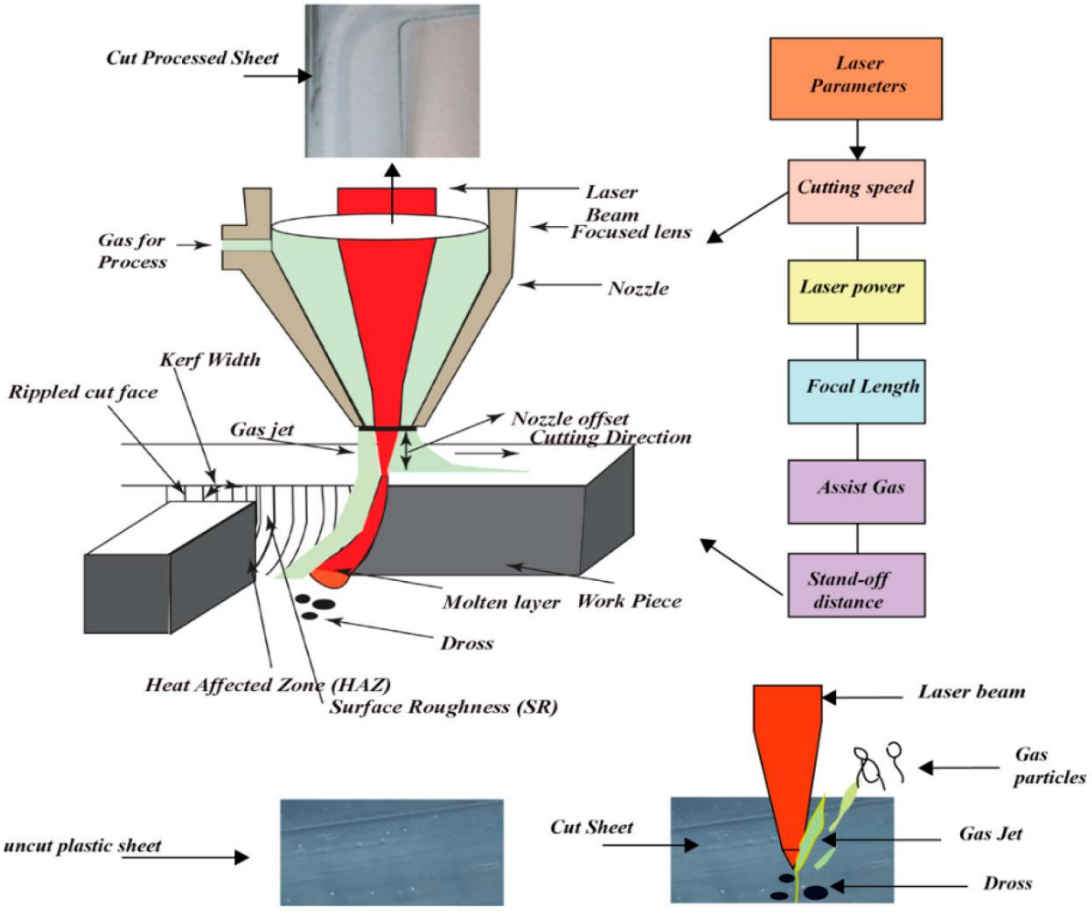
Πίνακας 4: Συνοπτική παρουσίαση συνηθισμένων προβλημάτων κοπής με λέιζερ, αιτιών και τρόπων αντιμετώπισης.

Πρόβλημα	Αιτία	Αντιμετώπιση	Σχόλια
Γρέζια και ακαθαρσίες	Χαμηλή πίεση αερίου, λάθος εστίαση, μεγάλη ταχύτητα	Αύξηση πίεσης, ρύθμιση εστίασης, μείωση ταχύτητας	Συχνό σε λεπτά φύλλα
Ακανόνιστη τομή	Κακή ευθυγράμμιση, διακυμάνσεις ισχύος	Έλεγχος συστήματος, καθαρισμός/ αντικατάσταση φακών	Επηρεάζει την ακρίβεια
Παραμορφώσεις	Υψηλή ισχύς, χαμηλή ταχύτητα, κακή στήριξη	Αύξηση ταχύτητας, μείωση ισχύος, καλύτερη στήριξη	Συχνό σε λεπτά ελάσματα
Οξείδωση ακμών	Χρήση O_2 σε ανοξείδωτα/Al	Αντικατάσταση με N_2/Ar, ρύθμιση πίεσης	Προβληματικό για συγκολλήσεις
Απώλεια ακρίβειας	Θερμική διαστολή, λάθος G-code	Βελτιστοποίηση CNC, σταθερή βάση	Σημαντικό για σύνθετα σχήματα
Ανακλαστικότητα	Al, Cu Αντανακλούν ενέργεια	Fiber laser, επιφανειακή επικάλυψη	Προστασία οπτικών μερών

HAZ (Heat Affected Zone)

Η Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (HAZ) αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο στη μελέτη της κοπής μετάλλων με λέιζερ, καθώς σχετίζεται άμεσα με τη θερμική επίδραση της δέσμης λέιζερ στο υλικό. Πρόκειται για την περιοχή του μετάλλου που, αν και δεν έχει λιώσει, έχει υποστεί αλλαγές στη μικροδομή και τις μηχανικές του ιδιότητες λόγω της υψηλής θερμοκρασίας κατά τη διαδικασία κοπής(Puranik et al.,2019). Εμφανίζεται περιμετρικά της τομής και διαφέρει σε πλάτος και ένταση ανάλογα με τις θερμικές και φυσικές ιδιότητες του υλικού, καθώς και με τις παραμέτρους κατεργασίας. Στην περιοχή αυτή ενδέχεται να παρατηρηθούν:

1. **Αλλαγές στη σκληρότητα** (συνήθως αύξηση ή μείωση, ανάλογα με το υλικό).
2. **Μικροδομικές τροποποιήσεις**, όπως σχηματισμός μαρτενσίτη, κόκκων ή ακόμα και εσωτερικών τάσεων.
3. **Εσωτερική καταπόνηση** και πιθανότητα δημιουργίας ρωγμών σε μελλοντική χρήση(Balasubramanian et al.,2019).



Εικόνα 16: Παράδειγμα διατομής λέιζερ με ένδειξη της HAZ.

Παράγοντες που επηρεάζουν τη HAZ κατά τη διαδικασία της κοπής

- **Ισχύς λέιζερ**: Μεγαλύτερη ισχύς αυξάνει το βάθος και το πλάτος της HAZ, καθώς και τη θερμική φόρτιση του υλικού.
- **Ταχύτητα κοπής**: Υψηλότερη ταχύτητα μειώνει τη θερμική διάχυση και κατά συνέπεια την έκταση της HAZ.
- **Εστίαση της ακτίνας**: Η σωστή εστίαση διασφαλίζει μέγιστη ενέργεια σε συγκεκριμένο σημείο, περιορίζοντας τη θερμότητα γύρω από την τομή.
- **Πάχος και θερμική αγωγιμότητα του υλικού**: Υλικά με υψηλή θερμική αγωγιμότητα (όπως το αλουμίνιο και ο χαλκός) διαχέουν τη θερμότητα πιο εύκολα, άρα εμφανίζουν μικρότερη και λιγότερο εντοπισμένη HAZ(Peric et al.,2019).
- **Τύπος βοηθητικού αερίου**: Το οξυγόνο ενισχύει την οξείδωση και μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία κοπής, άρα και την HAZ. Το άζωτο ή το αργό έχουν πιο ουδέτερη θερμική συμπεριφορά.

Πίνακας 5: Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της HAZ.

Παράγοντας	Επίδραση στη HAZ
Ισχύς λέιζερ	Μεγαλύτερη ισχύς → αύξηση βάθους και πλάτους HAZ
Ταχύτητα κοπής	Υψηλότερη ταχύτητα → μικρότερη HAZ
Εστίαση ακτίνας	Σωστή εστίαση → περιορισμός θερμότητας εκτός τομής
Πάχος και θερμική αγωγιμότητα υλικού	Αλουμίνιο/ χαλκός → μικρότερη HAZ λόγω διάχυσης θερμότητας
Τύπος αερίου	Οξυγόνο → αύξηση HAZ, Άζωτο/ Αργό → μικρότερη επίδραση

Μέθοδοι περιορισμού

- Βελτιστοποίηση των παραμέτρων κοπής (χαμηλότερη ισχύς, υψηλότερη ταχύτητα).
- Χρήση ψύξης ή προστατευτικών επιστρώσεων.
- Επιλογή κατάλληλου τύπου λέιζερ (π.χ. fiber laser σε λεπτά υλικά).
- Μεταγενέστερη θερμική κατεργασία (π.χ. ανόπτηση) για αποκατάσταση μικροδομής(Radavanovic & Mladenovic,2012).

Πίνακας 6: Μέθοδοι περιορισμού της HAZ κατά την κοπή με λέιζερ.

Μέθοδος	Περιγραφή
Βελτιστοποίηση παραμέτρων	Χαμηλότερη ισχύς, υψηλότερη ταχύτητα
Χρήση ψύξης	Εφαρμογή αερόψυξης ή υδρόψυξης
Κατάλληλος τύπος λέιζερ	Fiber laser για λεπτά υλικά
Θερμική κατεργασία	Ανόπτηση για αποκατάσταση μικροδομής

Συντήρηση συστήματος κοπής με laser

Η σωστή και τακτική συντήρηση ενός συστήματος κοπής με λέιζερ είναι καθοριστικής σημασίας για την απρόσκοπτη λειτουργία, την εξασφάλιση σταθερής ποιότητας κοπής και τη μακροχρόνια διάρκεια ζωής του εξοπλισμού(Machine FMG,2024). Η τεχνολογία λέιζερ, αν και ιδιαίτερα αποδοτική και ακριβής, βασίζεται σε σύνθετα ηλεκτροοπτικά και μηχανολογικά υποσυστήματα, τα οποία απαιτούν συνεχή φροντίδα και παρακολούθηση.

- **Καθαρισμός Οπτικών Στοιχείων:** Οι φακοί, οι καθρέφτες και τα προστατευτικά γυαλιά του λέιζερ είναι ευαίσθητα στην παρουσία σκόνης, υπολειμμάτων και καπνών που δημιουργούνται κατά την κοπή. Ο τακτικός καθαρισμός με ειδικά υλικά αποτρέπει την απώλεια ισχύος, τη διασπορά της δέσμης και τη φθορά των εξαρτημάτων(Obrary, n.d.).
- **Έλεγχος και συντήρηση της κεφαλής κοπής:** Η κεφαλή κοπής πρέπει να επιθεωρείται συχνά για σημάδια φθοράς, μηχανικές αποκλίσεις ή αστοχία αισθητήρων. Η ευθυγράμμιση της δέσμης, η ορθή απόσταση εστίασης και η ροή του βοηθητικού αερίου είναι κρίσιμες παράμετροι για ποιοτική κοπή.

- **Φίλτρα και συστήματα εξαερισμού:** Τα φίλτρα απορρόφησης καπνών και σωματιδίων πρέπει να αντικαθίστανται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η λειτουργία του εξαερισμού επηρεάζει άμεσα την ασφάλεια του χειριστή, αλλά και την καθαριότητα του μηχανήματος.
- **Ψυκτικό σύστημα (chiller):** Το λέιζερ απαιτεί σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας για να διατηρεί την απόδοση και την ακρίβεια του. Ο ψύκτης πρέπει να ελέγχεται τακτικά για στάθμη και καθαρότητα του ψυκτικού υγρού, καθώς και για τη σωστή λειτουργία των αντλιών και των αισθητήρων.
- **Λιπάνσεις και μηχανική συντήρηση:** Οι κινητοί άξονες, οι ράγες, τα ρουλεμάν και τα κινούμενα μέρη χρειάζονται περιοδική λίπανση και έλεγχο για μηχανική φθορά. Η σωστή μηχανική κατάσταση εξασφαλίζει την ακρίβεια κίνησης και μειώνει τους κραδασμούς κατά την κοπή.
- **Ενημέρωση λογισμικού και διαγνωστικά:** Η χρήση του κατάλληλου λογισμικού ελέγχου και η τακτική αναβάθμιση του, είναι απαραίτητες για την εξασφάλιση της λειτουργικής σταθερότητας του συστήματος. Τα ενσωματωμένα διαγνωστικά εργαλεία βοηθούν στον προληπτικό εντοπισμό προβλημάτων(Rellaser, 2015).
- **Τεκμηρίωση και πρόγραμμα συντήρησης:** Ένα οργανωμένο πρόγραμμα συντήρησης, με ημερολόγιο καταγραφής, λίστα ελέγχου (checklist) και οδηγίες από τον κατασκευαστή, συμβάλλει στην πρόληψη βλαβών και στη μείωση του χρόνου διακοπής λειτουργίας (downtime).

Πίνακας 7: Προτεινόμενο πρόγραμμα τακτικής συντήρησης συστήματος κοπής με λέιζερ

Εργασία	**Συχνότητα**	**Σχόλια**
Καθαρισμός οπτικών	Ημερήσια/ Εβδομαδιαία	Αποφυγή απώλειας ισχύος
Έλεγχος κεφαλής	Μηνιαία	Ευθυγράμμιση και ακρίβεια
Αλλαγή φίλτρων	Τριμηνιαία	Ασφάλεια χειριστή
Έλεγχος chiller	Μηνιαία	Σταθερή θερμοκρασία
Λιπάνσεις αξόνων	Τριμηνιαία	Μείωση φθοράς
Ενημέρωση λογισμικού	Εξάμηνη	Βελτίωση σταθερότητας
Πλήρης επιθεώρηση	Ετήσια	Πρόληψη βλαβών

Κόστος

Η κοπή μετάλλων με λέιζερ αποτελεί μια προηγμένη τεχνολογία που συνδυάζει ακρίβεια, ταχύτητα και ποιότητα. Ωστόσο, η εφαρμογή της συνοδεύεται από ένα κόστος το οποίο διαμορφώνεται από πολλούς επιμέρους παράγοντες. Η κατανόηση του κόστους είναι κρίσιμη για τη βιομηχανική εφαρμογή, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μεγάλου όγκου παραγωγή ή έργα με αυστηρό οικονομικό προγραμματισμό.

Κύριοι παράγοντες κόστους

- **Αρχικό Κόστος Επένδυσης:** προμήθεια ενός συστήματος κοπής λέιζερ υψηλής ισχύος (π.χ. fiber laser 3-12 kW) συνοδεύεται από υψηλό αρχικό κόστος εξοπλισμού, το οποίο μπορεί να κυμαίνεται από **100.000 έως και 1.000.000 ευρώ**,

ανάλογα με τις δυνατότητες, τη μάρκα και τον αυτοματισμό του συστήματος(Cost Analysis: Fiber vs CO_2 Lasers, 2025).

- **Κόστος Συντήρησης και Κατανάλωσης:** Παρόλο που τα συστήματα fiber laser έχουν χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης σε σχέση με παλαιότερες τεχνολογίες CO_2, εξακολουθούν να απαιτούν:

    1. Τακτικό καθαρισμό οπτικών μερών.
    2. Αντικατάσταση προστατευτικών γυαλιών.
    3. Συντήρηση ψυκτικού κυκλώματος.
    4. Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας
    Το ετήσιο κόστος συντήρησης μπορεί να κυμαίνεται από **3.000 έως 10.000 ευρώ**, αναλόγως χρήσης(Cost Analysis: Fiber vs CO_2 Lasers, 2025).

- **Κατανάλωση Βοηθητικών Αερίων**: Η χρήση αερίων όπως το άζωτο, το οξυγόνο ή το αργό συμβάλλει σημαντικά στο λειτουργικό κόστος. Το **κόστος ανά ώρα χρήσης αερίου** ποικίλλει και εξαρτάται από τον τύπο μετάλλου, το πάχος και το είδος του αερίου, αλλά μπορεί να φτάσει έως και **20 ευρώ/ώρα**(Calculation of laser custting costs, 2016).
- **Ενεργειακή Κατανάλωση**: Ένα σύστημα λέιζερ ισχύος 6 kWμπορεί να καταναλώνει περίπου **10-15 kWh**, οδηγώντας σε μηνιαίο κόστος ενέργειας αρκετών εκατοντάδων ευρώ, ειδικά σε βιομηχανική χρήση.
- **Κόστος Προσωπικού και Εκπαίδευσης**: Η λειτουργία ενός συστήματος κοπής λέιζερ απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό. Το κόστος αυτό περιλαμβάνει:

    1. Αμοιβές χειριστών.
    2. Εκπαιδευτικά σεμινάρια.
    3. Πιστοποιήσεις ασφαλείας.

Πίνακας 8: Παράγοντες κόστους.

Κατηγορία	**Τι περιλαμβάνει**	**Ενδεικτικό εύρος ανά παράδειγμα**	**Σχόλια**
Αρχικό κόστος επένδυσης	Μηχάνημα, αυτοματισμοί, εγκατάσταση	100.000 -1.000.000€	Ισχύς 3-12kW, μάρκα, αυτοματισμοί
Συντήρηση και κατανάλωση	Φακοί, προστατευτικά γυαλιά, ψύξη, φίλτρα	3.000-10.000€/έτος	Εξαρτάται από ώρες λειτουργίας
Βοηθητικά αέρια	N_2, O_2, Ar	Έως 20€/ώρα	Υλικό/ πάχος/ πίεση αερίου
Ενέργεια	Ηλεκτρική κατανάλωση συστήματος	10-15kWh(για 6kW)	Πολλαπλασιασμός επί τιμή €/kWh
Προσωπικό/ Εκπαίδευση	Χειριστές, σεμινάρια, πιστοποιήσεις	-	Μεταβάλλεται ανά επιχείρηση

Πίνακας 9:Πρότυπο υπολογισμού λειτουργικού κόστους ανά ώρα.

Παράμετρος	Τιμή	Υπολογισμός	Σχόλια
Ενέργεια	10-15kWh	kWh×[€/kWh]=€/h	Τιμή kWh
Βοηθητικό αέριο	Έως 20€/ώρα	—	Εξαρτάται από αέριο/ πάχος
Αναλώσιμα	—	€/τεμ × τεμ/h	Προστατευτικά γυαλιά, φίλτρα, κ.λ.π.
Συντήρηση (κατανομή)	3.000-10.000€/έτος	€/έτος÷ώρες/έτος=€/h	Εκτίμηση βάση χρήσης
Εργασία	—	Ωρομίσθιο χειριστών	—
Γενικά έξοδα	—	Ποσοστό επί κόστους	Ενοίκιο, ασφάλιση, κ.λ.π.

Παρότι η κοπή με λέιζερ παρουσιάζει **υψηλότερο αρχικό κόστος** από άλλες μεθόδους, όπως η κοπή πλάσματος ή φλόγας, προσφέρει:

- **Εξαιρετική ακρίβεια και ποιότητα κοπής**, με ελάχιστη ανάγκη για μετεπεξεργασία
- **Χαμηλότερο κόστος ανά τεμάχιο σε μαζική παραγωγή**
- **Μεγαλύτερη ευελιξία** σε διαφορετικά υλικά και πάχη
- **Μείωση αποβλήτων** χάρη στην ελάχιστη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και την ακρίβεια.

Συνολική εκτίμηση

Το κόστος κοπής με λέιζερ πρέπει να εκτιμάται **ολιστικά**, συνυπολογίζοντας το χαμηλό ποσοστό απορρίψεων, την υψηλή ταχύτητα παραγωγής, την ακρίβεια, την ευελιξία στο σχεδιασμό και τη δυνατότητα αυτοματοποίησης. Σε βάθος χρόνου, οι επενδύσεις σε συστήματα λέιζερ συχνά αποδεικνύονται **οικονομικά βιώσιμες** και αποδοτικές, ειδικά για επιχειρήσεις που στοχεύουν σε ποιοτική παραγωγή.

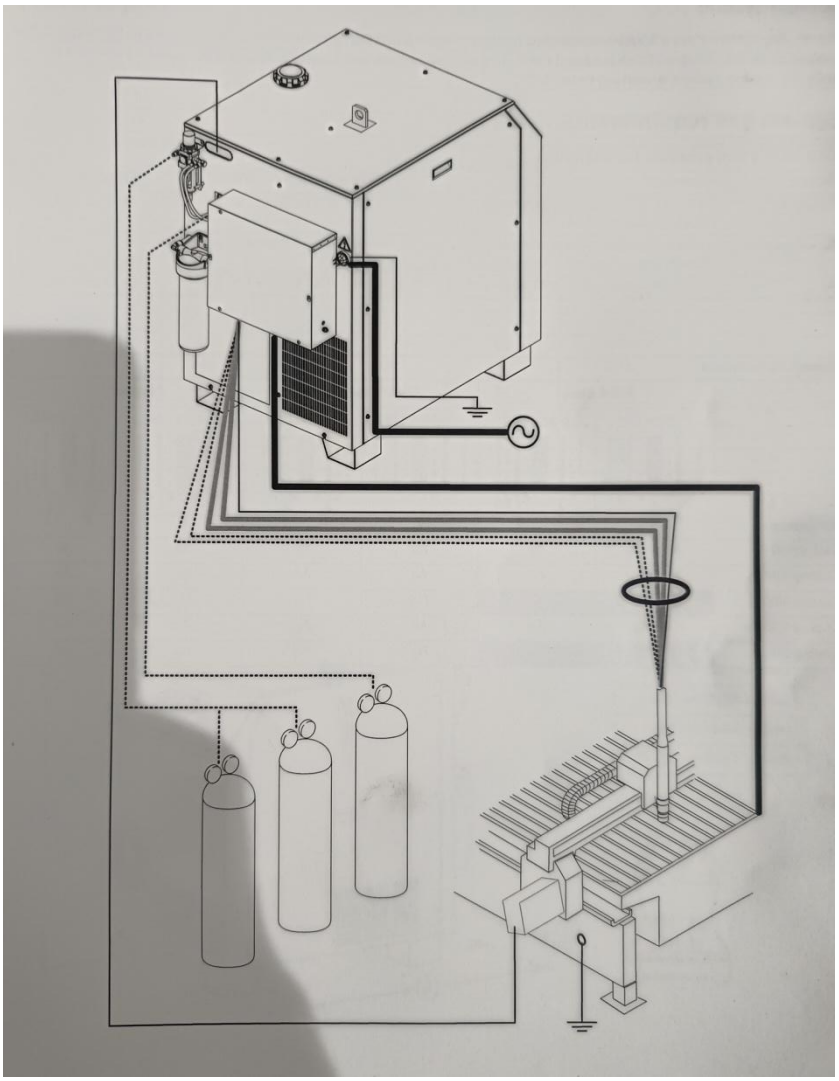
Plasma

Αρχή λειτουργίας

Όταν ένα αέριο θερμανθεί τόσο πού που τα άτομα χάνουν τα ηλεκτρόνιά τους, δημιουργείται ένα μείγμα από ιονισμένα άτομα και ελεύθερα ηλεκτρόνια, αυτό είναι το πλάσμα και είναι η τέταρτη φυσική κατάσταση της ύλης(Chen, 2016). Στην κοπή μετάλλων ο όρος πλάσμα αναφέρεται στο πλάσμα τόξου (plasma arc), δηλαδή το υπερθερμασμένο αέριο που ιονίζεται και κόβει μέταλλα. Η συγκεκριμένη τεχνολογία κοπής βασίζεται στην αξιοποίηση του πλάσματος ως πηγή θερμικής ενέργειας για την τοπική τήξη και απομάκρυνση του μετάλλου(Lincoln Electric, 2020).

Από τη δεκαετία του 1960 έως σήμερα, η εξέλιξη των πηγών ισχύος, των υλικών των ακροφυσίων και των συστημάτων ελέγχου οδήγησε στην ανάπτυξη διαφορετικών μορφών

πλάσματος, κατάλληλων για συγκεκριμένες βιομηχανικές ανάγκες(Mazumder, 2012). Στο πλαίσιο αυτό, έχουν καθιερωθεί στην αγορά τεχνολογίες κοπής πλάσματος που διαφέρουν ως προς τον τρόπο δημιουργίας και ελέγχου του τόξου, την ποιότητα κοπής που προσφέρουν, τη θερμική επένδυση στο υλικό και το επίπεδο αυτοματοποίησης. Οι τεχνολογίες αυτές εφαρμόζονται κυρίως στη μεταλλοτεχνία, στη βαριά βιομηχανία και σε συστήματα μαζικής παραγωγής, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα απαιτήσεων ως προς την ακρίβεια, την ταχύτητα και το κόστος κατεργασίας(Hypertherm, 2023).



Εικόνα 17:Σηματική απεικόνιση συστήματος κοπής πλάσμα.

Η ανάλυση που ακολουθεί επικεντρώνεται αποκλειστικά στους τύπους πλάσματος που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανική κλίμακα, παραλείποντας τεχνολογίες που έχουν αποκλειστικά εργαστηριακή ή φορητή χρήση.

- **High definition plasma (HD Plasma):** Η τεχνολογία High definition Plasma (ή Plasma υψηλής ευκρίνειας) αποτελεί την πιο εξελιγμένη μορφή πλάσματος κοπής που χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία. Βασίζεται σε τεχνικές ακριβούς

εστίασης του τόξου, μέσω ειδικών ακροφυσίων και προσεκτικά ελεγχόμενης ροής αερίων. Ο εξαιρετικά συμπυκνωμένος ακροδέκτης επιτρέπει την επίτευξη υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, με αποτέλεσμα καθαρές, στενές και ακριβείς γραμμές κοπής. Το HD Plasma χαρακτηρίζεται από μειωμένη θερμική επένδυση στο υλικό (χαμηλότερη Heat Affected Zone - HAZ), ελάχιστη παραμόρφωση και σαφώς βελτιωμένη επιφανειακή ποιότητα. Η τεχνολογία αυτή προσεγγίζει σε πολλές περιπτώσεις την ποιότητα του Laser σε πάχη άνω των 6 mm, ενώ διατηρεί υψηλές ταχύτητες κοπής και χαμηλότερο κόστος επένδυσης. Εξαιτίας αυτών των χαρακτηριστικών, αποτελεί βασική επιλογή για αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής, βαριά μηχανολογική βιομηχανία και κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας(Lincoln Electrik, 2020).

- **Precision Plasma (Fine Plasma):** Το Precision ή Fine Plasma αναπτύχθηκε ως ενδιάμεση τεχνολογία μεταξύ του συμβατικού και του HD πλάσματος. Αν και δεν διαθέτει τον βαθμό εστίασης και σταθερότητας του HD, εντούτοις προσφέρει σαφώς ανώτερη ποιότητα κοπής σε σχέση με τα παλαιότερα συστήματα. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται σε βελτιωμένο έλεγχο της καμπύλης ρεύματος, καθώς και σε τροποποιήσεις στα συστήματα παροχής αερίου και γεωμετρίας του ακροφυσίου. Η χρήση Fine Plasma επιτρέπει την ικανοποιητική κοπή μεσαίου πάχους μεταλλικών φύλλων, με συγκριτικά χαμηλότερο κόστος αγοράς και λειτουργίας. Το γεγονός αυτό την καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική για μικρομεσαίες μεταλλοτεχνίες, κατασκευαστικές μονάδες και εργαστήρια, όπου δεν απαιτείται η απόλυτη ακρίβεια του HD αλλά ζητείται καλή ποιότητα και αξιοπιστία(Mazumder, 2012).
- **CNC Plasma systems:** Τα συστήματα πλάσματος που υποστηρίζουν αριθμητικό έλεγχο (CNC – Computer Numerical Control) αποτελούν το στάδιο όπου η τεχνολογία πλάσματος ενσωματώνεται πλήρως στις αυτοματοποιημένες διεργασίες της βιομηχανίας. Μέσω της χρήσης λογισμικού CAD/CAM, οι πορείες κοπής μπορούν να προγραμματιστούν με ακρίβεια, εξασφαλίζοντας επαναληψιμότητα, ταχύτητα και βελτιστοποίηση της χρήσης υλικού. Τα CNC Plasma Systems δεν αποτελούν ξεχωριστό τύπο πλάσματος ως προς τη φυσική αρχή λειτουργίας, αλλά σχετίζονται με τον τρόπο ενσωμάτωσης της τεχνολογίας σε γραμμές παραγωγής. Μπορούν να λειτουργούν με HD ή Fine Plasma, ανάλογα με τις απαιτήσεις εφαρμογής. Το πλεονέκτημά τους έγκειται στον συνδυασμό ταχύτητας, ακρίβειας και αυτοματισμού, γεγονός που μειώνει το κόστος εργασίας και αυξάνει τη συνολική παραγωγικότητα της εγκατάστασης(Hypertherm, 2023).
- **Water-Shielded / Water Injection Plasma:** Σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές, η χρήση νερού ενσωματώνεται στη διαδικασία κοπής πλάσματος με σκοπό την ενίσχυση της σταθερότητας του τόξου, τη μείωση του θερμικού φορτίου και την αποτροπή εκπομπής επικίνδυνων αερίων ή καπνών. Η τεχνολογία Water Shielded (νερού ως προστατευτική θήκη) ή Water Injection (νερού ως πρόσθετο στο ακροφύσιο) επιτρέπει την κοπή παχύτερων μετάλλων με καλύτερο έλεγχο της θερμικής διάχυσης. Η παρουσία νερού δρα ως ψυκτικό μέσο, περιορίζοντας τις θερμικές παραμορφώσεις και βελτιώνοντας την καθαρότητα της κοπής.

Παράλληλα, συμβάλλει στη μείωση του ακουστικού θορύβου και των αναθυμιάσεων, καθιστώντας την τεχνολογία κατάλληλη για χρήση σε περιβάλλοντα με αυστηρές προδιαγραφές υγιεινής και ασφάλειας. Αν και δεν χρησιμοποιείται τόσο ευρέως όσο τα υπόλοιπα συστήματα, παραμένει κρίσιμη σε συγκεκριμένες βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας(Lincoln Electric 2020).

Πίνακας 10: Σύνοψη τεχνολογιών κοπής πλάσματος.

Τεχνολογία	**Βασική αρχή/ διάταξη**	**Ποιότητα/ HAZ**	**Τυπικό πάχος/ υλικά**	**Εφαρμογές**
HD plasma	Συγκέντρωση τόξου με ειδικά ακροφύσια και ελεγχόμενη ροή αερίων	Στενή τομή, μειωμένη HAZ, καλή ακμή	≥6mm κοινοί χάλυβες/ Inox/ Al	Βαριά βιομηχανία, αυτοματοποίηση
Fine/ Precision plasma	Βελτιωμένος έλεγχος ρεύματος και γεωμετρίας ακροφυσίου	Καλύτερη από συμβατικό, όχι από HD	Μεσαία πάχη	ΜΜΕ μεταλλοτεχνίας
CNC plasma systems	Ενσωμάτωση CAD/CAM, αριθμητικός έλεγχος	Επαναληψιμότητα και βελτιστοποίηση υλικού	Σύμφωνα με πηγή	Μαζική παραγωγή, nesting
Water shielded/ injection	Δακτύλιος νερού για θωράκιση/ σύσφιξη τόξου	Μειωμένες παραμορφώσεις και αναθυμιάσεις	Παχύτερα μέταλλα	Εξειδικευμένες εφαρμογές

Συνεπώς η κοπή μετάλλου με πλάσμα έχει καθιερωθεί ως μια από της βασικές μεθόδους κατεργασίας στη σύγχρονη βιομηχανία, χάρης στην ικανότητα να προσφέρει υψηλές ταχύτητες κοπής, ευκολία στην κατεργασία διαφόρων μετάλλων και δυνατότητα εφαρμογής σε ποικίλες παραγωγικές συνθήκες. Η τεχνολογία αυτή αξιοποιείται ευρέως τόσο σε βαριά όσο και σε ελαφριά βιομηχανία, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από την προκατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων έως την επισκευή και συντήρηση δομών(Mazumder, 2012).



Εικόνα 18: Κεφαλή πλάσματος με bevel.

Τεχνικά χαρακτηριστικά

Η αποτελεσματικότητα και η απόδοση της μεθόδου εξαρτώνται από πλήθος τεχνικών παραμέτρων που καθορίζουν την ποιότητα κοπής καθώς και την ταχύτητα, το βάθος και την καταλληλότητα για διαφορετικά υλικά(Smith, 2022).

- **Ισχύς πηγής(Power Output):** Η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας πλάσματος, καθορίζει άμεσα την τη θερμοκρασία και την ένταση του τόξου. Συνήθως κυμαίνεται από:
  - 20-100[A] για ελαφριές εφαρμογές.
  - 100-300[A] για κοπή μεσαίου πάχους.
  - >300[A] για βαριά βιομηχανική κοπή.

  Όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς τόσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής καθώς και η διείσδυση σε παχύτερα μεταλλικά φύλλα, ωστόσο αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας(Miller, 2020).

Πίνακας 11: Ενδεικτικές κλάσεις ισχύος και χρήσεις.

Κλάση ισχύος (A)	**Τυπικές χρήσεις**	**Σχόλια**	**Παραδείγματα υλικών**
20-100	Ελαφριά εργασία, λεπτά ελάσματα	Χαμηλή κατανάλωση	Χάλυβας ≤ 3-6mm, Al λεπτά
100-300	Μεσαία πάχη	Ισορροπία ταχύτητας/ποιότητας	Χάλυβας 6-25mm, Inox/Al μεσαία
>300	Βαριά κοπή, υψηλή παραγωγικότητα	Μεγαλύτερη HAZ/κατανάλωση	Παχιές πλάκες/ βαριά κατσκευή

- **Πάχος κοπής(Cutting Thickness):** Το πάχος του μετάλλου που μπορεί να κοπεί εξαρτάται από την ισχύ του συστήματος και τον τύπο του μετάλλου.
  - Πλάσμα 60[A]: έως 15mm χάλυβας
  - Πλάσμα 200[A]: έως 40mm
  - Προηγμένα HD πλάσμα : έως 800-100mm, με περιορισμούς στην ποιότητα.

  Η μέγιστη ικανότητα κοπής συνοδεύεται από μείωση στην ακρίβεια, για αυτό γίνεται διάκριση μεταξύ της ικανότητας διάτρησης (pierce capacity), δηλαδή του μέγιστου πάχους στο οποίο το σύστημα μπορεί να ξεκινήσει την κοπή από το κέντρο του υλικού, και της ικανότητας αποκοπής(severance capacity), που αναφέρεται στο απόλυτο μέγιστο πάχος που μπορεί να κοπεί, συνήθως με χαμηλότερη ποιότητα και μειωμένη ταχύτητα(Jones, 2019).

- **Ταχύτητα κοπής:** Η ταχύτητα κοπής με πλάσμα είναι γενικά υψηλή και εξαρτάται από το υλικό, το πάχος και την ισχύ. Ενδεικτικά:
  - Για χάλυβα 6mm μπορεί να φτάσει τα 1500-3000$^{mm}/_{min}$.
  - Για αλουμίνιο 10mm, περίπου 1000-1800$^{mm}/_{min}$.

  Η υψηλή ταχύτητα είναι από τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου σε σύγκριση με άλλες τεχνικές κοπής όπως οξυγονοκοπή ή κοπή με λέιζερ σε μεγάλα πάχη(WeldGuru, 2021).

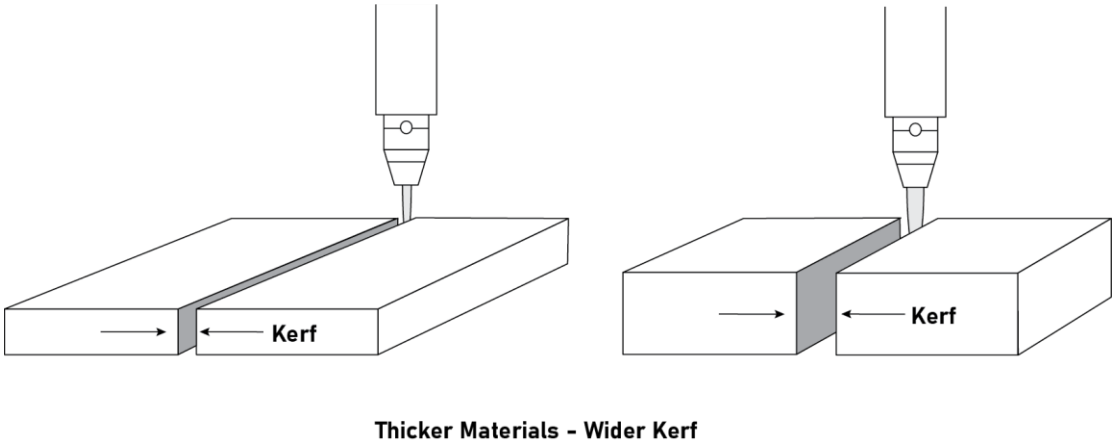
- **Τύπος αερίου (Gas Type):** Η επιλογή του κατάλληλου αερίου παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της θερμοκρασίας του πλάσματος, στη σταθερότητα του τόξου καθώς και στην ποιότητα της κοπής. Ανάλογα με το υλικό του τεμαχίου και τις απαιτήσεις της εφαρμογής, χρησιμοποιούνται διαφορετικά είδη αερίων ή και συνδυασμοί αυτών.
  - **Αέρας(Air):** ο πιο οικονομικός και διαδεδομένος τύπος αερίου. Ενδείκνυται για την κοπή μαλακού ή κραματούχου τύπου χάλυβα, προσφέροντας ικανοποιητικά αποτελέσματα σε γενικές εφαρμογές(Hypertherm, 2020).
  - **Οξυγόνο(O_2):** Παρέχει καθαρές και ομαλές τομές, ειδικά σε ανθρακούχους χάλυβες. Η χρήση του αυξάνει την απόδοση κοπής λόγω της επιπλέον θερμότητας που δημιουργείται από την καύση(Linde Gas, 2018).
  - **Αργών/Υδρογόνο(Ar/H_2):** Συνδυασμός που χρησιμοποιείται κυρίως για την κοπή ανοξείδωτου χάλυβα και αλουμινίου. Προσφέρει υψηλή θερμοκρασία και μειώνει την οξείδωση στην άκρη της κοπής(Gaseous Solutions,2022) .
  - **Άζωτο(N_2):** Κατάλληλο για κοπή υλικών μικρού πάχους, όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια και καθαρότητα στην επιφάνεια κοπής. Προσφέρει σταθερότητα στο τόξο και ελαχιστοποιεί τις θερμικές παραμορφώσεις(Weld Zone, 2019).

Πίνακας 12: Επιλογή αερίων ανά εφαρμογή.

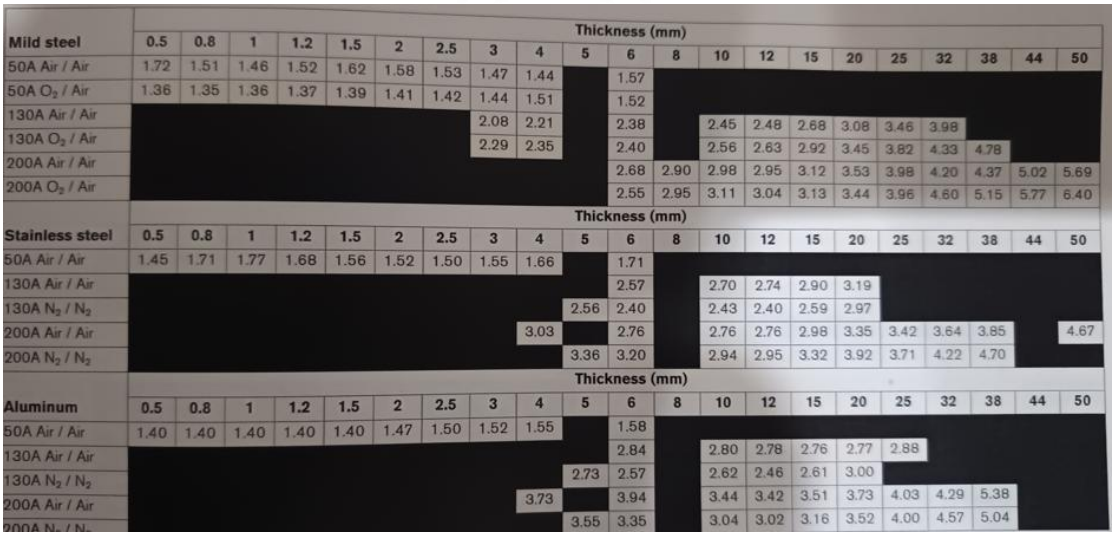
Αέριο	Κατάλληλα υλικά	Πλεονεκτήματα	Σημειώσεις
Air	Μαλακός/ κραματ. Χάλυβας	Χαμηλό κόστος/ διαθεσιμότητα	Γενικές εφαρμογές
O_2	Ανθρακούχοι χάλυβες	Καθαρή/ ομαλή τομή, θερμότητα από καύση	Μπορεί να αυξηθεί η οξείδωση
Ar/H_2	Inox / Al	Υψηλή θερμοκρασία, μειωμένη οξείδωση ακμής	Προσοχή σε ρυθμίσεις ροής
N_2	Λεπτά υλικά	Σταθερό τόξο, καθαρή ακμή	Καλή ακρίβεια/ μικρή HAZ

Στις σύγχρονες εγκαταστάσεις είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται συνδυασμοί αερίων, καθώς και διπλά κυκλώματα παροχής, ένα για το πλάσμα και ένα για την προστασία του τόξου(Shielding Gas). Αυτή η πρακτική βελτιώνει την ακρίβεια και αυξάνει τη διάρκεια ζωής των αναλώσιμών μερών του συστήματος(Miller, 2020).

- **Ποιότητα κοπής(Kerf, Dross, HAZ):** Η ποιότητα κοπής με πλάσμα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη βιομηχανική εφαρμογή της τεχνολογίας, καθώς επηρεάζει τόσο τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος, όσο και την αισθητική(Smith, 2022). Οι βασικές παράμετροι αξιολόγησης είναι:
  - **Πλάτος κοπής (Kerf Width) :** Αναφέρεται στο συνολικό εύρος της κοπής που δημιουργείται από το τόξο πλάσματος. Όσο στενότερο είναι το kerf, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια της κοπής και η οικονομία υλικού. Το kerf επηρεάζεται από την ισχύ του συστήματος, την ταχύτητα και τον τύπο του ακροφυσίου.



Εικόνα 19: Διάγραμμα kerf (πάχος υλικού ↔ πλάτος τομής).



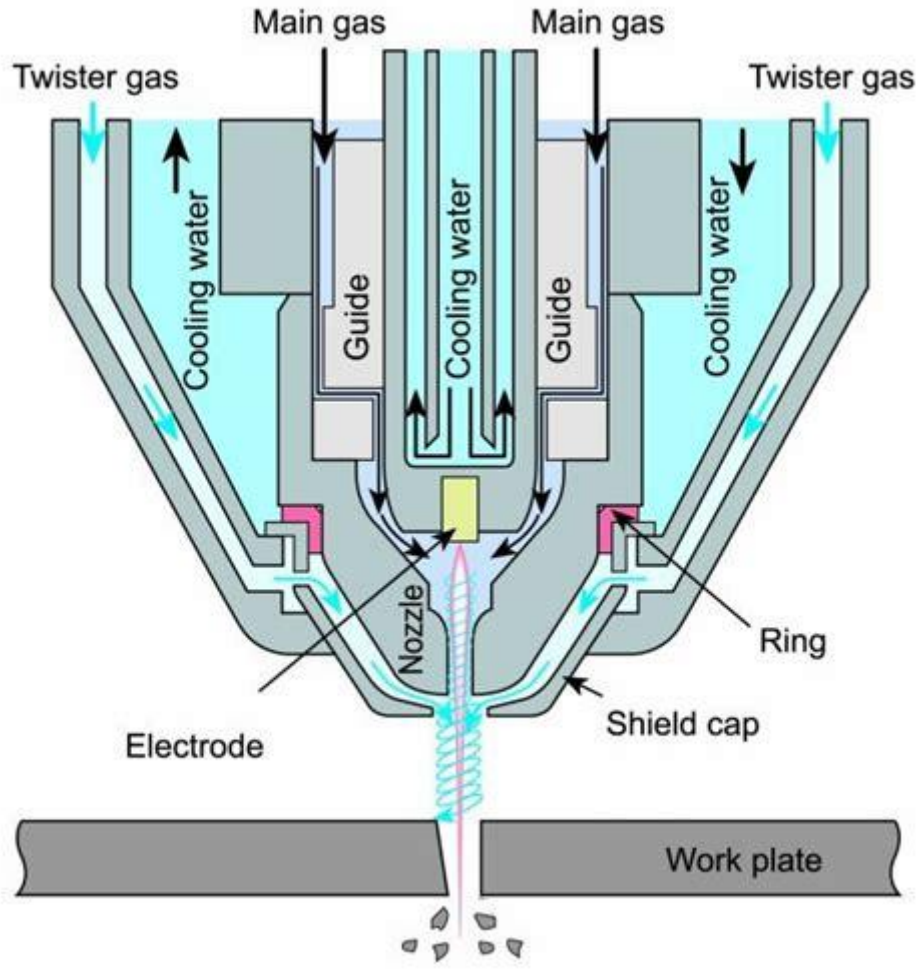
Mild steel	Thickness (mm)																			
	0.5	0.8	1	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	32	38	44	50
50A Air / Air	1.72	1.51	1.46	1.52	1.62	1.58	1.53	1.47	1.44		1.57										
50A O_2 / Air	1.36	1.35	1.36	1.37	1.39	1.41	1.42	1.44	1.51		1.52										
130A Air / Air								2.08	2.21		2.38		2.45	2.48	2.68	3.08	3.46	3.98			
130A O_2 / Air								2.29	2.35		2.40		2.56	2.63	2.92	3.45	3.82	4.33	4.78		
200A Air / Air											2.68	2.90	2.98	2.95	3.12	3.53	3.98	4.20	4.37	5.02	5.69
200A O_2 / Air											2.55	2.95	3.11	3.04	3.13	3.44	3.96	4.60	5.15	5.77	6.40

Stainless steel	Thickness (mm)																			
	0.5	0.8	1	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	32	38	44	50
50A Air / Air	1.45	1.71	1.77	1.68	1.56	1.52	1.50	1.55	1.66		1.71										
130A Air / Air											2.57		2.70	2.74	2.90	3.19					
130A N_2 / N_2										2.56	2.40		2.43	2.40	2.59	2.97					
200A Air / Air									3.03		2.76		2.76	2.76	2.98	3.35	3.42	3.64	3.85		4.67
200A N_2 / N_2										3.36	3.20		2.94	2.95	3.32	3.92	3.71	4.22	4.70		

Aluminum	Thickness (mm)																			
	0.5	0.8	1	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	32	38	44	50
50A Air / Air	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.47	1.50	1.52	1.55		1.58										
130A Air / Air											2.84		2.80	2.78	2.76	2.77	2.88				
130A N_2 / N_2										2.73	2.57		2.62	2.46	2.61	3.00					
200A Air / Air									3.73		3.94		3.44	3.42	3.51	3.73	4.03	4.29	5.38		
200A N_2 / N_2										3.55	3.35		3.04	3.02	3.16	3.52	4.00	4.57	5.04		

Εικόνα 20:Ενδεικτικός πίνακας Υπολογισμού του Kerf σύμφωνα με Hypertherm.

- **Ισχύς του συστήματος(Amperage/Power):** Υψηλότερη ισχύς έχει ως αποτέλεσμα ισχυρότερο τόξο πλάσματος με μεγαλύτερη διάμετρο και ενέργεια. Αυτό συνεπάγεται πιο φαρδύ kerf, αφού το τόξο καταλαμβάνει μεγαλύτερη επιφάνεια και περισσότερη θερμότητα που λιώνει τα τοιχώματα του μετάλλου σε μεγαλύτερο εύρος.
- **Ταχύτητα κοπής(Cutting Speed):** Σε υψηλές ταχύτητες το τόξο έχει λιγότερο χρόνο να διαχυθεί πλαγίως(στενότερο kerf), ωστόσο αν είναι πολύ υψηλή μπορεί να οδηγήσει σε ατελή κοπή ή αυξημένες σκωρίες. Αντίθετα όταν η ταχύτητα είναι χαμηλή το τόξο μένει περισσότερο σε κάθε σημείο, οπότε διαχέεται θερμότητα πλαγίως που οδηγεί σε πλατύτερο kerf και πιθανώς μεγαλύτερη HAZ.
- **Τύπος και διάμετρος ακροφυσίου(Nozzle):** Το ακροφύσιο καθορίζει το σχήμα και τη συγκέντρωση του τόξου πλάσματος. Στενή διάμετρος έχει ως αποτέλεσμα ένα λεπτό και συγκεντρωμένο τόξο. Αντίθετα σε μεγάλη διάμετρο ή φθαρμένο ακροφύσιο έχουμε διασπορά τόξου με πλατύτερο και λιγότερο καθαρό kerf(WeldGuru, 2021).

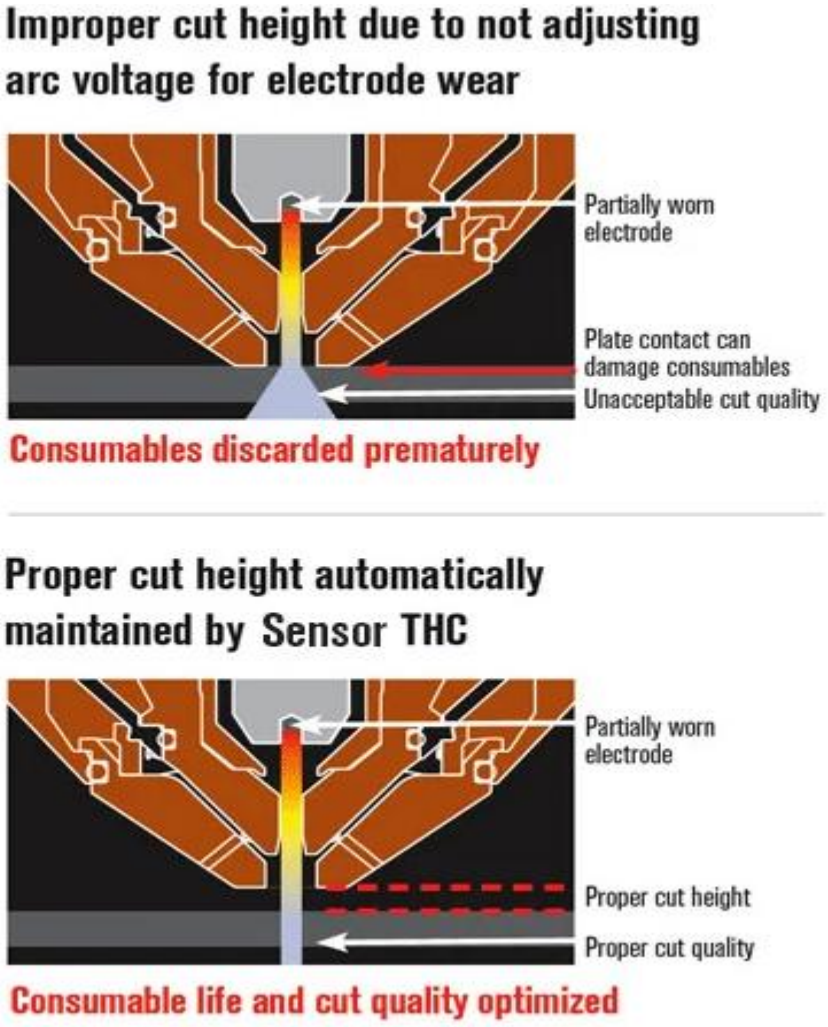


Εικόνα 21: Διατομή δάδας πλάσματος: ηλεκτρόδιο, ακροφύσιο, ροές αερίων/ ψύξης.

Το kerf είναι ένα δυναμικό χαρακτηριστικό που εξαρτάται από τη σωστή ρύθμιση και ισορροπία αυτών των παραμέτρων. Η χρήση CNC και αυτόματου ελέγχου ύψους συμβάλει καθοριστικά στη σταθερότητα του kerfκατά την κοπή.

- **Αυτοματισμός και Έλεγχος(CNC, Torch Height Control[THC]):** Η ενσωμάτωση ηλεκτρονικού ελέγχου, λογισμικού σχεδίασης και μηχανικών αισθητήρων, επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας, εξασφαλίζοντας υψηλή ακρίβεια, ταχύτητα και επαναληψιμότητα(Hypertherm, 2020). Οι βασικές τεχνολογίες που συμβάλλουν στον αυτοματισμό είναι:
  - **CNC ελεγκτές:** Οι CNC μονάδες επιτρέπουν την πλήρως αυτοματοποιημένη καθοδήγηση του ακροφυσίου σύμφωνα με μια προγραμματισμένη διαδρομή. Οι εντολές εισάγονται μέσω εξειδικευμένου λογισμικού και μετατρέπονται σε κινήσεις με ακρίβεια χιλιοστού. Η χρήση CNC μειώνει δραστικά τα σφάλματα του ανθρώπινου χειρισμού, εξασφαλίζει ομοιομορφία μεταξύ πανομοιότυπων τεμαχίων και επιτρέπει πολύπλοκες κοπές με γεωμετρική ακρίβεια.
  - **Συστήματα ελέγχου ύψους (THC):** Η σταθερή απόσταση μεταξύ ακροφυσίου και επιφάνειας υλικού είναι κρίσιμη για τη διατήρηση σταθερού τόξου

πλάσματος. Το THC ρυθμίζει αυτόματα το ύψος σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας υπ' όψιν τυχόν ανομοιομορφίες στην επιφάνεια του μετάλλου ή θερμικές παραμορφώσεις κατά την διάρκεια της κοπής. Έτσι αποφεύγονται οι διακοπές στο τόξο, οι ασυνέπειες στην ποιότητα κοπής και η φθορά του εξοπλισμού.



Εικόνα 22: Κοπή με σωστό και λάθος THC.

- **CAD/CAM λογισμικό:** Τα προγράμματα CAD (Computer Aided Design) επιτρέπουν τον ακριβή σχεδιασμό του τεμαχίου, ενώ τα CAM (Computer Aided Manufacturing) μετατρέπουν αυτόν τον σχεδιασμό σε οδηγίες για το CNC σύστημα. Το CAM λογισμικό βελτιστοποιεί την πορεία κοπής, τη χρήση υλικού και τις παραμέτρους λειτουργίας(ταχύτητα, αρχικά σημεία διάτρησης κ.λπ.), εξοικονομώντας πρώτες ύλες και χρόνο παραγωγής(Miller, 2020).

Ανάλυση τεχνικών κοπής αναλόγως το είδος του ελάσματος

Η διαδικασία κοπής μετάλλων με πλάσμα δεν είναι ενιαία για όλα τα υλικά, αλλά προσαρμόζεται ανάλογα με τις φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες κάθε μετάλλου ή κράματος(WeldZone, 2019). Η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων – είδος αερίου,

ένταση ρεύματος, γεωμετρία ακροφυσίου- καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το είδος του ελάσματος προς κατεργασία.

Η συμπεριφορά κάθε μετάλλου κατά τη θερμική κοπή εξαρτάται από παράγοντες όπως η θερμική αγωγιμότητα, το σημείο τήξης, η ικανότητα οξείδωσης, η ανακλαστικότητα καθώς και η ευαισθησία σε παραμορφώσεις λόγω θερμικής καταπόνησης. Επιπλέον η παρουσία επιφανειακών επιστρώσεων ή κραμάτων μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα και την ταχύτητα κοπής, αλλά και την ασφάλεια του χειριστή(π.χ. εκπομπή καπνού σε γαλβανισμένα μέταλλα).

Στο πλαίσιο αυτό η σωστή αντιστοίχιση του είδους του ελάσματος με τη βέλτιστη τεχνική κοπής είναι κρίσιμο στοιχείο για την επίτευξη ακρίβειας, καθαρής τομής και αποδοτικής παραγωγικότητας. Παρακάτω παρουσιάζεται συγκριτικά η κατάλληλη προσέγγιση για τα βασικότερα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανική κατεργασία με πλάσμα:

- **Ανθρακούχος χάλυβας(Carbon Steel):** Παρουσιάζει υψηλή οξειδωσιμότητα και σχετικά χαμηλό σημείο τήξης(1410°C). Προτείνεται χρήση οξυγόνου(O_2)ως αέριο κοπής για βελτίωση της ποιότητας μέσω καύσης σε συνδυασμό με υψηλές ταχύτητες κοπής για καθαρά αποτελέσματα, ενώ ως εναλλακτική οικονομική λύση προτείνεται ο αέρας σε εφαρμογές όπου δεν απαιτούν άριστη ποιότητα τομής. Σε κοπή λεπτών φύλλων έχουμε υψηλές ταχύτητες και καθαρή κοπή, ενώ σε μεγαλύτερα πάχη απαιτείται υψηλότερη ισχύς και βελτιωμένος έλεγχος της ποιότητας κοπής. Η διάμετρος του ακροφυσίου επηρεάζουν την ακρίβεια και το πλάτος κοπής (kerf), καθώς και στον περιορισμό των σκωριών. Το kerf είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από άλλα μέταλλα λόγω της φύσης της καύσης και η HAZ εμφανίζεται έντονα σε παχιά υλικά, αλλά είναι αποδεκτή σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές και μπορεί να αφαιρεθεί με μετεπεξεργασία(Linde Gas, 2018). Η ρύθμιση για κοπή ανθρακούχου χάλυβα είναι απλή και για αυτό το λόγο είναι κατάλληλος για εφαρμογές μαζικής παραγωγής.



Εικόνα 23:Καθαρή ακμή κοπής πλάσματος σε χάλυβα.

- **Ανοξείδωτος χάλυβας(Stainless steel):** Αποτελεί μια ιδιαίτερη κατηγορία κραματωμένου χάλυβα με κύριο χαρακτηριστικό την αντοχή στη διάβρωση, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε χρώμιο(Cr) και συχνά σε νικέλιο(Ni). Η κοπή του με πλάσμα παρουσιάζει αυξημένες απαιτήσεις σε σχέση με τον ανθρακούχο χάλυβα, λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, της ευαισθησίας στη θερμική παραμόρφωση και της τάσης σχηματισμού θερμικά επηρεασμένης ζώνης (HAZ) που μπορεί να επηρεάσει τη μικροδομή του υλικού.

  Αποφεύγεται η χρήση οξυγόνου καθώς οδηγεί σε οξείδωση της τομής και απώλεια των αντιδιαβρωτικών ιδιοτήτων . Συνεπώς προτείνεται η χρήση Αζώτου(N_2) η οποία προσφέρει καθαρή κοπή σε μικρά πάχη με καλή ακρίβεια και Αργό/ Υδρογόνο (Ar/H_2) όπου είναι ιδανικός συνδυασμός για υψηλή ποιότητα τομής, ιδίως σε μεσαία και μεγαλύτερα πάχη.

  Λόγο πιθανών θερμικών παραμορφώσεων, είναι απαραίτητο να διατηρείται σταθερή απόσταση μεταξύ ακροφυσίου και υλικού. Το σύστημα THC προσαρμόζει δυναμικά το ύψος της κεφαλής με βάση την τάση του τόξου, εξασφαλίζοντας ομοιομορφία και ακρίβεια σε όλο το μήκος της κοπής(Gaseous Solutions, 2022).

  Ο ανοξείδωτος χάλυβας απαιτεί συνήθως μέτριες ταχύτητες για να επιτευχθεί καθαρή και ευθύγραμμη τομή. Υπερβολική ταχύτητα οδηγεί σε ασυνεχείς τομές και αυξημένο HAZ.
- **Αλουμίνιο (Al):** Η κοπή αλουμινίου με πλάσμα είναι εφικτή, απαιτεί όμως ειδικού χειρισμούς και αυξημένη ακρίβεια στον έλεγχο παραμέτρων, καθώς παρουσιάζει υψηλή ανακλαστικότητα και ευαισθησία στη θερμική παραμόρφωση. Η χρήση ενεργών αερίων όπως το οξυγόνο απαγορεύεται στο αλουμίνιο λόγω έντονης οξείδωσης και φτωχής ποιότητας τομής. Για το λόγο αυτό προτιμώνται σε μικρά πάχη το άζωτο (N) με υψηλές ταχύτητες και αποδεκτή ποιότητα τομής, ενώ σε μεγαλύτερα πάχη ο πιο ενδεδειγμένος συνδυασμός είναι Αργό/Υδρογόνο, για υψηλής ποιότητας τομές. Το αλουμίνιο απαιτεί υψηλές ταχύτητες κοπής καθώς η υπερβολική θερμότητα οδηγεί εύκολα σε παραμορφώσεις και αύξηση της HAZ. Όσο αυξάνεται το πάχος του ελάσματος η ταχύτητα πρέπει να μειώνεται σταδιακά και ελεγχόμενα για να διασφαλιστεί πλήρης διάτρηση χωρίς σκωρίες. Η σταθερότητα του ύψους παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την ακρίβεια, καθώς και μικρές αυξομειώσεις μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας(Smith, 2022).
- **Χαλκός(Cu):** Η πλάσμα κοπή του χαλκού παρουσιάζει δυσκολίες, κυρίως λόγω της υψηλής ανακλαστικότητας και της μεγάλης ικανότητας απαγωγής θερμότητας, που δυσχεραίνουν τη διατήρηση σταθερού τόξου και αποτελεσματικής τομής. Για την επίτευξη καλής ποιότητας κοπής, χρησιμοποιούνται αδρανή αέρια όπως το αργό ή συνδυασμός αργού υδρογόνου, τα οποία προσφέρουν σταθερότητα και μειώνουν την επιφανειακή οξείδωση. Το οξυγόνο αποφεύγεται καθώς οδηγεί σε υπερβολική οξείδωση και σχηματισμό σκωριών. Η ρύθμιση της ισχύος και της ταχύτητας κοπής είναι κρίσιμη: απαιτείται υψηλή ισχύς για να αντισταθμιστεί η θερμική διασπορά, ενώ η ταχύτητα πρέπει να προσαρμόζεται ώστε να αποφεύγονται θερμικές παραμορφώσεις(Miller, 2020). Επιπλέον η χρήση συστημάτων THC διασφαλίζει τη

σταθερότητα της διαδικασίας. Παρά τις προκλήσεις η κοπή χαλκού με πλάσμα μπορεί να αποδώσει ικανοποιητική ποιότητα με στενό kerf, περιορισμένο HAZ σε λεπτά ελάσματα και ελεγχόμενο επίπεδο σκωριών, ειδικά σε εφαρμογές όπως η κατασκευή ηλεκτρικών εξαρτημάτων , οι αγώγιμες ράβδοι(bus bars) ή τα τεχνικά εξαρτήματα υψηλής ακρίβειας.



Εικόνα 24: Κοπή χαλκού με πλάσμα.

- **Γαλβανισμένος χάλυβας:** Αν και είναι γενικά κατάλληλος για πλάσμα κοπή, η παρουσία της ψευδαργυρικής επίστρωσης εισάγει ιδιαίτερες τεχνικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις . Κατά τη διαδικασία κοπής ο ψευδάργυρος εξατμίζεται παράγοντας τοξικά αέρια (κυρίως οξείδια ψευδαργύρου) γεγονός που απαιτεί ισχυρό εξαερισμό ή συστήματα απαγωγής καπνών για την ασφάλεια του προσωπικού. Η επίστρωση επίσης επηρεάζει τη σταθερότητα του τόξου, ιδίως όταν δεν είναι ομοιόμορφη και μπορεί να οδηγήσει σε μικρές ασυνέχειες στην τομή ή σε αυξημένο σχηματισμό σκωριών. Για βέλτιστη απόδοση συνιστάται η χρήση καθαρού αέρα ή αζώτου ως πλάσμα αέριο, ενώ ιδιαίτερη σημασία έχει η ρύθμιση της ταχύτητας ώστε να ελαχιστοποιηθεί η θερμική συσσώρευση που ενδέχεται να καταστρέψει την επίστρωση γύρο από τη γραμμή κοπής(WeldGuru, 2021). Παρά τις δυσκολίες η κοπή γαλβανισμένου χάλυβα με πλάσμα παραμένει διαδεδομένη σε κατασκευαστικές και μεταλλουργικές εφαρμογές κυρίως για την παραγωγή σωλήνων ηλεκτρικών πινάκων και συστημάτων στήριξης.

Πίνακας 13: Οδηγός παραμέτρων ανά υλικό.

Υλικό	Προτεινόμενα αέρια	Ενδ. Ρεύμα (A)	Ταχύτητα	Σημειώσεις ποιότητας/ ασφάλειας
Carbon steel	O_2 (κοπή ποιότητας), Air(οικονομία)	100-300	Υψηλότερη ταχύτητα σε λεπτά, υψηλότερη ισχύς σε παχιά	Kerf↑ λόγω καύσης, HAZ↑ σε παχιά
Stainless	N_2(λεπτά), Ar/H_2(μεσαία-παχιά)	100-300	Μέτρια ταχύτητα	Αποφυγή O_2, THC για σταθερό ύψος
Aluminum	N_2(λεπτά), Ar/H_2 (παχιά)	100-300	Υψηλή	Αποφυγή O_2, Προσοχή σε παραμορφώσεις
Copper	Ar/H_2 ή Ar	>200	Μέτρια ταχύτητα με σταθερό τόξο	Αποφυγή O_2, Υψηλή αγωγιμότητα
Galvanized steel	Air ή N_2	100-300	Ελεγχόμενη για αποφυγή θερμικής συσσώρευσης	Ισχυρός εξαερισμός, σταθερότητα τόξου

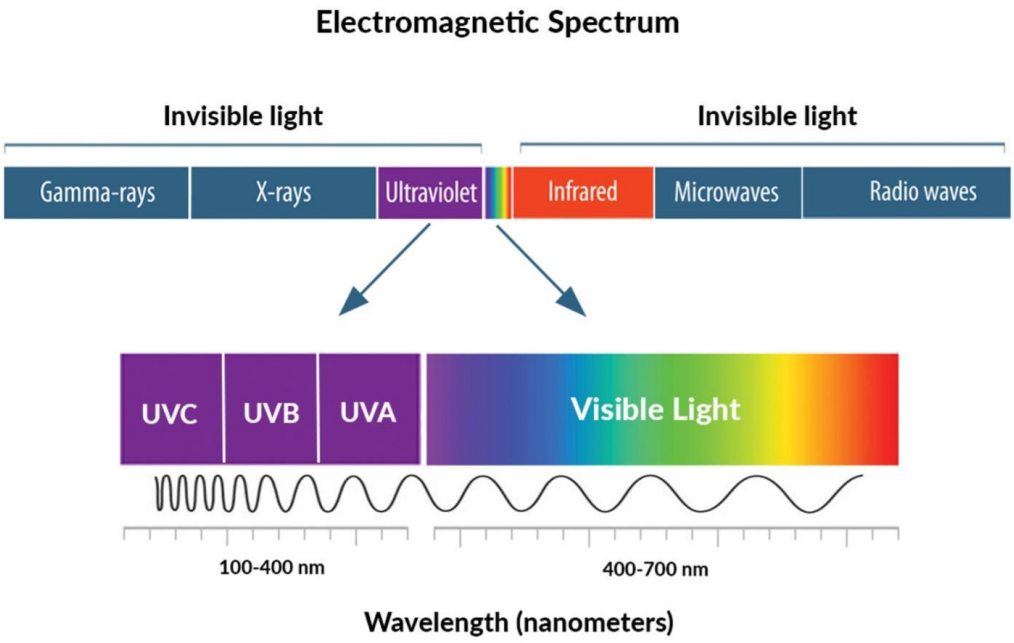
Πίνακας 14: Συχνά ελαττώματα ανά υλικό και διορθώσεις.

Υλικό	Σύνηθες ελάττωμα	Πιθανή αιτία	Διόρθωση
Carbon steel	Σκωρίες / μαύρισμα	Χαμηλή πίεση/ λάθος ακροφύσιο	Αύξηση πίεσης αερίου, σωστό ακροφύσιο
Stainless	Οξείδωση ακμής	Χρήση O_2	Χρήση N_2/ Ar-H_2, σωστή ταχύτητα
Aluminum	Παραμόρφωση/ πλατύ kerf	Υπερθέρμανση	Αύξηση ταχύτητας, Ar/H_2 σε παχιά
Copper	Ασυνέχεια τόξου	Υψηλή αγωγιμότητα	Αύξηση ισχύος Ar/ Ar-H_2, THC
Galvanized steel	Ασυνέχειες/ σκωρίες	Ανομοιομορφία επίστρωσης	Εξαερισμός, προσαρμογή ταχύτητας

Επίπεδα ακτινοβολίας στην κοπή μετάλλων με πλάσμα

Η διαδικασία κοπής μετάλλου με πλάσμα βασίζεται στη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου υψηλής θερμοκρασίας, το οποίο παράγει υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία αυτή περιλαμβάνει υπεριώδη (UV), ορατή (VIS) και υπέρυθρη (IR) συνιστώσα, όλες οι οποίες ενδέχεται να έχουν επιβλαβείς επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό όταν η έκθεση είναι παρατεταμένη ή ανεπαρκώς προστατευμένη(OSHA, 2023; ICNIRP, 2020).

- **Υπεριώδεις (UV-A, UV-B, UV-C):** Παράγεται κυρίως κατά την έναρξη και διατήρηση του τόξου και είναι επικίνδυνη για τα μάτια και το δέρμα, καθώς μπορεί να προκαλέσει έως και χρόνιες δερματικές αλλοιώσεις(ICNRP, 2020).
- **Ορατό φως(VIS):** Είναι ιδιαίτερα έντονο και μπορεί να προκαλέσει προσωρινή τύφλωση(flash blindness) ή φωτοευαισθησία. Αποτελεί σοβαρό κίνδυνο όταν ο χειριστής δεν φέρει προστατευτικό εξοπλισμό(μάσκα – γυαλιά)(OSHA, 2023).
- **Υπέρυθρη(IR):** Προκαλεί θερμική επιβάρυνση στους ιστούς, ειδικά στα μάτια και στο πρόσωπο, αν δεν υπάρχουν φίλτρα απορρόφησης IR. Επιπλέον συνδέεται με κινδύνους όπως θερμικά εγκαύματα και δυσφορία(OSHA, 2023; ICNRP, 2020).



Εικόνα 25:Διάγραμμα ηλεκτρομαγνητικού φάσματος(UVC/ UVB/ UVA- Ορατό- IR).

Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση της ακτινοβολίας

- **Ισχύς μηχανήματος(A):** Όσο υψηλότερη, τόσο εντονότερη η ακτινοβολία(Chen et al., 2019).
- **Απόσταση από το τόξο:** Η ένταση μειώνεται με την απόσταση, αλλά όχι γραμμικά(Chen et al., 2019)..
- **Είδος μετάλλου:** Τα πολύ ανακλαστικά μέταλλα όπως ο χαλκός και το αλουμίνιο αυξάνουν τη διάχυση της ακτινοβολίας(Liu & Zhang, 2021).
- **Διάρκεια έκθεσης:** ακόμη και μικρή έκθεση χωρίς προστασία μπορεί να είναι επικίνδυνη(OSHA, 2023).
- **Περιβάλλον εργασίας:** Ο κλειστός ή σκοτεινός χώρος ενισχύει τις ανακλάσεις(ICNRP, 2020).



Εικόνα 26:Έντονο τόξο πλάσματος(UV/VIS/IR) - ορατός κίνδυνος ακτινοβολίας.

Όρια έκθεσης και κανονισμοί

Οι διεθνείς οργανισμοί όπως ο **ICNIRP** (**I**nternational **C**ommission of **N**on **I**onnnizing **R**adiation **P**rotection) και ο **OSHA**(**O**ccupational **S**afety and **H**ealth **A**dministration) έχουν θέσει συγκεκριμένα όρια επιτρεπτής έκθεσης για κάθε φάσμα ακτινοβολίας. Η κοπή πλάσματος συνήθως υπερβαίνει αυτά τα όρια, για αυτό και απαιτείται αυστηρή τήρηση κανόνων ασφαλείας(OSHA, 2023; ICNRP, 2020).

Πίνακας 15: Πίνακας ωρών έκθεσης σε ακτινοβολία σύμφωνα με τους οργανισμούς OSHA και ICNIRP.

Τύπος ακτινοβολίας	**Εύρος μήκους κύματος(nm)**	**Όριο έκθεσης (OSHA (TWA:8ώρες)**	**Όριο έκθεσης (ICNIRP (μέγιστη τιμή στιγμιαίας ή ημερήσιας έκθεσης**	**Σχόλια**
Υπεριώδης UV-B	120-280	0.1 μW/cm^2	30 J/m^2ανά 8 ώρες	Υψηλά επικίνδυνη για μάτια δέρμα
Υπεριώδης UV-C	280-315	0.1 μW/cm^2	30 J/m^2	Φωτοκερατίτιδα – απαιτεί πλήρη προστασία
Υπεριώδης UV-A	315-400	1 mW/cm^2	10 000 J/m^2(για τα μάτια ανά 8 ώρες)	Επιτρεπτή για μεγαλύτερα διαστήματα, αλλά όχι χωρίς προστασία

Ορατό φως(VIS)	400-700	-	Μέγιστο 1 mW/cm^2 για άμεση έκθεση	Υψηλή ένταση προκαλεί προσωρινή τύφλωση
Υπέρυθρη(IR-A)	700-1400	10 mW/cm^2 για 10 λεπτά	100 W/m^2 για τους οφθαλμούς	Θερμικά εγκαύματα ματιών- κρίσιμο φίλτρο IR
Υπέρυθρη(IR-B/IR-C)	1400-3000+	-	10-100 W/m^2 (κατά περίπτωση)	Κίνδυνος θερμικής υπερφόρτωσης

Μέτρα ατομικής και συλλογικής προστασίας

- **Ατομικά μέτρα:**
  1. Μάσκες συγκόλλησης με φίλτρα **DIN 8-13**, ανάλογα με την ισχύ(OSHA, 2023).
  2. Προστατευτικά γυαλιά κατάλληλα για UV και IR φάσμα(ICNRP, 2020).
  3. Ρούχα εργασίας με κάλυψη δέρματος, από πυράντοχα υλικά(Chen et al., 2019).
- **Συλλογικά μέτρα:**
  1. Καμπίνες σκίασης ή παραπετάσματα προστασίας γύρω από την περιοχή κοπής(OSHA, 2023).
  2. Συστήματα απαγωγής καπνών και καυσαερίων, για περιορισμό επιπλέον επιβλαβών ουσιών(Liu & Zhang, 2021).
  3. Σήμανση και αποκλεισμός περιοχής εργασίας, όταν γίνεται χειροκίνητη κοπή(OSHA 2023).
  4. Συχνή εκπαίδευση του προσωπικού σχετικά με τους φυσικούς κινδύνους της ακτινοβολίας(ICNRP, 2020).

Συντήρηση

Η σωστή και τακτική συντήρηση των μηχανημάτων κοπής πλάσματος είναι καθοριστικής σημασίας για τη διατήρηση της ακρίβειας, της ασφάλειας και της απόδοσης του εξοπλισμού. Τα συστήματα πλάσματος λειτουργούν σε απαιτητικές συνθήκες (υψηλές θερμοκρασίες, ηλεκτρικά φορτία και έντονη καταπόνηση) γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη συνεχή παρακολούθηση και φροντίδα(Chen et al., 2019). Επιπλέον όταν ο εξοπλισμός παραμένει καθαρός είναι ευκολότερο να εντοπιστούν τυχών αστοχίες υλικών ή και φθορές των επιμέρους εξαρτημάτων. Οι στόχοι της συντήρησης είναι η **αποτροπή βλαβών**, η **διατήρηση σταθερής ποιότητας**, η **επέκταση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού** και η **ασφαλής λειτουργία του συστήματος**(Liu & Zhang, 2021). Η διαδικασία της συντήρησης χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες:

1. **Προληπτική συντήρηση(Preventive Maintenance):** Περιλαμβάνει τακτικό έλεγχο και καθαρισμό κρίσιμων εξαρτημάτων σύμφωνα με το πρόγραμμα του κατασκευαστή.
   - Καθαρισμός ή αντικατάσταση ακροφυσίων(nozzles) και ηλεκτροδίων.
   - Έλεγχος καλωδιώσεων, συνδέσεων και σωληνώσεων.

- Επαλήθευση ροής και πίεσης αερίου.
- Καθαρισμός φίλτρων αέρα και μονάδων ψύξης.
- Έλεγχος αισθητήρων και CNC μηχανημάτων(Chen et al., 2019).

2. **Διορθωτική συντήρηση(Corrective Maintenance):** Γίνεται όταν παρουσιαστεί βλάβη ή απόκλιση στην απόδοση. Συχνά αφορά:
   - Αντικατάσταση φθαρμένων αναλώσιμων (π.χ. tip, swirl ring).
   - Επιδιόρθωση βραχυκυκλωμένων καλωδίων.
   - Ρύθμιση THC(Liu & Zhang, 2021).
3. **Προγνωστική συντήρηση(Predictive Maintenance):** Προβλέπει βλάβες με χρήση αισθητήρων και συστημάτων παρακολούθησης(π.χ. θερμοκρασία, κραδασμοί ροή ρεύματος). Χρησιμοποιείται κυρίως σε μεγάλες, αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής(Chen et al., 2019).

Πίνακας 16: Κατηγορίες συντήρησης και ενδεικτικές ενέργειες.

Κατηγορία	Στόχος	Ενδεικτικές ενέργειες	Πότε εφαρμόζεται
Προληπτική	Αποτροπή βλαβών	Καθαρισμοί, έλεγχοι, αντικαταστάσεις αναλωσίμων	Σε σταθερό πρόγραμμα
Διορθωτική	Αποκατάσταση λειτουργίας	Αντικατάσταση ελαττωματικών μερών, επιδιορθώσεις	Μετά από βλάβη/ απόκλιση
Προγνωστική	Ελαχιστοποίηση Downtime	Αισθητήρες, ανάλυση δεδομένων, condition based	Με συνεχή παρακολούθηση

Πρόγραμμα συντήρησης

Για την αποτελεσματική επίτευξη των στόχων της συντήρησης, είναι απαραίτητο να τηρείται οργανωμένο πρόγραμμα εργασιών, συνοδευόμενο από συστηματική καταγραφή κάθε ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η καλύτερη εποπτεία και ο συνολικός έλεγχος της κατάστασης του μηχανήματος. Η όλη διαδικασία συμβάλει στην καλύτερη οργάνωση της παραγωγής, τη βελτιστοποίηση του κόστους λειτουργίας, καθώς και τη συμμόρφωση με τα πρότυπα ποιότητας(Liu & Zhang, 2021). Παρακάτω παραθέτονται τα κρίσιμα σημεία ελέγχου και η συχνότητα ελέγχου.

Πίνακας 17: Κρίσιμα σημεία ελέγχου συντήρησης σε μηχανές κοπής πλάσματος.

Εξαρτήματα	Συχνότητα ελέγχου	Σημεία ενδιαφέροντος
Ακροφύσιο(Nozzle)	Καθημερινά	Φθορές, παραμορφώσεις, βουλώματα
Ηλεκτρόδιο	Καθημερινά	Κατανάλωση υλικού, ρωγμές
Πυρσός(Torch)	Εβδομαδιαία	Ευθυγράμμιση, στεγανότητα, σωστή στήριξη
CNC Controller	Μηνιαία	Λογισμικό, ανταπόκριση, καλιμπράρισμα

Ψύξη/Αέρας	Εβδομαδιαία	Φίλτρα, ροή, υγρασία
Καλώδια/Σωληνώσεις	Μηνιαία	Τριβή διαρροές, χαλάρωση



Εικόνα 27:Αναλώσιμα πυρσού(ηλεκτρόδια, ακροφύσια.



Εικόνα 28:Φθαρμένα αναλώσιμα.

Συμπεραίνουμε πως η συντήρηση ενός plasma cutter δεν είναι δευτερεύουσα διαδικασία, αλλά απαραίτητη προϋπόθεση για την ασφαλή και ποιοτική λειτουργία του εξοπλισμού. Με σωστή προληπτική πολιτική, μειώνονται οι αστοχίες, αυξάνεται η αποδοτικότητα και διασφαλίζεται η μακροχρόνια αξιοπιστία της μονάδας παραγωγής. Τέλος τα ακροφύσια και τα ηλεκτρόδια φθείρονται κατά τη χρήση και απαιτούν συχνή αντικατάσταση. Η κακή ποιότητα ή η καθυστερημένη αλλαγή επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα κοπής και μπορεί να προκαλέσει ζημιά σε άλλα εξαρτήματα(Chen et al., 2019; Liu & Zhang, 2021).

Κόστος

Το συνολικό κόστος χρήσης ενός CNC plasma cutter εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων που το επηρεάζουν τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Το κόστος διακρίνεται σε αρχικό(πάγιο) και λειτουργικό(μεταβλητό), με σημαντική συνεισφορά και από τα κόστη συντήρησης και κατανάλωσης αναλωσίμων(Smith et al., 2022)

- **Αρχικό κόστος εξοπλισμού(Πάγια επένδυση)**.
  Το αρχικό κόστος περιλαμβάνει την αγορά της πηγής ισχύος, της CNC μονάδας, του τραπεζιού κοπής, του συστήματος ψύξης και του λογισμικού CAD/CAM(Jonson & Lee, 2021)

Πίνακας 18:Ενδεικτικό εύρος αρχικού κόστους CNC plasma.

Κατηγορία	Εύρος κόστους	Σημειώσεις
Βιομηχανικό CNC plasma	20.000-80.000€	Εξαρτάται από διαστάσεις τραπεζιού, ισχύς, μάρκα
High definition CNC plasma	80.000-150.000€	Καλύτερη ποιότητα, αυτοματισμός, υψηλότερο CAPEX

- **Λειτουργικό κόστος**
  Το λειτουργικό κόστος εξαρτάται από τις καθημερινές παραμέτρους παραγωγής(Smith et al., 2022).

Πίνακας 19:Ενδεικτικά λειτουργικά κόστη ανά ώρα λειτουργίας.

Παράγοντας	Ενδεικτικό Κόστος/Ώρα	Σχόλιο
Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας	2-6€/Ώρα	Ανάλογα με την ισχύ της πηγής
Αέρια κοπής	1-3€/Ώρα	Ο πεπιεσμένος αέρας είναι ο φθηνότερος
Αναλώσιμα	3-10€/Ώρα	Φθορά εξαρτώμενη από ταχύτητα και υλικό κοπής
Συντήρηση και downtime	1-2€/Ώρα	Προληπτική συντήρηση μειώνει διακοπές

Συνολικό εκτιμώμενο λειτουργικό κόστος για τυπική βιομηχανία 8-20€/Ώρα(Johnson & Lee, 2021).

Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος

- **Αποδοτικότητα τομής (mm/min):**μεγαλύτερη ταχύτητα συνεπάγεται λιγότερη κατανάλωση αναλωσίμων(Smith et al., 2022).
- **Επιλογή αερίων:** χρήση φθηνότερου αέρα μειώνει το κόστος , αλλά επηρεάζει την ποιότητα κοπής(Lee & Park, 2020).
- **Απώλειες λόγω σκωριών ή επανακατεργασίας:** αυξάνουν το κόστος ανά τεμάχιο(Johnson and Lee, 2021).
- **Αυτόματη ρύθμιση ύψους(THC):** μειώνει τη φθορά και το downtime(Smith et al., 2022).

Πίνακας 20:Παράγοντες κόστους και τρόποι βελτιστοποίησης.

Παράγοντας	**Επίδραση στο κόστος**	**Βελτιστοποίηση**
Ταχύτητα κοπής [mm/min]	↓ χρόνος, ↓ Κατανάλωση αναλωσίμων	Ορθές ρυθμίσεις ταχύτητας, επιλογή σωστού ακροφυσίου
Επιλογή αερίων	Κόστος ώρας και επίδραση ποιότητας	Air όπου επιτρέπεται, N_2/Ar-H_2 για ποιότητα
Kerf/ Ποιότητα ακμής	Επανακατεργασίες αυξάνουν το κόστος	CAD/CAM nesting, THC
Συντήρηση	Απρογραμμάτιστες διακοπές (downtime)	Προληπτικό πρόγραμμα και ανταλακτικά

Συνολική εκτίμηση

Η χρήση CNC plasma cutter σε βιομηχανικό περιβάλλον συνεπάγεται σημαντικό αρχικό κόστος ανάλογα με το επίπεδο τεχνολογίας και την ακρίβεια του συστήματος (Johnson & Lee, 2021). Το λειτουργικό κόστος περιλαμβάνει κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, αέρια κοπής, αναλώσιμα και κόστος συντήρησης (Smith et al., 2022). Παράγοντες όπως η επιλογή αερίων κοπής, η αποδοτικότητα τομής και η χρήση συστημάτων αυτόματης ρύθμισης ύψους (THC) επηρεάζουν καθοριστικά το συνολικό κόστος, καθώς μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση αναλωσίμων και να περιορίσουν τα downtime (Lee & Park, 2020). Επιπλέον, η σωστή και τακτική συντήρηση των μηχανημάτων διασφαλίζει την αξιοπιστία και τη μακροχρόνια απόδοση του εξοπλισμού, αποτρέποντας δαπανηρές βλάβες και διακοπές παραγωγής (Smith et al., 2022). Συνολικά, η κοπή με πλάσμα αποτελεί μια επένδυση μεσαίου έως υψηλού κόστους, η οποία, με σωστή διαχείριση και βελτιστοποίηση παραμέτρων παραγωγής, μπορεί να προσφέρει αποδοτικότητα και υψηλή ποιότητα κοπής, καθιστώντας την ελκυστική επιλογή για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές.

Πειραματικό μέρος

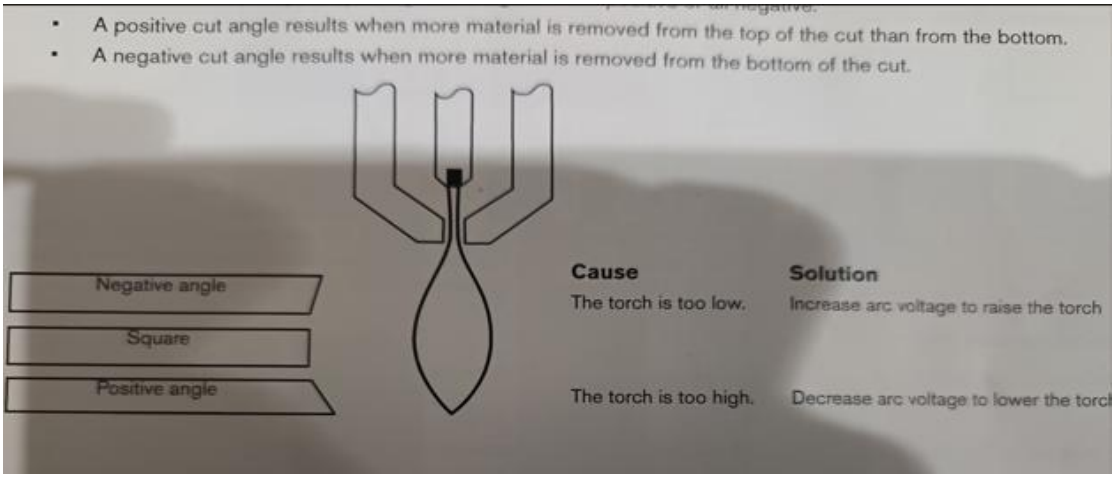
Περιγραφή

Στο πειραματικό μέρος έχουν κοπεί ομοιόμορφα δοκίμια σε πλάσμα και λέιζερ από φύλλα ναυπηγικού χάλυβα ASTM A131/A131M Grade A(γνωστός και ως ABS Grade A, ordinary strength) , διαστάσεων 200*150mm με δύο οπές διαμέτρου 20mm και απόσταση των κέντρων των οπών στα 150mm, σε πάχη 4,8,12 και 16mm. Έπειτα θα γίνει μέτρηση σε τρία διαφορετικά σημεία για κάθε άξονα(χ,y) καθώς και της διαμέτρου των οπών για να δούμε τυχόν αποκλίσεις από τις θεωρητικές διαστάσεις. Επιπλέον θα γίνει μέτρηση και στις δύο πλευρές κάθε δοκιμίου(πάνω- κάτω) ώστε να φανεί εάν υπάρχει λοξή τομή. Στη συνέχει θα πραγματοποιηθεί οπτικός έλεγχος για καταγραφή οξειδώσεων, γρεζιών ή αυξημένης HAZ, καθώς σε μια βιομηχανία δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί ποιοτικός έλεγχος σε κάθε τεμάχιο κοπής, αλλά ο εκάστοτε χειριστής θα πρέπει να είναι σε θέση να αναγνωρίζει την ποιότητα και να επεμβαίνει αναλόγως ώστε να μην διακόπτεται η παραγωγική διαδικασία.

Εξοπλισμός

Η κοπή με λέιζερ πραγματοποιήθηκε σε βιομηχανικό fiber laser ισχύος 6kW σειρά GWEIKE, με βοηθητικό αέριο οξυγόνο(O_2). Η επιλογή οξυγόνου για ανθρακούχους χάλυβες είναι συνήθης, καθώς ενισχύει τη θερμική αντίδραση, αυξάνει την ικανότητα κοπής σε μεσαία και μεγάλα πάχη και συμβάλλει σε υψηλές ταχύτητες, με πιθανό μειονέκτημα την οξείδωση της ακμής. Οι αναφερόμενες αποκλίσεις είναι της τάξης των 0,001mm.

Η κοπή με πλάσμα πραγματοποιήθηκε με πλάσμα πεπιεσμένου αέρα(air plasma), συστήματος 200A. Συστήματα αυτής της κατηγορίας υποστηρίζουν μηχανοποιημένη κοπή με υψηλές ταχύτητες και μεγάλη διάρκεια ζωής αναλωσίμων. Οι τυπικές αποκλίσεις 65στις διαστάσεις κυμαίνονται στο ενάμιση χιλιοστό(±1,5mm) και εμφανίζει λοξή τομή λόγω κωνικότητας της φλόγας.



Εικόνα 29:Απεικόνηση λοξότητας τομής.

Οι κοπές πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 37°C και με υψηλά επίπεδα υγρασίας, γεγονός που καθιστά τη ρύθμισης των παραμέτρων κοπής λέιζερ μια ιδιαίτερη διαδικασία, σε σύγκριση με το πλάσμα όπου δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες περιβάλλοντος.

Συλλογή εικόνων δοκιμίων

Κοπές με λέιζερ:



Εικόνα 30:Άνω και κάτω όψη ελάσματος 4mm με κοπή λέιζερ.



Εικόνα 31:4mm τομή.



Εικόνα 32: Άνω και κάτω όψη ελάσματος 8mm με κοπή λέιζερ..



Εικόνα 33:Έλασμα 8mm τομή.



Εικόνα 34: Άνω και κάτω όψη ελάσματος 12mm με κοπή λέιζερ.



Εικόνα 35:Έλασμα 12mm τομή.



Εικόνα 36: Άνω και κάτω όψη ελάσματος 16mm με κοπή λέιζερ.



Εικόνα 37:Έλασμα 16mm τομή.

Κοπές με πλάσμα:



Εικόνα 38: Άνω και κάτω όψη ελάσματος 4mm με κοπή πλάσμα.



Εικόνα 39:Έλασμα 4mm τομή



Εικόνα 40: Άνω και κάτω όψη ελάσματος 8mm με κοπή πλάσμα.



Εικόνα 41:Έλασμα 8mm τομή.



Εικόνα 42: Άνω και κάτω όψη ελάσματος 12mm με κοπή πλάσμα.



Εικόνα 43:Έλασμα 12mm τομή.



Εικόνα 44:Έλασμα Άνω και κάτω όψη ελάσματος 16mm με κοπή πλάσμα..



Εικόνα 45:Έλασμα 16mm τομή.

Αποτελέσματα μετρήσεων

Πίνακας 21:Αποτελέσματα οπτικής αναγνώρισης επιφάνειας κοπής.

Πάχος [mm]	Οξειδώσεις λέιζερ	Οξειδώσεις πλάσμα	Γρέζια λέιζερ	Γρέζια πλάσμα	HAZ λέιζερ	HAZ πλάσμα	Επιφάνεια λέιζερ	Επιφάνεια πλάσμα
4	**Ναι**	**Ναι**	**Όχι**	**Ναι**	**Μικρή**	**Μικρή**	**Λεία**	**Λεία**
8	**Όχι**	**Ναι**	**Όχι**	**Ναι**	**Μικρή**	**Μεσαία**	**Λεία**	**Μέτρια**
12	**Όχι**	**Ναι**	**Λίγα**	**Ναι**	**Μεσαία**	**Μεσαία**	**Τραχιά**	**Μέτρια**
16	**Όχι**	**Ναι**	**Λίγα**	**Ναι**	**Μεγάλη**	**Μεγάλη**	**Τραχιά**	**Μέτρια**

Πίνακας 22:Διαστάσει δοκιμίων με κοπή πλάσμα.

Πάχος (mm)	Άνω όψη[mm]		Κάτω όψη[mm]		Διάμετρος οπών άνω όψης[mm]	Διάμετρος οπών κάτω όψης[mm]	Απόσταση κέντρων οπών[mm]
	X	**Y**	**X**	**Y**			
4	199,4	149	200	150	20,8	20,2	150,2
8	199,4	149,7	200,2	150,4	19,8	20	149,9
12	199,6	149,8	200	149,3	21,3	19,7	150
16	198	149	200,2	149,9	20,8	19,4	150

Πίνακας 23:Διαστάσεις δοκιμίων με κοπή λέιζερ.

Πάχος (mm)	Άνω όψη[mm]		Κάτω όψη[mm]		Διάμετρος οπών άνω όψης[mm]	Διάμετρος οπών κάτω όψης[mm]	Απόσταση κέντρων οπών[mm]
	X	**Y**	**X**	**Y**			
4	200	150	200	150	20	20	150
8	200	150	200	150	20	20	150
12	200	150	200	150	20	20	150
16	199,6	149,6	200	150	19,9	20	150

Πίνακας 24:Πίνακας ταχυτήτων κοπής πλάσμα-λέιζερ,

Πάχος[mm]	Ταχύτητα κοπής πλάσμα[m/min]		Ταχύτητα κοπής λέιζερ[m/min]	
	Ταχύτητα κοπής περιγράμματος [m/min]	Ταχύτητα κοπής οπών[m/min]	Ταχύτητα κοπής περιγράμματος [m/min]	Ταχύτητα κοπής οπών[m/min]
4	3	1,8	3.6	2.8
8	2.8	1,68	2	1.5
12	2	1,2	1.4	1
16	1.7	1,02	1	0.8

Παρατηρήσεις:

- Οξειδώσεις στο πλάσμα καταγράφηκαν σε όλα τα πάχη το οποίο είναι αναμενόμενο ειδικά με water table, που μειώνει τις αναθυμιάσεις αλλά αφήνει υγρασία/πιτσιλίσματα και μπορεί να προκαλέσει flash rust/ οξειδώσεις στην ακμή. Παράλληλα στο λέιζερ υπήρξε οξείδωση μόνο στα 4mm που παραπέμπει σε βελτίωση των παραμέτρων κοπής.

- Στο λέιζερ στα μικρά πάχη δεν υπήρχαν καθόλου γρέζια και στα πάχη των 12 και 16 mm υπήρχαν τοπικά. Στο πλάσμα υπάρχουν περιμετρικά της κοπής σε όλα τα πάχη και απαιτούν απογρέζωση.
- Στην κοπή με πλάσμα παρατηρούμε ανομοιομορφίες στις διαστάσεις και στο σχήμα λόγω κωνικότητας της φλόγας και ρύθμισης του THC το οποίο οδηγεί σε λοξή τομή(ΔD top-bottom). Η διαφορά της απόκλισης δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται αναλόγως το πάχος του ελάσματος.
- Λόγω της υψηλής ταχύτητας κοπής και τη μικρή διάμετρο της δέσμης στο λέιζερ παρατηρούμε μικρότερη HAZ στα λεπτά ελάσματα σε σύγκριση με το πλάσμα.
- Επιλέξαμε δύο διαφορετικές ταχύτητες κοπής μια για το περίγραμμα του δοκιμίου και μια για τις οπές. Όταν η απόσταση κοπής είναι πολύ μικρή το μηχάνημα επιταχύνει με πιο γρήγορο ρυθμό, με αποτέλεσμα τη μη σωστή κοπή ή ακόμα και αποτυχία. Για αυτό το λόγο η ταχύτητα πρέπει να μεταβάλλεται αναλόγως τις ιδιαιτερότητες του σχεδίου που δίνεται κάθε φορά, συνήθως η ταχύτητα μειώνεται κατά 40%.
- Στις κοπές με λέιζερ προηγήθηκε δοκιμαστική κοπή κατά μήκους του άξονα χ για έλεγχο των παραμέτρων αναλόγως της σύστασης και την ποιότητα του ελάσματος όπως ορίζει ο κατασκευαστής.
- Για την κοπή του ελάσματος των 16mm με χρήση λέιζερ πραγματοποιήθηκε προεργασία θέρμανσης για απομάκρυνση της υγρασίας.
- Θα μπορούσαμε να έχουμε καλύτερη εικόνα εάν κόβαμε περισσότερα δοκίμια από κάθε πάχος. Με αυτό τον τρόπο θα είχαμε τη δυνατότητα να ελέγξουμε την επαναληψιμότητα καθώς και την επίδραση του kerf στις τελικές διαστάσεις των δοκιμίων.

Συμπεράσματα

Όπως τεκμηριώθηκε στο θεωρητικό μέρος, η κοπή με λέιζερ και η κοπή με πλάσμα διαφοροποιούνται θεμελιωδώς ως προς τον μηχανισμό παροχής ενέργειας, τον ρόλο του βοηθητικού αερίου και τον έλεγχο της δέσμης/τόξου(εστίαση, THC). Αυτές οι διαφορές επιβεβαιώθηκαν στα πειραματικά ευρήματα σε χάλυβα ASTM A131 Grade A (200x150mm,2xØ20mm): Το λέιζερ με χρήση βοηθητικού αερίου O_2παρήγαγε στα λεπτά και μεσαία πάχη υψηλή γεωμετρική ακρίβεια, μικρή HAZ και λεία επιφάνεια χωρίς γρέζια, επιβεβαιώνοντας την επίδραση του μικρού spot size και της υψηλής πυκνότητας ισχύος. Στα μεγαλύτερα πάχη τοπικές οξειδώσεις και αυξημένη τραχύτητα συνδέεται με την επιλογή αερίου ταχύτητας, όπως προβλέπει η θεωρία των assist gases. Αντίθετα το πλάσμα με αέρα έδειξε μεγαλύτερη κωνικότητα/ λοξότητα τομής, συστηματικά γρέζια και εντονότερη HAZ, σύμφωνα με τη θεωρητική επίδραση του ρυθμιζόμενου ύψους κοπής(THC) και της σταθερότητας του τόξου και με τις οξειδώσεις να ενισχύονται λόγω της χρήσης water table.Σε επίπεδο παραγωγικότητας τα δεδομένα επιβεβαίωσαν τις θεωρητικές τάσεις: υψηλότερες ταχύτητες του πλάσματος σε παχύτερα ελάσματα, ανώτερη ποιότητα του λέιζερ σε λεπτά και μεσαία. Συνολικά αυτή η σύγκλιση θεωρίας και πράξης δείχνει ότι η επιλογή μεθόδου πρέπει να γίνεται με κριτήρια πάχους/υλικού και

απαιτήσεων ποιότητας, δηλαδή χρήση λέιζερ όταν απαιτείται ακρίβεια και ελάχιστη μετεπεξεργασία, ενώ η χρήση πλάσμα προτείνεται όταν προέχουν ταχύτητα και κόστος στα μεγάλα πάχη, με κρίσιμη τη σωστή ρύθμιση παραμέτρων(αέριο, ταχύτητα, ύψος κοπής).

Πέρα από τα ποιοτικά και γεωμετρικά ευρήματα, η επιλογή τεχνολογίας καθορίζεται από οικονομικούς και οργανωτικούς παράγοντες. Σε επίπεδο κόστους τα συστήματα λέιζερ έχουν μεγαλύτερο CAPEX, αλλά μπορούν να δώσουν χαμηλότερο κόστος ανά τεμάχιο όταν απαιτείται υψηλή ποιότητα χωρίς μετεπεξεργασία και όταν υπάρχει επαναληψιμότητα. Το πλάσμα έχει χαμηλότερη αρχική επένδυση και ειδικά σε μεσαία και μεγάλα πάχη, συνδυάζει υψηλή ταχύτητα με αποδεκτή ποιότητα, όμως το OPEX αυξάνεται από απογρέζωση, μετεπεξεργασίες και φθορά αναλωσίμων. Στη συντήρηση το λέιζερ απαιτεί αυστηρή φροντίδα οπτικών, καθαρότητα αερίων και σταθερό έλεγχο ψύξης, ενώ παράλληλα είναι ευαίσθητο στη ρύπανση, όμως με συνεπές πρόγραμμα συντήρησης διατηρεί σταθερή ποιότητα. Το πλάσμα βασίζεται σε ανθεκτικότερη υποδομή, όμως εξαρτάται από τα αναλώσιμα(ακροφύσια, ηλεκτρόδια, swirl rings) και από σωστή ρύθμιση THC για περιορισμό κωνικότητας και γρεζιών.

Ως προς την εξειδίκευση και το προφίλ εταιρείας, το λέιζερ ταιριάζει σε οργανισμούς που παράγουν εξαρτήματα υψηλής ακρίβειας με αυστηρές ανοχές, λεπτά και μεσαία πάχη, με υψηλό επίπεδο ελέγχου διεργασιών(CAD/CAM, παραμετροποίηση αερίων, ποιοτικός έλεγχος), επιπλέον αποδίδει καλύτερα σε τυποποιημένες γραμμές παραγωγής κατ ανάθεση(φασόν) όπου τα υλικά είναι από τον ίδιο προμηθευτή και από την ίδια παρτίδα, ώστε να μην υπάρχουν διαφορές στην ποιότητα και τη δομή τους . Το πλάσμα προτείνεται για κατασκευαστικές, μεταλλουργικές και ναυπηγοεπισκευαστικές επιχειρήσεις με συχνή κατεργασία παχύτερων ελασμάτων, προτεραιότητα σε παραγωγικότητα και αποδοχή μετεπεξεργασίας.

Ως προς την μετέπειτα εξέλιξή τους οι δύο τεχνολογίες συγκλίνουν: τα υψηλής ισχύος fiber laser διευρύνουν το όριο πάχους με βελτιωμένα ακροφύσια/αέρια και έξυπνους αισθητήρες, ενώ το πλάσμα αναβαθμίζει την ποιότητα ακμής με HD/fine plasma και ακριβέστερο THC και ειδικά προφίλ για οπές. Παράλληλα ο αυτοματισμός (CNC, βιβλιοθήκες παραμέτρων, in process αισθητήρες) και η ψηφιοποίηση(συλλογή πραγματικών δεδομένων, προβλεπτική συντήρηση) μειώνουν τα κόστη και στα δύο. Συνοψίζοντας, λέιζερ όταν προτεραιότητα είναι η ποιότητα, η ακρίβεια και η ελαχιστοποίηση μετεπεξεργασίας, ενώ πλάσμα όταν προέχουν πάχος, ταχύτητα, κόστος. Η ορθολογική επιλογή, βάσει των απαιτήσεων προϊόντος**,** μίγματος υλικών, παχών και ωριμότητας διαδικασιών, μεγιστοποιεί την τεχνική και οικονομική απόδοση.

Πίνακας 25: Συνολική σύγκριση τεχνολογίας κοπής λέιζερ και πλάσμα.

Παράμετρος	Fiber laser	Plasma
Ακρίβεια διαστάσεων/ επαναληψιμότητα	Πολύ υψηλή σε λεπτά– μεσαία πάχη	Καλή– μέτρια, επηρεάζεται από THC/ύψος
Kerf/ λεπτομέρεια	Στενό kerf, μικρό spot → λεπτά χαρακτηριστικά	Πλατύτερο kerf, δυσκολότερες μικρές οπές
Λοξότητα(taper)	Μικρή (σωστό focus/ύψος)	Μεγαλύτερη τάση για κωνικότητα (ύψος/ αναλώσιμα)
HAZ	Μικρή σε λεπτά πάχη, αυξάνει με το πάχος	Μεγαλύτερη και αυξανόμενη με το πάχος
Γρέζια(dross)	Ελάχιστα ή καθόλου στα μικρά πάχη	Συχνά απαιτείται απογρέζωση
Οξειδώσεις στην ακμή	Εξαρτώνται από αέριο (O_2 → οξείδωση, N_2 → καθαρό)	Συχνές (αέρας, water table)
Ποιότητα επιφάνειας	Λεία (λεπτά –μεσαία)· μπορεί να γίνει τραχιά σε μεγάλα πάχη	Μέτρια– τραχιά, ανά ρυθμίσεις & πάχος
Ταχύτητα κοπής	Πολύ υψηλή σε λεπτά πάχη· μειώνεται σε παχιά	Υψηλή σε μεσαία– μεγάλα πάχη
Πάχος(sweet spot)	Λεπτά– μεσαία (ενισχύεται με μεγάλης ισχύος fiber)	Μεσαία– μεγάλα
Τυπικά αέρια	N_2 / O_2 / Ar (assist)	Αέρας, O_2, N_2, με/χωρίς water table
CAPEX (αρχικό κόστος)	Υψηλό	Χαμηλότερο
OPEX (λειτουργικό κόστος)	Αέρια/ενέργεια/οπτικά, μικρή μετεπεξεργασία	Αναλώσιμα/ενέργεια/απογρέζωση
Συντήρηση-κρίσιμα σημεία	Καθαριότητα οπτικών, chiller, ευθυγράμμιση	Αναλώσιμα (ακροφύσια/ ηλεκτρόδια), THC, φίλτρα
Απαιτούμενη εξειδίκευση	Υψηλή (CAD/CAM, focus, αέρια, QC)	Μέτρια– υψηλή (THC, προφίλ κοπής, αναλώσιμα)
Καταλληλότερο προφίλ εταιρείας	Εξαρτήματα υψηλής ακρίβειας, μικρολεπτομέρειες, ελάχιστη μετεπεξεργασία, γραμμή παραγωγής	Κατασκευές/ ναυπηγοεπισκευή /βαριά μεταλλοτεχνία με μεγάλα πάχη/ επισκευή
Ασφάλεια/περιβάλλον	Απαγωγή καπνών/φίλτρα, κλειστό κύκλωμα αερίων	Απαγωγή καπνών, πιθανό water table, UV/IR από τόξο
Αυτοματισμός/ψηφιοποίηση	Πολύ ώριμος (CNC, βιβλιοθήκες παραμέτρων, αισθητήρες)	Ώριμος (CNC, THC), διαρκής βελτίωση HD/fine προφίλ
Συγκριτικά πλεονεκτήματα	Ποιότητα, ακρίβεια, λεπτομέρεια	Πάχος, ταχύτητα, χαμηλότερο CAPEX

Βιβλιογραφία

- Abdel Ghany, K., & Newish,M.(2025). Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser. Journal of materials Processing Technology, 168, 438-447. https://www.researchgate.net/publication/307735406_Laser_Cutting_of_Different_Materials
- ACCURL. (2024). Nitrogen Laser Cutting: Process, Advantages and Costs. https://www.accurlmachine.com/nitrogen-laser-cutting/
- Baison Laser. (2024). Oxygen vs Nitrogen Laser Cutting: Which one to choose? https://www.baisonlaser.com/oxygen-vs-nitrogen-laser-cutting/
- Caristan, C.L. (2024). Laser Cutting Guide for Manufacturing. Society of Manufacturing Engineers. https://kupdf.net/download/caristan-charles-l-laser-cutting-guide-for-manufacturing-society-of-manufacturing-engineers-sme-2004_5af556f6e2b6f5587239fe2d_pdf
- EVS Metal. (2025)Fiber vs CO_2 Lasers: Strategic Analysis for Metal Fabrication. https://www.evsmetal.com/laser-cutting-fiber-vs-co2
- Lucertini, M., & Tuscia Team. (2020). Experimental investigation of industrial laser cutting: The effect of the material selection and the process parameters on the kurf quality. Applied Sciences, 10(14), 4956. https://www.mdpi.com/2076-3417/10/14/4956
- Mac-Tech. (2025). Fiber vs CO_2 Lasers: Choosing the Best for Metal Cutting. https://www.mactechinc.com/fiber-vs-co2-laser-cutting/
- Springer. (2019). Fundamentals of Laser Micromachining of Metals. In Laser Processing and Diagnostics(pp. 90-116). https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-82381-7_14
- Zealot Manufacturing. (2025). CO_2 vs Fiber Lasers: Which is better for metal fabrication? https://www.zealotmanufacturing.com/laser-cutting-differences/
- Ion, J.C. (2005). Laser processing of engineering materials: Principles, procedure and industrial application.Elsevier/Butterworth-Heinemann. https://archive.org/details/laserprocessingo0000ionj
- Powell, J. (1993). CO_2 laser cutting. Springer-Verlag. https://archive.org/details/colasercutting0000powe
- Balasubramanian, M., Senthilkumar, A.,& Padmanabhan, R.(2019). Experimental analysis of heat affected zone by laser beam machining. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 8(6), 76-80. https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v8i6/F8249088619.pdf
- MachineMFG. (2024). 13 Laser cutting machine maintenance checklist. https://www.machinemfg.com/laser-cutting-machine-maintenance-checklist/
- Obrary. (n.d.). Laser cutter 101 eBook. https://raw.githubusercontent.com/Obrary/ebook-laser-cutter-101/master/eBook/Laser-Cutter-101-eBook.pdf

- Peric, N., Peric, Z., & Milosavljevic, D.(2019). Heat affected zones of laser cutting of mild steel sheets. https://core.ac.uk/download/pdf/162670438.pdf
- Puranik, P.R., Kantharaj, I., Naik, N., & Manohar, H., (2019). Review of analysis of heat affected zone in laser cutting. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 6(6), 2676-2680. https://www.irjet.net/archives/V6/i6/IRJET-V6I6484.pdf
- Radovanovic, M., Mladenovic, N., (2012). Analysis of the heat affected zone in CO_2 laser cutting of stainless steel. Thermal science, 16(2), 489-496. https://www.academia.edu/58419516/Analysis_of_the_heat_affected_zone_in_CO2_laser_cutting_of_stainless_steel
- Rellaser.(2015). Managing maintenance for laser cutting machines. https://www.rellaser.com/documents/Managing%20Maint%20for%20Laser%20Cutting%20Machines_Jan%202015_48635_ePrint.pdf
- Cost Analysis: Decoding ROI for Fiber vs CO_2 Laser in Metal vs non Metal Workshops. Redsail Laser (2025). https://www.redsaillaser.com/archives/4547.html
- Nedic, B., Eric, M., & Aleksicevic, M., (2016). Calculation of laser cutting costs. International Journal for Quality Reasearch, 10(3), 487-494. https://oaji.net/articles/2016/452-1474995971.pdf
- Chen, F. F. (2016). Introduction to plasma physics and controlled fusion (3rd ed.). Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-21406-6
- Hypertherm. (2023). Plasma cutting technology overview. Hypertherm Inc. https://www.hypertherm.com/en-US/technologies/plasma-cutting/
- Lincoln Electric. (2020). Plasma cutting: Technology and applications. Lincoln Electric. https://www.lincolnelectric.com/en-us/arc-welding-processes/plasma-cutting/Pages/plasma-cutting.aspx
- Mazumder, J. (2012). Plasma arc cutting process and its recent developments. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 13(7), 1123-1133. https://doi.org/10.1007/s12541-012-0201-5
- Gaseous Solutions. (2022). Plasma Cutting Gas Types and Uses. https://gaseoussolutions.com/plasma-cutting-gas-types
- Jones, A. (2019). Fundamentals of Plasma Cutting. Free engineering Texts. https://freeengineeringtexts.org/plasma-cutting-fundamentals.pdf
- Linde Gas. (2018). Oxygen and Plasma Cutting: Best Practices. https://www.linde-gas.com/en/images/Oxygen-Plasma-Cutting_tcm17-82362.pdf
- Miller Electric. (2020). Plasma Cutting Technology and Parameters. https://www.millerwelds.com/resources/article-library/plasma-cutting
- Smith, J. (2022). Plasma Cutting Techniques and Applications. Welding Journal, 101(4), 45-53. https://doi.org/10.1109/WJ.2022.1014
- WeldGuru. (2021). Plasma Cutting Guide: Parameters, Gas, Speed. https://www.weldguru.com/plasma-cutting-guide
- WeldZone. (2019). How to Choose the Right Plasma Gas. https://weldzone.com/blog/how-to-choose-plasma-gas/

- Chen, X. Wang, L., & Zhao, Y. (2019). Maintenance strategies for plasma cutting equipment in manufacturing industries. Journal of Manufacturing Systems, 53, 117-126. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.03.004
- ICNRP. (2020). Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180nm and 400nm (incoherent optical radiation). International Commission on Non-Ionizing Radiation and Protection. https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPUV2020.pdf
- Liu, J., & Zhang, H. (2021). Impact of metal reflectivity on plasma arc cutting radiation intensity. Metals, 11(7), 987. https://doi.org/10.3390/met11070987
- OSHA. (2023). Occupational exposure to non-ionizing radiation. Occupational Safety and Health Administration. https://www.osha.gov/nonionizing-radiation-exposure
- Johnson, M., Lee, S. (2021). Cost analysis of CNC plasma cutting systems in manufacturing. Open Manufacturing Journal, 15, 45-58. https://doi.org/10.2174/1875035X02115010045
- Lee, D., & Park, J. (2020). Impact of gas selection on quality and cost in plasma cutting equipment in industrial applications. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 118, 3895-3908. https://doi.org/10.1007/s00170-021-08017-0. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116647
- Smith, R., Thompson, A., & Miller, K. (2022). Economic evaluation of plasma cutting in industrial applications. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 118, 3895-3908. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116647
- Akseland, D.R., Wright, W.J.(2016).The science of engineering of materials(7th ed.). Cengage Learning. https://books.google.com/books?id=7SwsjwEACAAJ
- Ion, J.C.(2005). Laser processing of engineering materials. Butterworth- Heinemann. https://www.elsevier.com/books/laser-processing-of-engineering-materials/ion/9780750660792
- Kalpakjian, S., Schmid, S.R., &Sekar, K.(2014). Manufacturing engineering and technology(7th ed.). Pearson. https://books.google.com/books?id=MC1YngEACAAJ
- Powell, J.(1993). CO_2laser cutting. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3409-2
- Smith, C.S.(2019). A history of metallurgy (2nd ed.). Routledge. https://www.routledge.com/A-History-of-Metallurgy/Smith/p/book/9780367201842