

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΟΠΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΒΑΤΟΥΣΙΑΝΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΑΛΩΝΙΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ (Επιστημονικός Συνεργάτης)

ΠΑΤΡΑ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στην διεργασία κοπής μεταλλικών ελασμάτων με χρήση πλάσματος. Η έρευνα της κατεργασίας αυτής έγινε μέσω πειραματικής διερεύνησης και με την χρήση της μεθόδου του σχεδιασμού πειραμάτων (μέθοδος taguchi) με σκοπό την αύξηση της ποιότητας κοπής.

Αρχικά γίνεται μια αναφορά στην τεχνολογία πλάσματος για να δημιουργηθεί μια σαφής εικόνα του αντικειμένου που μελετάμε. Έπειτα γίνεται αναφορά στην ποιότητα της κοπής έτσι ώστε να γνωρίσουμε τα στοιχεία τα οποία καλούμαστε να βελτιώσουμε. Αμέσως μετά ακολουθεί η θεωρία του σχεδιασμού πειραμάτων (μέθοδος Taguchi) και η μεθοδολογία που θα ακολουθήσουμε για την μελέτη που κάνουμε στην πτυχιακή αυτή. Στη συνέχεια ακολουθεί η πειραματική διαδικασία και η συλλογή των αποτελεσμάτων της διαδικασίας αυτής. Επόμενο βήμα αποτελεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων της παραπάνω διαδικασίας μέσω στατιστικών μεθόδων και τέλος η εξαγωγή των συμπερασμάτων που προκύπτουν από την παραπάνω ανάλυση.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Σαλωνίτη, Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό του Πανεπιστημίου Πατρών για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας αυτής.

Στέργιος Βατουσιανός
Δεκέμβριος 2011

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στην πειραματική διερεύνηση της διεργασίας κοπής μεταλλικών ελασμάτων με χρήση πλάσματος. Συγκεκριμένα γίνεται ανάλυση των σημαντικότερων παραμέτρων της διαδικασίας με σκοπό την αναγνώριση της επιρροής που κάθε μία ασκεί στην ποιότητα της κοπής. Η κατεργασία αυτή βρίσκει μεγάλη εφαρμογή τόσο στην βαριά όσο και στην ελαφριά βιομηχανία κυρίως χάρη στο χαμηλό κόστος και στην υψηλή ταχύτητα παραγωγής που προσφέρει.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε έξι κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά στην τεχνολογία κοπής με χρήση πλάσματος. Αρχικά δίνεται ο ορισμός του πλάσματος, ακολουθεί η ιστορική εξέλιξη της μεθόδου αυτής καθώς και οι εφαρμογές που βρίσκει στη βιομηχανία. Τέλος γίνεται μια αναλυτική αναφορά στα κύρια χαρακτηριστικά όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μεθόδου αυτής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα στοιχεία που καθορίζουν την ποιότητα της κοπής. Κάποια από τα πιο σημαντικά είναι, το διάκενο κοπής, η γωνία λοξοτόμησης, η επιφανειακή καμπυλότητα, οι επικαθήσεις μετάλλου, η τραχύτητα της επιφάνειας κοπής και η θερμικά επιρρεασθείσα περιοχή (HAZ). Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στις μεταβλητές που επηρεάζουν τα παραπάνω στοιχεία.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η θεωρία της χρήσης πειραματικών τεχνικών για την μελέτη και ανάλυση των παραμέτρων μιας διαδικασίας. Γίνεται αναφορά στο σχεδιασμό πειραμάτων και στον σχεδιασμό μέσο της μεθόδου taguchi. Η μέθοδος αυτή αποτελεί το βασικό εργαλείο αυτής της πτυχιακής εργασίας και γενικά αποτελεί ένα εργαλείο έρευνας για διάφορες μηχανολογικές και μη εφαρμογές.

Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί την διαδικασία πειραματισμού και ανάλυσης των αποτελεσμάτων με σκοπό την μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την ποιότητα της κοπής. Για λόγους κατανόησης η πειραματική αυτή διαδικασία χωρίστηκε σε τέσσερις φάσεις. Στην πρώτη φάση γίνεται εκτίμηση των ορίων των τιμών των παραμέτρων του πειράματος. Στην δεύτερη και τρίτη φάση γίνεται μελέτη των κυριότερων παραμέτρων κοπής που είναι, η ταχύτητα κοπής, το ύψος κοπής, η ένταση κοπής και η πίεση του αερίου κοπής. Η μελέτη αυτή γίνεται βάσει του συντελεστή επιφανειακής τραχύτητας Ra και Rz. Στην τέταρτη φάση έχουμε την εφαρμογή της μεθόδου taguchi στο σχεδιασμό πειραμάτων. Εδώ η μελέτη γίνεται μετρώντας τρία ποιοτικά χαρακτηριστικά την κωνικότητα στην επιφάνεια κοπής, το συντελεστή επιφανειακής τραχύτητας Ra και την θερμικά επιρρεασθείσα περιοχή (HAZ) περιμετρικά της κοπής.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στην χρήση της μεθόδου ανάλυσης των μέσων (ANOM), που μας βοηθά να αναγνωρίσουμε τα βέλτιστα επίπεδα κάθε παραμέτρου (παράγοντα) της διαδικασίας και την χρήση της ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA), μια στατιστική μέθοδο, που μας βοηθά να εκτιμήσουμε την επιρροή της κάθε παραμέτρου στο τελικό αποτέλεσμα.

Στο έκτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την έρευνα αυτή. Επίσης γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων και πρόταση των βέλτιστων ρυθμίσεων για την καλύτερη δυνατή ποιότητα κοπής. Μετά την ανακάλυψη των βέλτιστων αυτών επιπέδων γίνεται διεξαγωγή ενός πειράματος επιβεβαίωσης που μας δείχνει το ποσοστό της βελτίωσης που επιτύχαμε.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΚΟΠΗ ΜΕΣΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ	2
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	2
1.2 ΤΟ ΠΛΑΣΜΑ ΩΣ Η ΤΕΤΑΡΤΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΥΛΗΣ	3
1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΟΠΗΣ ΤΟΞΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	4
1.4 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ	4
1.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΟΠΗ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ.....	6
1.6 ΠΥΡΣΟΙ ΤΟΞΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ	7
1.7 ΠΕΡΙΔΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ	11
1.8 Η ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΤΟΞΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ	13
1.9 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΞΟΥ	15
1.10 ΠΩΣ ΝΑ ΑΠΟΦΥΓΟΥΜΕ ΤΟ ΔΙΠΛΟ ΤΟΞΟ	16
1.11 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ ΤΟΞΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ	17
2. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΚΟΠΗ ΜΕΣΩ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ	18
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	18
2.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ	18
2.3 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ.....	24
2.4 ΑΝΕΞΕΛΕΓΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	25
2.5 ΕΛΕΓΧΗΜΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ.....	25
2.6 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΟΠΗΣ.....	26
2.7 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΕΡΙΩΝ ΚΟΠΗΣ	27
3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ (ΜΕΘΟΔΟΣ TAGUCHI)	29
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	29
3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	30
3.2.1 Σχεδιασμός Πειραμάτων- Design of Experiment	32
3.2.2 Βασικές έννοιες και διαδικασίες των σχεδιασμένων πειραμάτων με ένα παράδειγμα	34
3.2.3 Στρατηγική των Πειραμάτων.....	36
3.2.4 Εφαρμογές για τις Σχεδιασμένες Πειραματικές Τεχνικές	37
3.2.5 Στατιστικά πειράματα με έναν Παράγοντα.....	39
3.2.6 Στατιστικά πειράματα με πολλούς Παράγοντες	39

3.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI	40
3.3.1 ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI	41
3.3.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ & ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI..	41
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΟΠΗΣ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ (ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI).....	43
4.1 Πειραματική διαδικασία	43
4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	44
4.3 1 ^Η ΦΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	46
4.4 2 ^Η ΦΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	49
4.4.1 Διαδικασία κοπής δοκιμίων στην εργαλειομηχανή κοπής τόξου πλάσματος	49
4.4.2 Μετρήσεις τραχύτητας.....	52
4.4.3 Αποτελέσματα μέτρησης τραχύτητας για την 2 ^η φάση του πειράματος	55
4.4.4 Διαγράμματα 2 ^{ης} φάσης	57
4.5 3 ^Η ΦΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	59
4.5.1 Αποτελέσματα μέτρησης τραχύτητας για την 3 ^η φάση του πειράματος	60
4.5.2 Διαγράμματα 3 ^{ης} φάσης	61
4.6 4 ^Η ΦΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	63
4.6.1 Αποτελέσματα μέτρησης τραχύτητας για την 4 ^η φάση του πειράματος	65
4.6.2 Μέτρηση κωνικότητας.....	67
4.6.3 Μέτρηση θερμικά επηρεασθήςσας περιοχής (haz)	69
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI	73
5.1 ΓΕΝΙΚΑ	73
5.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ	73
5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΣΩΝ (ANOM).....	75
5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ANOVA).....	79
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	85
6.1 ΓΕΝΙΚΑ	85
6.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΤΗΝ ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ.....	85
6.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΤΗΝ Θ.Ε.Π (HAZ).....	86
6.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΤΗΝ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ	86
6.5 ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗΣ	87
6.5.1 Βέλτιστα επίπεδα πειράματος επιβεβαίωσης.....	87
6.5.2 Αποτελέσματα πειράματος επιβεβαίωσης	88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	91

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η **κοπή με πλάσμα** είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για την κοπή χάλυβα και άλλων μετάλλων (ή μερικές φορές άλλων υλικών, όπως αλουμίνιο η και κεραμικών υλικών). Σε αυτή τη διαδικασία, ένα αδρανές αέριο (σε κάποιες εγκαταστάσεις, πεπιεσμένος αέρας) εκτοξεύεται με μεγάλη ταχύτητα από το ακροφύσιο. Ταυτόχρονα ένα ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται μέσω των αερίων από το ακροφύσιο προς την επιφάνεια κόβεται, και μετατρέπει ένα μέρος αυτού του αερίου σε πλάσμα. Το πλάσμα είναι αρκετά θερμό έτσι ώστε λιώνει το μέταλλο που κόβεται και κινείται αρκετά γρήγορα για να απομακρύνει το λιωμένο μέταλλο μακριά από την κοπή. Η κατεργασία μέσω τόξου πλάσματος βασίζεται σε θερμικά αποτελέσματα τα οποία δημιουργούνται στην ζώνη επαφής μεταξύ των ιόντων ή του πλάσματος και της επιφάνειας του κατεργαζόμενου κομματιού.[10]

Η κοπή με πλάσμα χρησιμοποιείται και σε CNC μηχανήματα για υψηλής ποιότητας κοπές. Έτσι με την δυνατότητα του να χρησιμοποιείται για την κατεργασία αρκετών υλικών, με υψηλή ταχύτητα παραγωγής και χαμηλό κόστος είναι αυτή την στιγμή μία από τις σημαντικότερες μεθόδους κοπής. Το πλάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για συγκόλληση με τόξο πλάσματος και άλλες εφαρμογές.

Η ποιότητα κοπής της μεθόδου αυτής είναι αρκετά υψηλή, αρκεί κανείς να ξέρει πως πρέπει να προγραμματιστούν οι παράμετροι κοπής της διαδικασίας. Η μελέτη των παραμέτρων αυτών αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία και απαιτείται χρόνος και κόστος για την ανάλυσή τους. Εκτός από τον σχεδιασμό πειραμάτων (μέθοδος Taguchi), που χρησιμοποιούμε σε αυτή την πτυχιακή εργασία, η ανάλυση των παραμέτρων μπορεί να γίνει και με χρήση μαθηματικών μοντέλων, η φασματοσκοπικών μεθόδων για την ανάλυση της δέσμης του πλάσματος.

1. ΚΟΠΗ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

Τόσο στη Φυσική όσο και στη Χημεία **πλάσμα** ονομάζουμε ένα στοιχείο το οποίο δεν έχει συγκεκριμένο όγκο και σχήμα, στο οποίο βρίσκονται σε ελεύθερη μορφή ηλεκτρικά φορτισμένα ατομικά σωματίδια (ιόντα και ηλεκτρόνια). Γενικότερα το πλάσμα αποτελείται από ένα μείγμα από ελεύθερα ηλεκτρόνια, κατιόντα, ιονισμένα μόρια ή άτομα, ουδέτερα μόρια και φωτόνια [10, 12]. Υπάρχουν δύο ορισμοί του πλάσματος:

- Πλάσμα είναι ιονισμένο αέριο.
- Πλάσμα είναι η κατάσταση της ύλης η οποία αποτελείται από ελεύθερα ιόντα και ηλεκτρόνια.

Ο πρώτος ορισμός θεωρεί το πλάσμα μορφή αερίου, ενώ ο δεύτερος όχι και το κατατάσσει ως *τέταρτη μορφή της ύλης*.



Εικόνα 1.1: Κοινό παράδειγμα πλάσματος είναι ο κεραυνός.

Το πλάσμα διαφέρει από ένα μη-ιονισμένο αέριο. Σχηματίζεται όταν ένα αέριο γίνει υπέρθερμο με αποτέλεσμα ηλεκτρόνια να δραπέτεύσουν από το άτομό και να καταστούν ελεύθερα (ελεύθερα ηλεκτρόνια).

Το πλάσμα συνίσταται επομένως από ελεύθερα ηλεκτρόνια και ιόντα, άτομα ή μόρια που έχουν χάσει ή αποκτήσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια, και αποτελούν υπεριοιονισμένη κατάσταση της ύλης.

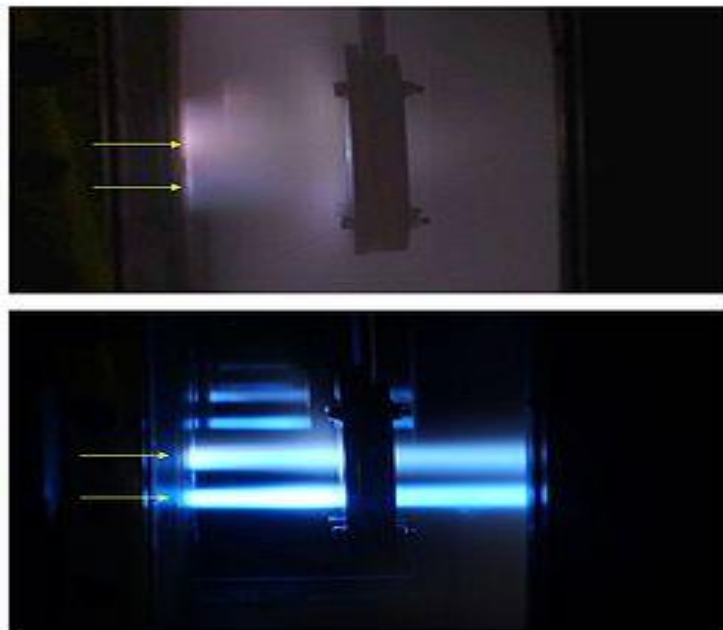
Μεγάλες ποσότητες πλάσματος συναντώνται στον Ήλιο, στους αστέρες, στο μεσοαστρικό χώρο και τους κεραυνούς. Ο ηλιακός άνεμος αποτελείται από πλάσμα. Σε συνθήκες εργαστηρίου δημιουργείται σε θερμοπυρηνικούς αντιδραστήρες και στους σωλήνες φωτισμού που περιέχουν το αέριο νέον. Σε αντίθεση με τα άλλα αέρια το πλάσμα είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού.

1.2 ΤΟ ΠΛΑΣΜΑ ΩΣ Η ΤΕΤΑΡΤΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΥΛΗΣ

Το πλάσμα, που μερικές φορές αναφέρεται ως "η τέταρτη κατάσταση της ύλης" (εκτός από τη στερεή, την υγρή και την αέρια), ορίζεται σε αυτή την περίπτωση ως ένα αέριο στο οποίο έχει παρωχευθεί αρκετή ενέργεια για να αποχωριστούν από τα άτομα τα ηλεκτρόνια τους (ιονισμός) και να παραχθεί ένα νέφος από ιόντα και ηλεκτρόνια. Επειδή τα σωματίδια αυτά είναι ιονισμένα (φορτισμένα), το αέριο συμπεριφέρεται διαφορετικά από ένα ουδέτερο αέριο, για παράδειγμα όταν υπάρχουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Το πλάσμα ως θερμοδυναμική φάση εκδηλώνει διαφορετικές ιδιότητες από τις ιδιότητες των αερίων. Η θερμοκρασία, για παράδειγμα, στην οποία τα σωματίδια από τα οποία αποτελείται αποκτούν συγκεκριμένο φάσμα ταχυτήτων εξαρτάται από τον βαθμό ιονισμού (δηλαδή την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου). Το φαινόμενο αυτό έχει σημαντικές τεχνολογικές εφαρμογές, καθώς τεχνολογικές διεργασίες που μέχρι τώρα πραγματοποιούνταν με χρήση μη-ιονισμένων-αερίων σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες μπορούν πλέον να γίνονται με χρήση πλάσματος σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το οικονομικό όφελος είναι προφανές. Αλλά και διεργασίες ανέφικτες με χρήση αερίων γίνονται τεχνικά δυνατές με χρήση πλάσματος.

Μία βασική διαφορά του πλάσματος από τις άλλες βασικές καταστάσεις της ύλης είναι ότι ο όγκος και το σχήμα του εξαρτάται σημαντικά από τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία (εικόνα 1.2), από τα οποία συνήθως δημιουργείται, όπως και ο κεραυνός. Η θερμοκρασία του πλάσματος είναι υπερβολικά υψηλή, αλλά η πίεση υπερβολικά χαμηλή. Αν το πλάσμα προσκρούσει σε άλλο σώμα τότε ψύχεται αμέσως χωρίς να θερμάνει το άλλο σώμα.



Εικόνα 1.2: Ροή πλάσματος χωρίς (πάνω) και με οριζόντιας φοράς μαγνητικό πεδίο (κάτω).

1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΟΠΗΣ ΤΟΞΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Αυτή τη στιγμή η βιομηχανία έχει την δυνατότητα να επεξεργαστεί κάποια σκληρά και πολύ σκληρά υλικά (κράματα) με την μέγιστη τεχνική και οικονομική αποτελεσματικότητα, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία πλάσμα. Έτσι, ανοξειδωτοι χάλυβες, χάλυβες μαγνησίου, κράματα τιτανίου, χαλκός, μαγνήσιο, αλουμίνιο και τα κράματα του, χυτοσίδηρος και άλλα υλικά μπορούν να κατεργαστούν.

Οι τεχνολογίες οι οποίες βασίζονται στο θερμικό αποτέλεσμα του πλάσματος κατέχουν σημαντική θέση στο πεδίο των μη συμβατικών κατεργασιών. Αυτή την στιγμή η κατεργασία με τόξο πλάσματος (PAM) αποτελεί μια από της πιο σύγχρονες και μοντέρνες τεχνολογίες για βιομηχανικές εφαρμογές.

Στην κατασκευή μηχανών, την αεροναυπηγική, την κατασκευή πλοίων και άλλων εφαρμογών βαριάς βιομηχανίας συναντάμε τέτοια συστήματα χάρη στα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής. Στον κατασκευαστικό τομέα, το πλάσμα σαν εργαλείο χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές κοπής, επένδυσης (coating), συγκόλληση (welding) και υποστήριξη μηχανικών κατεργασιών όπως τορνίρισμα, διάτρηση, χάραξη, κοπή ελασμάτων κτλ.[7].

1.4 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Η κατεργασία κοπής με τεχνολογία πλάσμα ανακαλύφθηκε περίπου πριν από 50 χρόνια για μέταλλα τα οποία ήταν δύσκολο να κοπούν με τις κλασικές μεθόδους κοπής. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μια υψηλής ενέργειας δέσμη ιονισμένου αερίου ως πηγή θερμότητας.

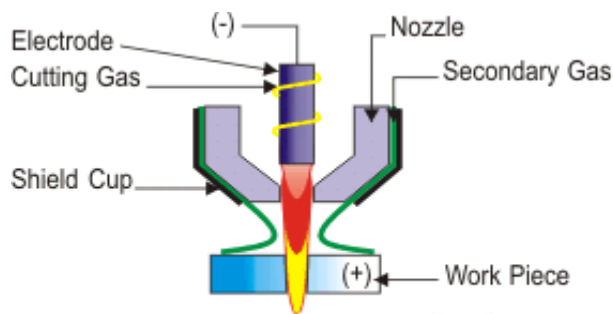
Τα συστήματα αυτά που χρησιμοποιούν την τεχνολογία πλάσμα είναι αυτή τη στιγμή άμεσα συνδεδεμένα με ηλεκτρονικά προγραμματιζόμενες εργαλειομηχανές (CNC) και έχουν τη δυνατότητα κατεργασίας οποιουδήποτε σχήματος σε υψηλές ταχύτητες παραγωγής.

Η τεχνολογία κοπής με πλάσμα προσφέρει παραγωγικότητα και καλή ποιότητα κοπής σε αρκετές εφαρμογές. Έχει την δυνατότητα κοπής λεπτών ελασμάτων με τις μικρότερες παραμορφώσεις.

Η ανακάλυψη της κοπής μέσω τόξου πλάσματος έγινε από τον Gage το 1955. Η εφεύρεση του ήταν ένα υποπροϊόν της δουλειάς του, δηλαδή την βελτίωση της σταθερότητας το τόξου το οποίο χρειαζόταν για την συγκόλληση. Ο Gage παρατήρησε ότι προσπαθώντας να κάνει το τόξο πιο σταθερό και αυξάνοντας την πίεση του αερίου το τόξο δεν κατάφερνε απλώς να λιώσει το υλικό πλήρωσης για την συγκόλληση, αλλά μπορούσε να διεισδύσει και στο ίδιο το μέταλλο.

Το 1962 είχαμε την εισαγωγή του αερίου προστασίας(dual flow plasma arc) στους πυρσούς τόξου πλάσματος [8]. Ο James Browning το 1963 εισήγαγε στους συμβατικούς πυρσούς πλάσματος ένα δεύτερο αέριο (αέριο προστασίας) γύρω από το ακροφύσιο του πυρσού. Στην περίπτωση αυτή το αέριο κοπής ήταν συνήθως Άζωτο ενώ το αέριο προστασίας επιλεγόταν βάση του υλικού προς κατεργασία.

Συνήθως τα αέρια προστασίας που χρησιμοποιούνταν για κοπή μαλακού χάλυβα ήταν βιομηχανικός αέρας και οξυγόνο, ενώ για ανοξειδωτους χάλυβες διοξείδιο του άνθρακα και ένα μείγμα αργού-υδρογόνου για αλουμίνιο.



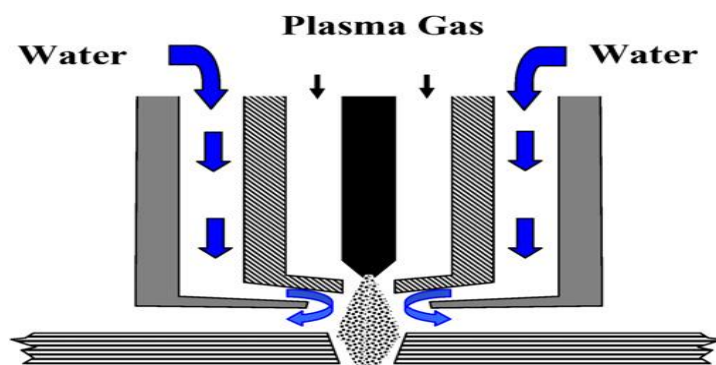
Εικόνα 1.3: Πυρσός με αέριο προστασίας. Ηλεκτρόδιο (electrode) , αέριο κοπής (cutting gas), κάλυμμα προστασίας (shield cup), ακροφύσιο (nozzle), αέριο προστασίας (secondary gas), κατεργαζόμενο έλασμα (work piece).

Η τεχνική αυτή είχε δύο πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα για αυτό και εφαρμόζεται μέχρι σήμερα. Πρώτον επιτυγχάνει πολύ καλύτερη συγκέντρωση και σταθερότητα του τόξου και δεύτερον ψύχει τον πυρσό και τα αναλώσιμα που βρίσκονται μέσα του αυξάνοντας έτσι την διάρκεια ζωής τους.

Το 1964 είχαμε την εισαγωγή του βιομηχανικού αέρα ως αέριο κοπής. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας κοπής για ελάσματα από χάλυβα και βελτίωσε δραματικά την ποιότητα κοπής. Το κόστος ήταν η ταχύτερη οξείδωση του ηλεκτροδίου. Από τότε όταν ο βιομηχανικός αέρας ήταν το αέριο κοπής το ηλεκτρόδιο κατασκευαζόταν από ζirkόνιο (Zr).

Το 1970 χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά πυρσοί οι οποίοι χρησιμοποιούσαν ως αέριο κοπής άζωτο και για προστασία δέσμη νερού. Σε αυτή τη διαδικασία περίπου 1 με 2 L/min νερού εκτοξευόταν γύρο από το τόξο και περίπου το μισό της ποσότητας αυτής εξατμιζόταν από το τόξο.

Αυτό το είδος κοπής τόξου πλάσματος παρήγαγε εξαιρετικά κάθετη κοπή με σχεδόν καθόλου επιφανειακή καμπυλότητα (top edge rounding). Για 20 χρόνια η μέθοδος αυτή ήταν ότι καλύτερο όσον αφορά την ποιότητα για υλικά με πάχος μέχρι 75mm.



Εικόνα 1.4: Πυρσός με προστασία από δέσμη νερού. Αέριο κοπής (plasma gas), νερό (water).

Το 1977 χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος κοπής κάτω απ' το νερό (underwater cutting). Αυτό έγινε με σκοπό την μείωση του θορύβου που παράγεται κατά την κοπή τόξου πλάσματος, καθώς επίσης και την μείωση των επικίνδυνων αερίων που παράγονται από τη διαδικασία αυτή. Πράγματι κόβοντας σε βάθος 70 με 80 χιλιοστά νερού τα επίπεδα θορύβου και εκπομπών μειώθηκαν σημαντικά.

Το 1980 κατασκευάστηκαν πυρσοί οι οποίοι χρησιμοποιούσαν ως αέριο κοπής οξυγόνο και προστασία δέσμη νερού. Αυτό συντέλεσε γενικά στην αύξηση της ποιότητας κοπής σε υλικά από μαλακό χάλυβα και πάχους έως 25mm.

Το 1990 δημιουργήθηκαν πυρσοί κοπής πλάσματος υψηλής πυκνότητας (high density plasma cutting). Λόγο του μεγάλου ανταγωνισμού από τα συστήματα κοπής με λέιζερ (laser cutting), οι κατασκευαστές εισήγαγαν την μέθοδο αυτή η οποία επιτυγχάνει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια διαστάσεων καθώς και πολύ καλύτερη επιφάνεια κοπής.

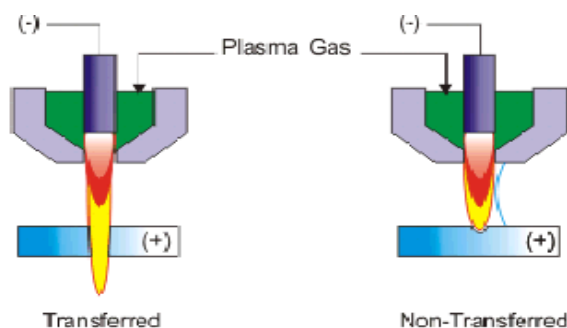
1.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΟΠΗ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

Γενικά υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους χρησιμοποιώντας ιονισμένο αέριο (πλάσμα) μπορούμε να πετύχουμε κοπή [8]. Οι τρόποι που έχουν μέχρι στιγμής κυριαρχήσει είναι δύο:

- Κοπή μη μεταφερόμενου τόξου,
- Κοπή μεταφερόμενου τόξου.

Η δέσμη του πλάσματος μπορεί να εφαρμοστεί με την μέθοδο του μεταφερόμενου τόξου, όπου το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μεταξύ του ηλεκτροδίου (κάθοδος) και του προς κατεργασία ελάσματος (άνοδος).

Μπορεί επίσης να δημιουργηθεί μέσω μη μεταφερόμενου τόξου όπου η ροή ηλεκτρικού ρεύματος δημιουργείται μεταξύ του ηλεκτροδίου και του ακροφυσίου. Οι δύο αυτοί τρόποι απεικονίζονται παρακάτω (εικόνα 1.5).



Εικόνα 1.5: Αριστερά κοπή μεταφερόμενου τόξου(transferred), δεξιά κοπή μη μεταφερόμενου τόξου(non-transferred).

1.6 ΠΥΡΣΟΙ ΤΟΞΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

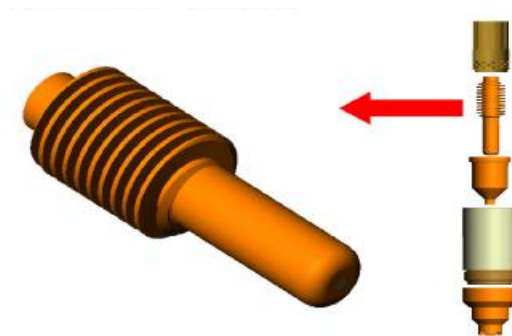
Υπάρχουν διάφοροι τύποι πυρσών ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται. Υπάρχουν πολλές εταιρείες οι οποίες κατασκευάζουν τέτοιους πυρσούς, παρ' όλα αυτά τα βασικά τους χαρακτηριστικά είναι για όλες τις εταιρείες ίδια.

Ο σχεδιασμός του πυρσού παίζει καθοριστικό ρόλο στην κοπή διότι μέσα του περιέχονται διάφορα εξαρτήματα τα οποία πρέπει να βρίσκονται σε πολύ καλή ευθυγράμμιση. Μέσα σε αυτά είναι και τα αναλώσιμα που θα δούμε παρακάτω. Τα αναλώσιμα παίζουν σπουδαίο ρόλο στην ποιότητα της κοπής διότι φθείρονται εύκολα και χρειάζονται συχνά αντικατάσταση. Αυτό σημαίνει ότι ο σχεδιασμός του πυρσού πρέπει να είναι τέτοιος ώστε όχι μόνο να γίνεται εύκολα η αντικατάσταση των αναλωσίμων αλλά και να προσφέρει τέλεια εφαρμογή και ευθυγράμμιση ακόμα και μετά από μεγάλο αριθμό αντικαταστάσεων.

Ο πυρσός είναι υπεύθυνος ώστε να διατηρεί όλα τα αναλώσιμα σε τέλεια συνοχή και ευθυγράμμιση μεταξύ τους.

Ένας πυρσός αποτελείται από τα εξής αντικείμενα:

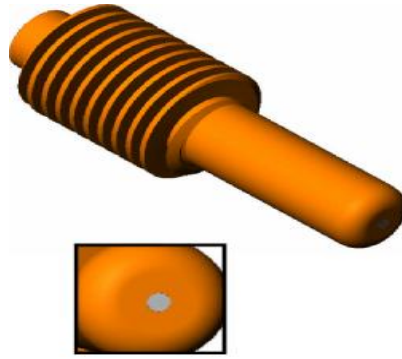
- Ηλεκτρόδιο (Electrode)
- Ελεγκτής περιδίνησης αερίου (Swirl ring)
- Ακροφύσιο (Nozzle)
- Ασφαλιστικό κάλυμμα (Retaining cap)
- Κάλυμμα προστασίας (Shield cap)



Εικόνα 1.6: Αναλώσιμα πυρσού τόξου πλάσματος.

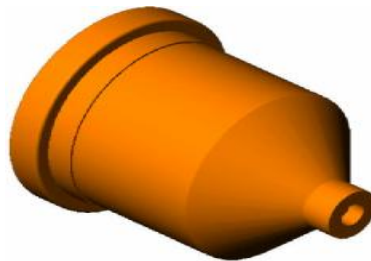
Το χάλκινο ηλεκτρόδιο δέχεται την αρνητική τάση μέσω μιας μικρής κουκίδας από άφνιο ή βολφράμιο.

- Άφνιο (Hf) για αέριο κοπής οξυγόνου ή βιομηχανικού αέρα.
- Βολφράμιο (W) για αέριο κοπής αζώτου ή μίγματος αργού-υδρογόνου (H35).



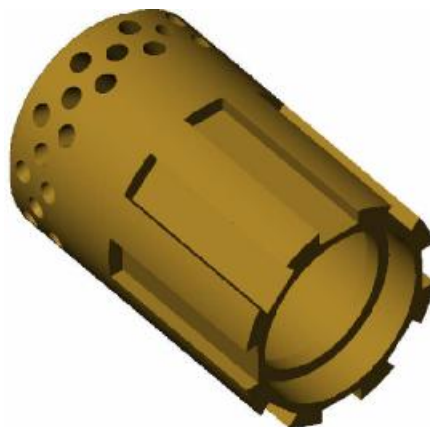
Εικόνα 1.7: Ηλεκτρόδιο.

Το ακροφύσιο περιορίζει και συγκεντρώνει την δέσμη του πλάσματος. Το μέγεθος του ακροφυσίου είναι άμεσα συνδεδεμένο με την ένταση κοπής δηλαδή του ρεύμα που καλείται να μεταφέρει. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του ρεύματος που περνάει από αυτό τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι και η διάμετρος το ακροφυσίου.



Εικόνα 1.8: Ακροφύσιο.

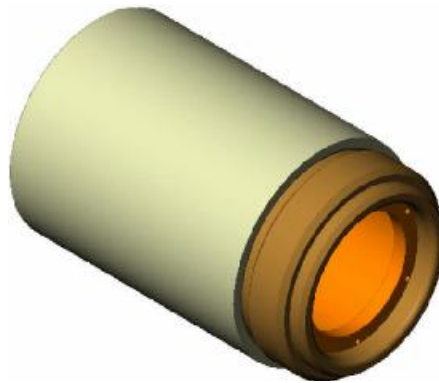
Ο δακτύλιος περιδίνησης αερίου φέρει στο σώμα του μικρές οπές η οποίες έχουν σαν σκοπό την διοχέτευση του αερίου κοπής μέσα στο θάλαμο του πλάσματος. Αυτές οι οπές είναι κατασκευασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να πετυχαίνουν περιδίνηση του αερίου κοπής με αποτέλεσμα το τόξο να είναι πιο συγκεντρωμένο και σταθερό.



Εικόνα 1.9: Δακτύλιος περιδίνησης αερίου.

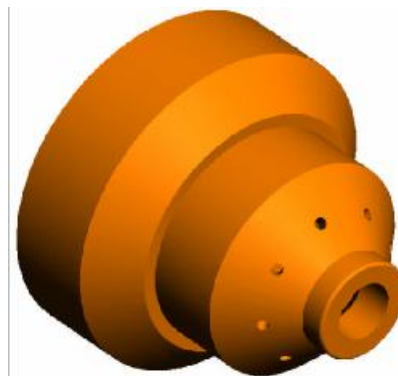
Το ασφαλιστικό κάλυμμα μαζί με τον δακτύλιο περιδίνησης αερίου χρησιμοποιούνται για να κρατούν σε ευθυγράμμιση το ηλεκτρόδιο και το ακροφύσιο.

Επίσης προστατεύουν τον χειριστή από την υψηλή τάση που αναπτύσσετε μεταξύ του ηλεκτροδίου και του ακροφυσίου.



Εικόνα 1.10: Ασφαλιστικό κάλυμμα.

Το κάλυμμα προστασίας είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να προστατεύει τον πυρσό και κατά συνέπεια τα αναλώσιμα που βρίσκονται σε αυτόν, από το λιωμένο μέταλλο που εκτοξεύεται κατά την διάρκεια της κοπής καθώς και από την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην επιφάνεια κοπής. Επίσης το κάλυμμα προστασίας στις περιπτώσεις όπου έχουμε αέριο προστασίας κατευθύνει το αέριο (η νερό για την περίπτωση που χρησιμοποιείται για προστασία) γύρω από την δέσμη του πλάσματος. Πολλές φορές το κάλυμμα αυτό είναι ηλεκτρικά μονωμένο έτσι ώστε να είναι δυνατή η επαφή του με την κατεργαζόμενη επιφάνεια.



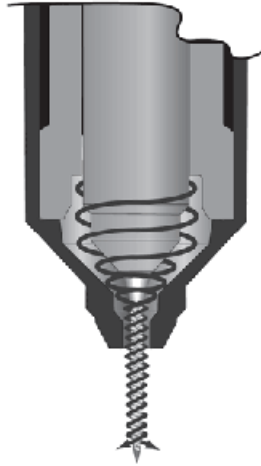
Εικόνα 1.11: Κάλυμμα προστασίας.

Τα είδη των πυρσών είναι:

-Ανάλογα με την ροή του αερίου κοπής.

A) Πυρσοί γραμμικής ροής αερίου (laminar gas flow)

B) Πυρσοί περιδίνησης του αερίου (vortex gas flow)



Εικόνα 1.12: Πυρσός με περιδίνηση αερίου χωρίς αέριο προστασίας

-Ανάλογα με την χρήση αερίου προστασίας.

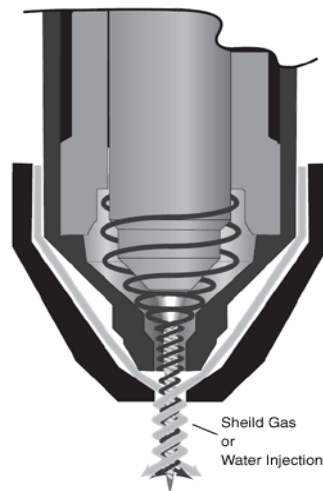
A) Πυρσοί χωρίς αέριο προστασίας

B) Πυρσοί με αέριο προστασίας

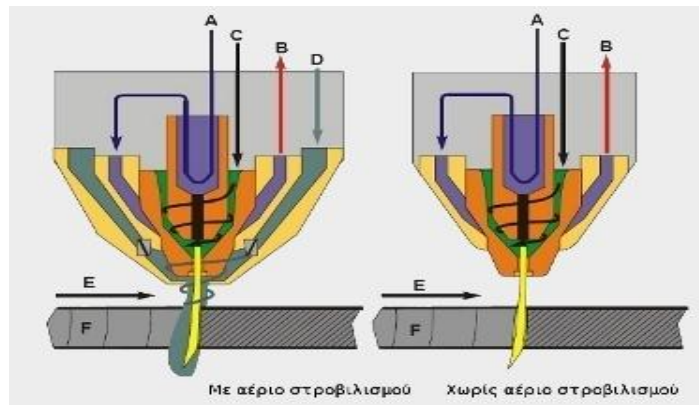
Στην σύγχρονη βιομηχανία οι πυρσοί που έχουν κυριαρχήσει είναι αυτοί με περιδίνηση του αερίου κοπής και με χρήση αερίου προστασίας. Αυτό είναι απόλυτα κατανοητό αν αναλογιστεί κανείς τα πλεονεκτήματα που έχουν έναντι των απλών πυρσών.

Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως υπάρχουν πυρσοί οι οποίοι αντί για αέριο προστασίας χρησιμοποιούν νερό. Το νερό σαν μέσο προστασίας σε ένα πυρσό πλάσματος παρέχει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία είναι:

- Καλύτερη ψύξη των αναλωσίμων άρα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους.
- Ένα ασύμμετρο σχήμα του διακένου με μία πλευρά κάθετη, η οποία εξαρτάται από την φορά περιδίνησης του αερίου, και μία υπό γωνία.
- Μείωση σε σημαντικό ποσοστό των ηχητικών κυμάτων που παράγονται στην έξοδο του πυρσού τα οποία μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα ακοής στον χειριστή.
- Τέλος η χρήση νερού ως αερίου προστασίας βοηθά στην μείωση της εκπομπής βλαβερών αερίων που παράγονται κατά την διαδικασία της κοπής.



Εικόνα 1.13: Πυρσός με περιδίνηση αερίου με χρήση αερίου (shield gas) η νερού (water injection) για προστασία.



Εικόνα 1.14: Τομή πυρσού τόξου πλάσματος.

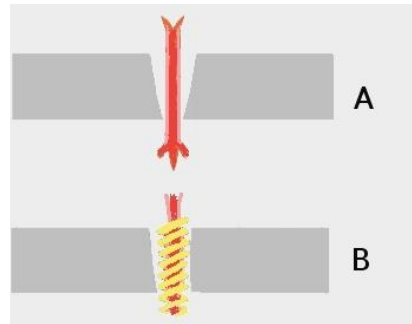
Στην εικόνα (1.14) δεξιά επεξηγηματική τομή μιας τσιμπίδας πλάσματος με και χωρίς αέριο περιδίνησης (Swirl Gas), για το οποίο θα μιλήσουμε αμέσως παρακάτω: A. Είσοδος ψυκτικού, B. Έξοδος ψυκτικού, C. Αέριο Πλάσματος, D. Αέριο περιδίνησης [Swirl Gas], E. Κατεύθυνση κοπής και F. Επιφάνεια κοπής.

Ο Πυρσός (τσιμπίδα) πλάσματος χρησιμοποιεί ένα ακροφύσιο (μπέκ) από κάποιο κράμα χαλκού για να περιορίσει το ρεύμα του ιονισμένου αερίου και να εστιάζει την ενέργειά του σε μία πολύ μικρή περιοχή.

1.7 ΠΕΡΙΔΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Η εισαγωγή της τεχνολογίας περιδίνησης του αερίου υποβοηθά την κοπή με πολλούς τρόπους. Πρώτον, η περιδίνηση αυξάνει την ψύξη. Τα μη ιονισμένα άτομα του αερίου είναι βαρύτερα και μικρότερης θερμοκρασίας από τα ιονισμένα, και καθώς αναγκάζονται σε περιδίνηση κατανέμονται στο εξωτερικό της περιδινούμενης στήλης του αερίου. Αυτό το ψυχρότερο φράγμα προστατεύει το χάλκινο μπέκ.

Όσο αυξάνει η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, τόσο μεγαλώνει το ποσοστό ιονισμένων ατόμων, αλλάζοντας τον "ιδανικό λόγο" 30%/70% (30% πλάσμα, 70% ψυχρό αέριο), και η ψύξη μειώνεται, μικραίνοντας τη ζωή του μπέκ. Τα μπέκ σχεδιάζονται για να λειτουργούν σε συγκεκριμένο φάσμα έντασης ρεύματος.

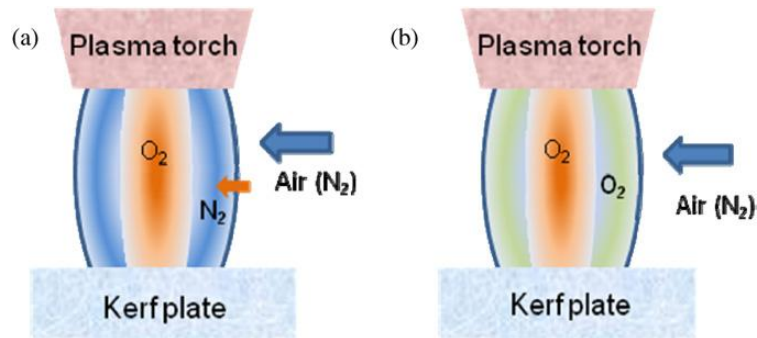


Εικόνα 1.15: Α)Γραμμική ροή του αερίου κοπής ,Β)περιδίνηση του αερίου κοπής.

Η περιδίνηση του αερίου βελτιώνει την ποιότητα κοπής. Αν το αέριο του πλάσματος δεν έμπαινε σε περιστροφή, το αποτέλεσμα θα ήταν κοπή "φρεζαριστή" και στις δύο πλευρές του αυλακιού κοπής (εικόνα 1.15: Α. Ευθεία ροή αερίου, επιφάνεια κοπής φρεζαριστή και στις δύο πλευρές). Αναγκάζοντας το αέριο να περιδινείται, το τόξο κατανέμεται ομοιόμορφα στην μία πλευρά της "κολώνας", οπότε η κοπή από εκεί είναι "κάθετη" (εικόνα 1.15 σχήμα κάτω: Β. Περιδίνηση αερίου, η μία επιφάνεια κοπής κάθετη). Εάν αλλάξει η φορά της περιδίνησης, η κάθετη πλευρά θα αλλάξει αντιδιαμετρικά. Καθώς το ιονισμένο αέριο (το τόξο του πλάσματος) στριφογυρίζει, το ηλεκτρικό τόξο προσβάλλει κάθετα και σε όλο της το πλάτος την πλευρά του ελάσματος που θα κόψουμε. Όταν γίνεται αυτό, η ενέργεια κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το πάχος της κοπής του αντικειμένου εργασίας. Αυτή η ισοκατανομή της ενέργειας έχει αποτέλεσμα πιο "τετράγωνη" κοπή, ενώ από την αντίθετη πλευρά η επιφάνεια κοπής έχει μία γωνίας κλίσης 5 μέχρι 8 μοιρών.

Η **εισαγωγή αερίου προστασίας** περιορίζει ακόμα περισσότερο το τόξο και ψύχει τον πυρσό (plasma torch) και τα αναλώσιμα που βρίσκονται σε αυτόν. Αυτό το αέριο εισάγεται μετά τον ιονισμό του αερίου του πλάσματος, περιμετρικά του ακροφυσίου (μπέκ).

Το είδος του αερίου προστασίας ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή και το είδος του προς κατεργασία μετάλλου. Για παράδειγμα εάν το προς κατεργασία κομμάτι στο επόμενο στάδιο της παραγωγής πρέπει να συγκολληθεί θα πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στην επιλογή του αερίου κοπής και προστασίας ώστε να μην επηρεαστεί αρνητικά η συγκόλληση.



Εικόνα1.16 : Χρήση αερίων προστασίας. (a) Άζωτο (N_2), (b) οξυγόνο (O_2).

1.8 Η ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΤΟΞΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

Υπάρχουν τρία κύρια εξαρτήματα στο εσωτερικό ενός πυρσού:

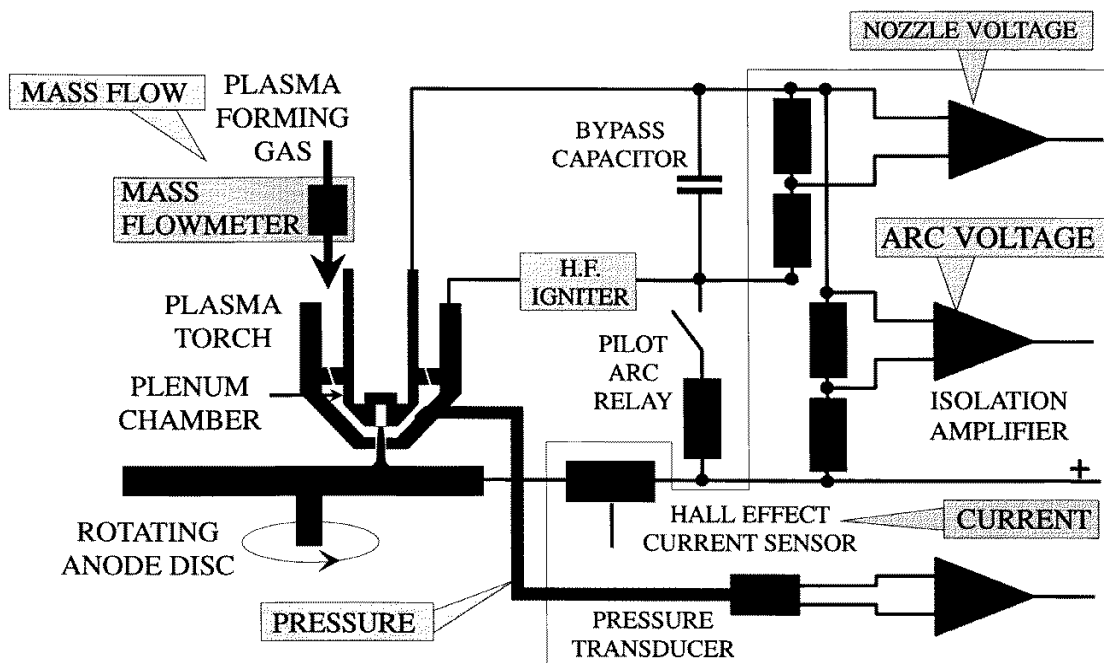
- Το Ηλεκτρόδιο (electrode)
- Ο Ελεγκτής Περιδίνησης Αερίου (Gas ή Swirl Baffle)
- Το Ακροφύσιο (Μπέκ)



Εικόνα 1.17: Αναλώσιμα πυρσού πλάσματος.

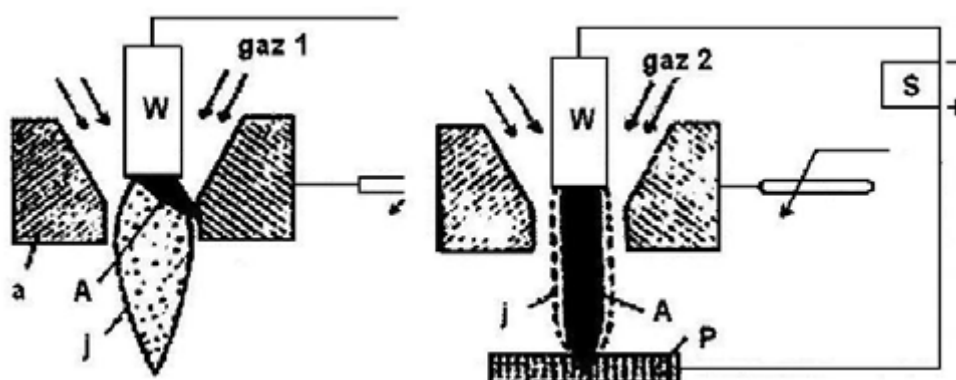
Αυτά τα εξαρτήματα λέγονται αναλώσιμα. Φθείρονται με τη λειτουργία της μηχανής και πρέπει να αντικαθίστανται. Στην εικόνα (1.17) πάνω βλέπουμε τα αναλώσιμα του πυρσού PerCut 370.2M της Kjellberg (Στη σειρά: Ηλεκτρόδιο-Ελεγκτής Περιδίνησης Αερίου-Μπέκ). Οι πυρσοί άλλων κατασκευαστών, όπως και άλλοι πυρσοί του ίδιου κατασκευαστή, μπορεί να έχουν κάπως διαφορετική σχεδίαση, αλλά όλοι απαραίτητα έχουν τα τρία εξαρτήματα που κάνουν τις λειτουργίες που αναφέραμε.

Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με τον αρνητικό πόλο του συνεχούς ρεύματος που παράγει η Γεννήτρια Ισχύος του Πλάσματος. Το ακροφύσιο (μπέκ) συνδέεται στον θετικό πόλο αλλά είναι ηλεκτρικά μονωμένο μέσω ενός ανοιχτού διακόπτη (ρελέ). Όταν δίνουμε στο σύστημά μας εντολή έναρξης του Τόξου, συμβαίνουν τα ακόλουθα[9]:



Εικόνα 1.18: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος τόξου πλάσματος.

- Το κεντρικό ρελέ στην Πηγή Ισχύος ενεργοποιείται στέλνοντας ισχυρή αρνητική τάση στο Ηλεκτρόδιο
- Το Αέριο αρχίζει να ρέει προς την τσιμπίδα και υποχρεώνεται σε περιδίνηση από τον Ελεγκτή Περιδίνησης (Swirl Baffle ή Swirl Control)
- Οι συνήθως ανοικτές (normally open) επαφές στο κύκλωμα του μπέκ κλείνουν, συνδέοντάς το με τον θετικό πόλο της γεννήτριας
- Μία γεννήτρια υψηλών συχνοτήτων παρέχει υψηλής τάσης και συχνότητας δυναμικό ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το μπέκ. Αυτό προκαλεί τη δημιουργία μικρού σπινθήρα ανάμεσα στο μπέκ και το ηλεκτρόδιο που ιονίζει το αέριο που τα περιβάλλει.
- Η δημιουργία αυτού του ιονισμένου "διαδρόμου" προκαλεί την έκλυση μεγαλύτερου τόξου συνεχούς ρεύματος ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το μπεκ. Είναι αυτό που ονομάζουμε Πιλοτικό Τόξο.



Εικόνα 1.19: Αριστερά δημιουργία πιλοτικού τόξου (pilot arc), δεξιά τόξο μεταξύ ηλεκτροδίου και κατεργαζόμενου ελάσματος (μεταφορά τόξου).

- Το πιλοτικό τόξο ωθείται έξω από το μπέκ, παρασυρόμενο από το ρεύμα του αερίου, και έρχεται σε επαφή με τη λαμαρίνα.
- Το κύριο τόξο παράγεται όταν το πιλοτικό τόξο έρχεται σε επαφή με τη λαμαρίνα (με την προϋπόθεση πως η τσιμπίδα είναι αρκετά κοντά). Το ρελέ του μπέκ ανοίγει βγάζοντας το μπέκ από το κύκλωμα. Έχουν δημιουργηθεί οι συνθήκες για τη δημιουργία τόξου.
- Το κύριο τόξο ενισχύεται με παροχή ρεύματος μεγαλύτερης έντασης, μετά την απομόνωση του μπέκ από το κύκλωμα με το άνοιγμα του ρελέ.

1.9 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΞΟΥ

Εάν υπάρξουν ειδικές συνθήκες (περιγράφονται παρακάτω) και το ακροφύσιο (μπέκ) παραμείνει μέσα στο κύκλωμα, τότε έχουμε τη δημιουργία διπλού τόξου [23].

Όπως περιγράψαμε προηγουμένως, το μπέκ πρέπει να παραμένει μέσα στο κύκλωμα μόνο κατά τη φάση του πιλοτικού τόξου. Αν το ακροφύσιο μείνει στο κύκλωμα και στη φάση της κοπής, θα καταστραφεί γιατί θα δεχτεί υψηλές εντάσεις κοπής.

Το διπλό τόξο παράγεται από:

- **Διάτρηση με ακίνητο πυρσό.** Η τσιμπίδα πρέπει να τοποθετείται αρκετά κοντά στη λαμαρίνα ώστε να επιτρέψει στο πιλοτικό τόξο να έλθει σε επαφή μαζί της, για να μπορέσει να ξεκινήσει το κυρίως τόξο. Τα "πιτσιλίσματα" λιωμένου μετάλλου, στα αρχικά στάδια της διάτρησης τινάζονται προς όλες τις κατευθύνσεις αλλά προς τα πλάγια.

Καθώς η διάτρηση προχωρά βαθύτερα, το ρεύμα αερίου "φυσάει" μέσα στο κοίλωμα, και ανακλάται προς τα επάνω, παρασύροντας κατακόρυφα προς τα επάνω και το τηγμένο υλικό. Αν αυτό το υλικό συγκεντρωθεί ανάμεσα στο μπέκ και την λαμαρίνα, αφού είναι καλός αγωγός του ρεύματος, θα κρατήσει το μπέκ μέσα στο κύκλωμα, ακόμα και όταν το ρελέ του ανοίξει προσπαθώντας να το απομονώσει. Ένα τέτοιο σενάριο μπορεί να καταστρέψει ολόκληρο το εμπρόσθιο άκρο του πυρσού.

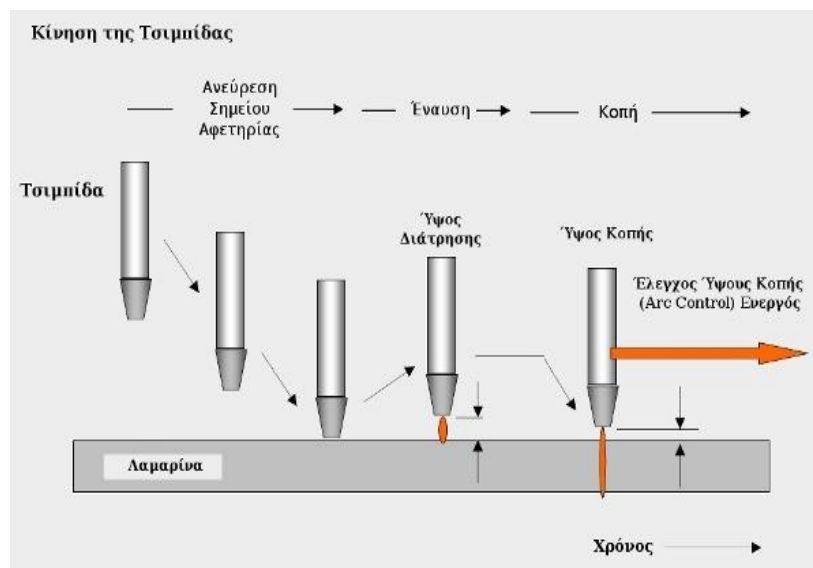
- **Τσιμπίδα σε επαφή με το έλασμα.** Κοπή λεπτού υλικού. Όλα τα συστήματα αυτόματης τοποθέτησης της τσιμπίδας κάνουν χρήση κάποιας μεθόδου ανίχνευσης του ύψους της από τη λαμαρίνα ώστε να τοποθετήσουν την τσιμπίδα στο σωστό ύψος από αυτήν. Μία μέθοδος είναι η μέθοδος 'επαφής και απομάκρυνσης'. Η τσιμπίδα κατεβαίνει αργά μέχρι να αποκτήσει επαφή με τη λαμαρίνα και ανυψώνεται στο σωστό αρχικό ύψος κάνοντας χρήση κάποιου χρονισμού ή κάποιας κωδικοποίησης. Αν η επαφή δεν γίνει αντικείμενο σωστής επεξεργασίας, η τσιμπίδα μπορεί να παραμείνει σε επαφή με τη λαμαρίνα λόγω αναπηδήσεων της λαμαρίνας ή στρεβλώσεων της. Το μπέκ θα παραμείνει στο κύκλωμα και θα δεχτεί εντάσεις κοπής για τις οποίες δεν είναι προορισμένο, με αποτέλεσμα να καταστραφεί.

- **Δυσλειτουργία του Πιλοτικού Τόξου.** Μερικές φορές μπορεί να συμβεί και το ρελέ του μπέκ να μην το απομονώνει. Κάτι τέτοιο μπορεί να οφείλεται σε βραχυκύκλωση του ρελέ ή σε κάποια βραχυκυκλωμένη αντίσταση. Και σε αυτή την περίπτωση το μπέκ το διατρέπει ρεύμα μεγαλύτερης έντασης από τις προδιαγραφές του, και καταστρέφεται.

1.10 ΠΩΣ ΝΑ ΑΠΟΦΥΓΟΥΜΕ ΤΟ ΔΙΠΛΟ ΤΟΞΟ

Το διπλό τόξο συνήθως συμβαίνει κατά τη διαδικασία της διάτρησης. Μερικές τεχνικές που μπορούν να μας βοηθήσουν να το αποφύγουμε είναι οι ακόλουθες:

- **Η αργή κίνηση της τσιμπίδας.** Η μηχανή προγραμματίζεται έτσι ώστε στη φάση της δημιουργίας του κυρίως τόξου να κινεί την τσιμπίδα αργά. Η ταχύτητα της κίνησης είναι μικρή, περίπου στο 5 μέχρι 10% της ταχύτητας κοπής, και διαρκεί μόνο για περιορισμένο χρόνο.



Εικόνα 1.20: Κίνηση του πυρσού.

- Το πιτσίλισμα του τηγμένου υλικού κατά τη διάτρηση δεν μπορεί να εκτοξευθεί πάνω στο μπέκ αφού αυτό κινείται, έτσι μειώνεται η πιθανότητα διπλού τόξου.
- **Ανύψωση της ακίνητης τσιμπίδας κατά τη διάτρηση.** Όταν δημιουργείται το κυρίως τόξο, η τσιμπίδα αρχίζει να απομακρύνεται από τη λαμαρίνα, οπότε το λιωμένο υλικό δεν μπορεί εύκολα να πλήξει το μπέκ. Η ανύψωση συνεχίζεται για το χρονικό διάστημα που είναι προγραμματισμένο και μετά η τσιμπίδα κατεβαίνει στο σωστό ύψος κοπής αφού η μηχανή έχει αρχίσει να την κινεί με την ταχύτητα κοπής.
- **Ύψος αρχικής διάτρησης μεγαλύτερο από το κανονικό (Διάτρηση με ακίνητο πυρσό).** Το μεγαλύτερο ύψος κάνει πιο δύσκολο στο τηγμένο υλικό που εκτοξεύεται προς τα επάνω να δημιουργήσει "γέφυρα" ανάμεσα στο μπέκ και τη λαμαρίνα, μειώνοντας τις πιθανότητες για τη δημιουργία διπλού τόξου. Αυτή η μέθοδος προφύλαξης είναι η λιγότερο αποτελεσματική.

1.11 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ ΤΟΞΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

Πλεονεκτήματα:

- ∅ Δυνατότητα κοπής ανθρακούχων χαλύβων πάνω από 10 φορές γρηγορότερα από μεθόδους φλογοκοπής, με ίδια ποιότητα και μικρότερο κόστος
- ∅ Παράγει μικρό διάκενο κοπής (Kerf)
- ∅ Έχει δυνατότητα κοπής διαφορετικών μετάλλων
- ∅ Συστήματα που χρησιμοποιούν για αέριο κοπής Άζωτο (N) μπορούν να κατεργαστούν εύκολα ανοξειδωτους χάλυβες
- ∅ Δυνατότητα κοπής ελασμάτων μικρού πάχους με μικρές παραμορφώσεις

Μειονεκτήματα:

- ∅ Υψηλό κόστος εγκατάστασης αλλά μικρότερο από συστήματα κοπής laser και υδροκοπής
- ∅ Κατά την διάρκεια της κοπής παράγονται επικίνδυνα τοξικά αέρια και υψηλά επίπεδα στάθμης θορύβου.

2. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΚΟΠΗ ΜΕΣΩ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

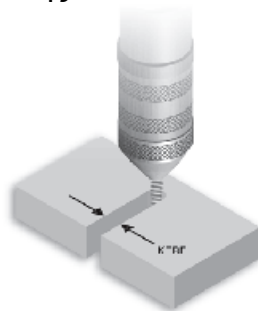
Η βελτίωση της κοπής με πλάσμα στην κατεργασία μεταλλικών φύλλων έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου και του κόπου που απαιτείται για τον καθαρισμό του μετάλλου πριν αυτό μεταβεί στο επόμενο βήμα της παραγωγικής διαδικασίας. Εάν το προς κατεργασία κομμάτι στην συνέχεια θα υποστεί συγκόλληση, μια καθαρή υψηλής ποιότητας κοπή θα παίξει πολύ σημαντικό ρόλο στην ποιότητα της συγκόλλησης.

Πολλοί πιστεύουν πως η κοπή πλάσματος (PAC) είναι μια μαύρη τέχνη. Στην πραγματικότητα, η διαδικασία είναι και τέχνη και επιστήμη. Η κοπή πλάσματος λειτουργεί όπως ο κεραυνός. Συνεχές ρεύμα, υψηλής τάσεως ηλεκτρικά τόξα από ένα αρνητικό δυναμικό (το ηλεκτρόδιο μέσα στο πυρσό) σε ένα υψηλό δυναμικό (το κατεργαζόμενο κομμάτι) μέσω μιας δέσμης ιονισμένου αερίου.

Στα συστήματα κοπής τόξου πλάσματος (PAC systems), το αέριο κινείται με σχεδόν υπερηχητικές ταχύτητες, και η θερμοκρασία του είναι μεγαλύτερη από 50.000 F. Με απλά λόγια, αυτή η διαδικασία χρησιμοποιεί μια υψηλής ταχύτητας δέσμη από ηλεκτρικά φορτισμένο αέριο για την κοπή του μετάλλου. Παρακάτω θα αναπτυχθούν κάποια σημαντικά στοιχεία τα οποία επηρεάζουν την ποιότητα της κοπής.

2.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ

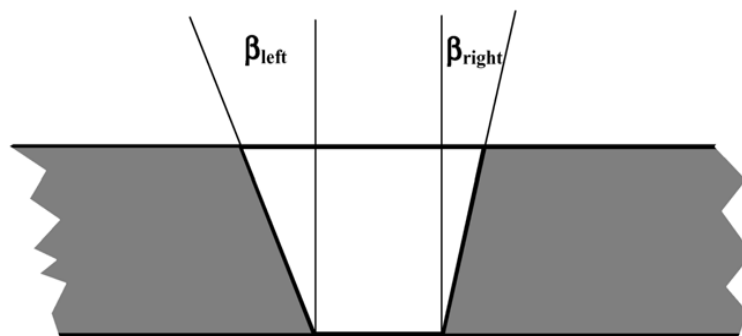
Το **διάκενο κοπής (Kerf)** είναι το πλάτος της κοπής, ή το ποσό μέταλλου που αφαιρείται από το τόξο πλάσματος. Προφανώς, το kerf παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια της κοπής του κομματιού προς κατεργασία στις συγκεκριμένες διαστάσεις. Η εμπειρική μέθοδος για τον υπολογισμό του kerf στα συστήματα αυτά είναι ότι θα είναι περίπου ένα ή ενάμισο με δύο φορές πλατύτερο από τη διάμετρο στομίου του ακροφυσίου. Οι παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στο kerf είναι το μέγεθος ακροφυσίων, η ταχύτητα κοπής, η ένταση του ρεύματος και του ύψος του ακροφυσίου από την επιφάνεια κοπής.



Εικόνα 2.1: Το διάκενο κοπής (kerf).

- **Ταχύτητα κοπής.** Χρησιμοποιώντας μεγάλες ταχύτητες κοπής και διατηρώντας τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές έχουμε σαν αποτέλεσμα μικρότερο διάκενο. Το διάκενο θα συνεχίσει να μικραίνει με αύξηση της ταχύτητας μέχρι το σημείο που η κοπή θα είναι αδύνατη. Μικρή ταχύτητα κοπής συνεπάγεται πλατύτερο διάκενο έως ότου η συντήρηση του τόξου να είναι αδύνατη.
- **Ένταση κοπής.** Αύξηση της έντασης κοπής διατηρώντας τις άλλες μεταβλητές σταθερές έχει σαν αποτέλεσμα πλατύτερο διάκενο. Περαιτέρω αύξηση της έντασης συνεπάγεται αύξηση του διακένου έως ότου το ακροφύσιο να καταστραφεί. Μικρή ένταση έχει σαν αποτέλεσμα μείωση του διακένου και αύξηση της γωνίας λοξότμησης (θετική) μέχρι η κοπή να είναι αδύνατη.
- **Ύψος ακροφυσίου.** Είναι η απόσταση του αυλού από το προς κατεργασία τεμάχιο μετά την έναρξη του τόξου δηλαδή κατά την διάρκεια της κοπής. Τα ποιο σύγχρονα συστήματα χρησιμοποιούν την μέθοδο της ανάδρασης η οποία ελέγχει την τάση του τόξου και σύμφωνα με αυτήν μεταβάλλει του ύψος κοπής. Αύξηση της τάσης του τόξου συνεπάγεται αύξηση του ύψους κοπής και αύξηση του διακένου. Περαιτέρω αύξηση θα οδηγήσει τελικά σε απώλεια της κοπής. Μείωση του ύψους κοπής θα οδηγήσει σε μείωση του διακένου έως ότου έχουμε και πάλι απώλεια κοπής.

Η **γωνία λοξότμησης (bevel angle)** είναι η κλίση η οποία δημιουργείται κατά την κοπή. Η γωνία λοξότμησης επηρεάζεται κυρίως από την καθετότητα του πυρσού, την κατεύθυνση της κοπής, το ύψος του πυρσού κατά την κοπή και την ταχύτητα κοπής [24]. Εάν η επιφάνεια της κοπής είναι ακριβώς 90 μοίρες τότε η γωνία λοξότμησης είναι μηδενική. Σε αυλούς οι οποίοι χρησιμοποιούν την τεχνολογία περιστροφής του αερίου, η γωνία αυτή είναι συνήθως από 1 έως 3 μοίρες για την ‘καλή’ πλευρά του κομματιού και 3 με 8 μοίρες για την ‘κακή’ πλευρά. Στους αυλούς γραμμικής ροής, η γωνία αυτή είναι γενικά από 4 έως 8 μοίρες και για τις δύο πλευρές της κοπής. Το ύψος κοπής έχει πολύ μεγάλη σημασία για την γωνία αυτή. Ένα μικρό ύψος κοπής σημαίνει συνήθως μικρότερη γωνία λοξοτομής. Μειώνοντας επίσης την ταχύτητα μπορούμε επίσης να μειώσουμε την γωνία αυτή.

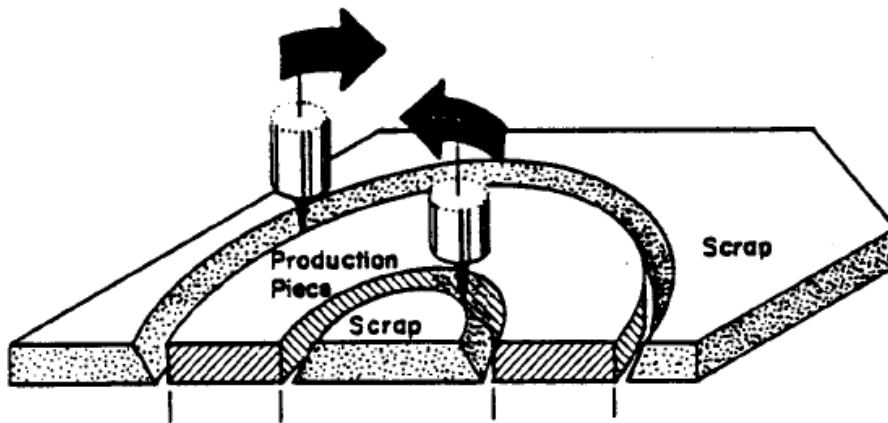


Εικόνα 2.2: Δεξιά η γωνία της καλής πλευράς του κομματιού και αριστερά η γωνία του αποβλήτου (scrap).

Η **κατεύθυνση του αυλού** και η **φορά περιστροφής του αερίου κοπής** είναι αυτά τα οποία προσδιορίζουν την καλή η κακή πλευρά της κοπής.

Εάν το αέριο περιστρέφεται ωρολογιακά, πράγμα που συμβαίνει τις περισσότερες φορές, τότε η καλή (πιο κάθετη) πλευρά της κοπής βρίσκεται στην δεξιά πλευρά του διακένου σύμφωνα με την κατεύθυνση του αυλού.

Αυτό γίνεται λόγω της ορμής του περιστρεφόμενου αερίου που έχει σαν αποτέλεσμα την προσκόλληση του τόξου. Έτσι υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση ενέργειας στην δεξιά πλευρά της κοπής. Αυτό σημαίνει ότι αν κόβεις ένα τεμάχιο σε σχήμα δαχτυλιδιού η εσωτερική κοπή πρέπει να γίνει με αμφιωρολογιακή φορά ενώ η εξωτερική με ωρολογιακή φορά.

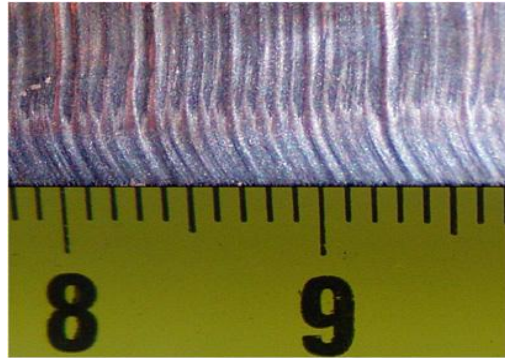


Εικόνα 2.3: Κατεύθυνση πυρσού ανάλογα με την φορά περιστροφής του αερίου κοπής. Προϊόν παραγωγής (production piece), απόβλητο (scrap).

Για κατεργασία πολλών όμοιων κοπών (σε μηχανικά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν δύο αυλούς) , το δαχτυλίδι περιδίνησης του αερίου κοπής μπορεί να αλλάξει σε έναν από τους δύο αυλούς με σκοπό την κατεργασία του ίδιου τεμαχίου από τους δυο αυλούς συγχρόνως και έχοντας την ίδια φορά περιστροφής.

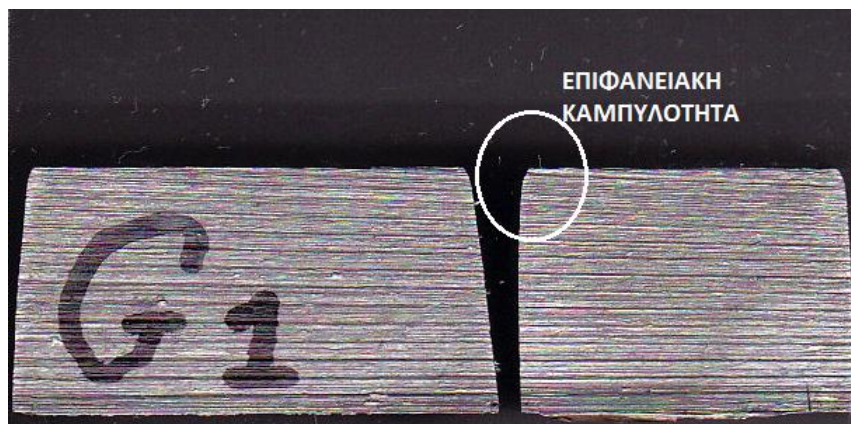
Κυματοειδής γραμμές (drag lines) κατά μήκος της επιφάνειας κοπής. Αυτές δημιουργούνται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου την ομαλότητα στην έξοδο του τροφοδοτικού (ομαλότερη έξοδος, ομαλότερη κοπή), το αέριο ή αέρια που χρησιμοποιούνται και τον σχεδιασμό του αυλού.

Οι κυματοειδής γραμμές είναι αποτέλεσμα αυτού που ονομάζεται 'anode spot phenomenon'. Η άνοδος είναι η θετική πλευρά του ηλεκτρικού κυκλώματος δηλαδή το προς κατεργασία κομμάτι. Καθώς το τόξο πλάσματος κόβει το μέταλλο , η ηλεκτρική επαφή 'πηδά' στο κάτω μέρος του προσώπου της κοπής με αποτέλεσμα το τόξο να χάσει την ευστάθειά του. Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που δημιουργεί αυτές τις κυματοειδής γραμμές είναι η πολύ μεγάλη ταχύτητα κοπής. Στην περίπτωση αυτή το τόξο δεν κόβει κάθετα αλλά αδυνατώντας να φτάσει την ταχύτητα του πυρσού μένει πίσω με αποτέλεσμα να κόβει υπό κλίση. Σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση του φαινομένου αυτού παίζει και η ρύθμιση του ύψους κοπής [21].



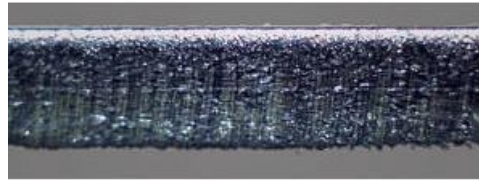
Εικόνα 2.4: Σχηματισμός κυματοειδών γραμμών (drag lines).

Καμπυλότητα στην κορυφή της επιφάνειας κοπής, όπως το όνομα του προσδιορίζει, είναι ένα ελαφρύ στρογγύλεμα του μετάλλου στο πάνω μέρος της κοπής. Η καμπυλότητα αυτή επηρεάζεται κυρίως από το πάχος του υλικού, το αέριο κοπής και το προστατευτικό αέριο. Συμβαίνει διότι το τόξο κοπής είναι πιο θερμό στην κορυφή της κοπής από ότι στο κάτω μέρος. Αυτό είναι πιο εμφανές στα λεπτότερα μέταλλα. Συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν αέριο προστασίας ελαχιστοποιούν την εμφάνιση αυτού του φαινομένου και ειδικότερα συστήματα που χρησιμοποιούν για προστασία δέσμη νερού. Συστήματα υψηλών ανοχών μπορούν να πετύχουν αρκετά κάθετες επιφάνειες κοπής με την ελάχιστη δυνατή καμπυλότητα στην κορυφή. Συνήθως είναι αδύνατον να αποφύγουμε έστω και μια μικρή καμπυλότητα σε οποιοδήποτε τεμάχιο έχει υποστεί κοπή με τεχνολογία πλάσματος.

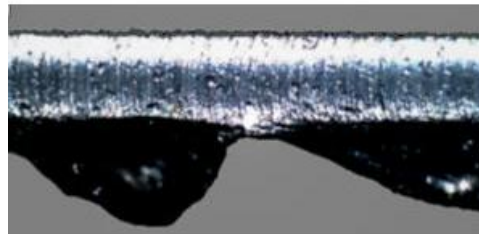


Εικόνα 2.5: Επιφανειακή καμπυλότητα (top edge rounding) στο πάνω μέρος της κοπής (τμήμα δοκιμίου πειράματος).

Επικαθήσεις μετάλλου [16], είναι το επαναστεροποιημένο μέταλλο το οποίο επικάθεται στο κατώτερο σημείο της επιφάνειας κοπής. Αυτό εμφανίζεται είτε ως ένα μικρό σκληρό κορδόνι είτε ως ένα μεγάλο κυματοειδές κορδόνι και συνήθως βρίσκεται στην 'κακή' πλευρά της κοπής.



Dross Free Plasma Cut Edge

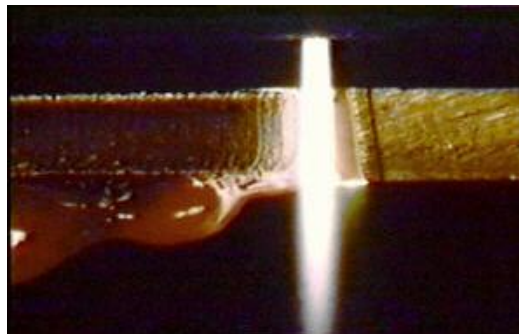


Plasma Cut Edge With Heavy Dross Formation

Εικόνα 2.6: Επικαθίσεις μετάλλου. Πάνω κοπή χωρίς σχηματισμό επικαθίσεων, κάτω κοπή με έντονο σχηματισμό επικαθίσεων.

Ο σχηματισμός των επικαθίσεων βασίζεται στην ταχύτητα κοπής, την ένταση του ρεύματος, την επιλογή των αερίων (κοπής και προστασίας) και τον τύπο και το πάχος του μετάλλου. Τόσο οι υψηλές όσο και οι χαμηλές ταχύτητες κοπής προκαλούν επικαθίσεις, αλλά υπάρχει ένα ιδανικό 'παράθυρο' το οποίο μας δίνει 'χωρίς επικαθίσεις', ή 'ελάχιστες επικαθίσεις' στην κοπή.

Επικαθίσεις χαμηλής ταχύτητας, εμφανίζονται όταν οι ταχύτητα κοπής είναι πολύ χαμηλή, το διάκενο (kerf) γίνεται πιο πλατύ και έτσι είναι δυσκολότερο για την δέσμη του αερίου να απομακρύνει το τηγμένο μέταλλο.



Εικόνα 2.7: Επικαθίσεις μετάλλου λόγο χαμηλής ταχύτητας (Low speed dross).

Επικαθίσεις υψηλής ταχύτητα από την άλλη πλευρά εμφανίζονται όταν η ταχύτητα κοπής είναι αρκετά μεγάλη χωρίς να υπάρχει αντίστοιχη αύξηση της έντασης του ρεύματος. Όταν αυτό συμβαίνει το τόξο γίνεται ασταθές και δημιουργεί επικαθίσεις οι οποίες χρειάζονται περαιτέρω κατεργασία για να αφαιρεθούν.

Επιφανειακό πιτσίλισμα, είναι μια μικρή συσσώρευση επικαθίσεων οι οποίες σχηματίζονται στο επάνω μέρος του κατεργαζόμενου κομματιού κατά μήκος της επιφάνειας κοπής.

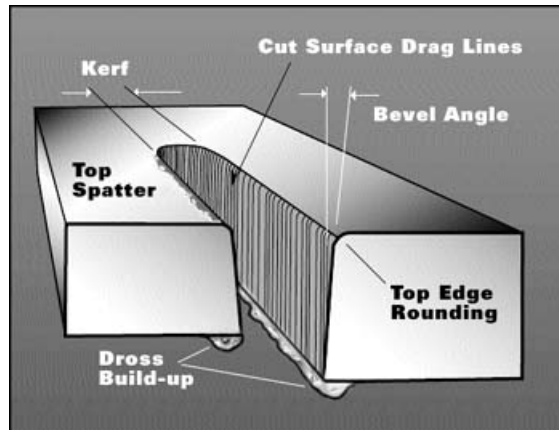
Σε αντίθεση με τους συνήθεις παράγοντες που συμβάλουν στην δημιουργία επικαθίσεων , το επιφανειακό πιπίλισμα μπορεί να είναι αποτέλεσμα χαμηλής ταχύτητας κοπής, η μεγάλης απόστασης του ακροφυσίου από την επιφάνεια κοπής (standoff), η από μεγάλη φθορά του ακροφυσίου.

Οι δύο πρώτοι παράγοντες είναι αυτοί οι οποίοι παίζουν τον σημαντικότερο ρόλο στην εμφάνιση του φαινομένου αυτού .

Εναζώτωση εμφανίζεται όταν άζωτο (N) χρησιμοποιείται ως αέριο κοπής. Η συγκέντρωση αζώτου στην επιφάνεια κοπής μπορεί να προκαλέσει προβλήματα αργότερα εάν το κατεργασμένο κομμάτι επρόκειτο να υποστεί συγκόλληση. Το άζωτο έχει την τάση να σχηματίζει πόρους στην συγκόλληση με αποτέλεσμα να την εξασθενεί. Πιθανές λύσεις είναι η αλλαγή του αερίου κοπής και προστασίας, λείανση της επιφάνειας κοπής πριν την συγκόλληση ή χρήση ειδικού σύρματος για την συγκόλληση. Η εναζώτωση επηρεάζεται κυρίως από την επιλογή του αερίου κοπής και του αερίου προστασίας.

Η θερμικά επιρρεασθείσα περιοχή (HAZ), είναι η περιοχή γύρω από την κοπή η οποία έχει υποστεί μεταλλουργικές ή δομικές αλλαγές κατά την κατεργασία. Όσο μικρότερο είναι το HAZ, αυτό σημαίνει αυξημένη συνολικά αντοχή, αυξημένη αντοχή ως προς την οξειδωση και αντοχή στην επιφανειακή ρωγμάτωση. Το HAZ, είναι πολύ μικρό στα συστήματα κοπής τόξου πλάσματος εξαιτίας της συγκέντρωσης του τόξου και των ταχυτήτων της κατεργασίας. Συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν νερό για προστασία η ψεκασμό νερού, καθώς και συστήματα κοπής κάτω από το νερό παρέχουν πολύ μικρό HAZ λόγω της γρήγορης ψύξης που παρέχει το νερό.

Τραχύτητα, είναι μια από της σημαντικότερες παραμέτρους που καθορίζουν την ποιότητα της κοπής. Η τραχύτητα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό του πώς ένα αντικείμενο αλληλεπιδρά με το περιβάλλον γύρω του [11]. Επιφάνειες με μεγάλη τραχύτητα φθείρονται πολύ γρήγορα και επίσης έχουν μεγάλους συντελεστές τριβής σε σχέση με πιο λείες επιφάνειες. Επίσης επιφάνειες με μεγάλη τραχύτητα είναι πιο ευαίσθητες στη δημιουργία επιφανειακών ρωγμών και στην οξειδωση. Παρόλο που η τραχύτητα είναι πάντοτε ανεπιθύμητη είναι πολύ δύσκολο και απαιτεί υψηλό κόστος ο έλεγχος της κατά την παραγωγή. Μείωση της τραχύτητας σε ένα προϊόν συνεπάγεται τεράστια αύξηση στο κόστος παραγωγής.



Εικόνα 2.8: Παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα της κοπής. Το διάκενο (kerf), οι κυματοειδείς γραμμές της κοπής (cut surface drag lines), η γωνία λοξότμησης (bevel angle), η καμπυλότητα του άνω άκρου της κοπής (top edge rounding), η δημιουργία επικαθίσεων (dross build-up) και το επιφανειακό πιτσίλισμα (top spatter).

2.3 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ

Για την μέθοδο κοπής με πλάσμα διάφορες μεταβλητές παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη της βέλτιστης ποιότητας κοπής. Κάποιες από αυτές είναι:

- A) Ταχύτητα κοπής
- B) Ύψος κοπής
- Γ) Ένταση ρεύματος
- Δ) Πίεση αερίου κοπής κατά την έναρξη
- Ε) Πίεση αερίου προστασίας κατά την έναρξη
- ΣΤ) Πίεση αερίου κοπής κατά την κοπή
- Z) Πίεση αερίου προστασίας κατά την κοπή
- Η) Ύψος έναρξης τόξου
- Θ) Τάση του τόξου
- Ι) Καθαρότητα αερίων
- Κ) Πάχος μετάλλου
- Λ) Ποιότητα μετάλλου

Ενώ κάποιες από αυτές βρίσκονται κάτω από τον έλεγχο του χειριστή, κάποιες άλλες είναι αδύνατο να ελεγχθούν. Παρακάτω θα γίνει διαχωρισμός των σημαντικότερων μεταβλητών σε ελέγξιμες και ανεξέλεγκτες μεταβλητές.

2.4 ΑΝΕΞΕΛΕΓΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ

1. Ποιότητα του μετάλλου
2. Πάχος μετάλλου

Δυο μεταβλητές οι οποίες δεν μπορούν να ελεγχθούν είναι το είδος του μετάλλου και το πάχος του. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για διαφορετικά είδη και πάχος μετάλλου έχουμε διαφορετικά χαρακτηριστικά κοπής. Η ποιότητα του μετάλλου επίσης μπορεί να έχει μεγάλη επιρροή στην ποιότητα της κοπής.

2.5 ΕΛΕΓΞΗΜΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ

1. Η ταχύτητα κοπής
2. Η πίεση και η ταχύτητα ροής του αερίου
3. Η ένταση του ρεύματος
4. Το ύψος κοπής
5. Η τάση του τόξου
6. Η καθαρότητα του αερίου

1. **Η ταχύτητα κοπής** είναι μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους στην κοπή καθώς έχει άμεση επίδραση στην ποιότητα.

Επίσης η ταχύτητα κοπής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγωγικότητα άρα είναι μια μεταβλητή που χρειάζεται πολύ μεγάλη προσοχή καθώς αν μελετηθεί σωστά μπορεί να δώσει πολύ θετικά αποτελέσματα.

2. **Η Πίεση και η Ταχύτητα Ροής του αερίου.** Κάθε μπέκ είναι κατασκευασμένο να λειτουργεί με μια βέλτιστη ένταση ρεύματος σε συνδυασμό με μία δοσμένη πίεση/ροή αερίου. Αυξάνοντας την πίεση προκαλούμε μείωση της διάρκειας ζωής του ηλεκτροδίου. Το καταλαβαίνουμε από τη διάτρητη όψη του πυρήνα του ηλεκτροδίου, που αποτελείται από το δύστηκτο μέταλλο βολφράμιο. Αν δουλεύουμε με Άζωτο θα έχουμε πρόβλημα με την έναρξη του τόξου. Αν η τσιμπίδα δεν σκάει σπινθήρα σε συνθήκες υψηλής πίεσης, μπορεί να παρατηρηθεί πιλοτικό τόξο που έρχεται με διακοπές. Ενώ η υψηλή πίεση του αερίου συνήθως προκαλεί προβλήματα, η χαμηλή του ταχύτητα ροής προκαλεί το πρόβλημα του διπλού τόξου.
3. **Η ένταση του ρεύματος,** είναι μια μεταβλητή η οποία επηρεάζει άμεσα την κοπή καθώς από αυτήν εξαρτάται το πάχος του μετάλλου που μπορούμε να κατεργαστούμε. Επίσης η μεταβλητή αυτή είναι υπεύθυνη και για την διάρκεια ζωής των αναλωσίμων. Μεγαλύτερη ένταση συνεπάγεται μικρότερη διάρκεια ζωής.
4. **Το ύψος κοπής,** είναι μια μεταβλητή η οποία επηρεάζει τόσο το διάκενο που παράγεται κατά την κοπή όσο και την κωνικότητα της επιφάνειας της κοπής. Εδώ πρέπει να διευκρινίσουμε πως η φλόγα που βγαίνει από τον πυρσό έχει μορφή ανεστραμμένης φλόγας κεριού σε αυτό οφείλεται και μεγάλη επιρροή της στην κωνικότητα.

5. Η Τάση του Τόξου

Η τάση του τόξου δεν είναι ανεξάρτητη μεταβλητή. Εξαρτάται από:

- α. Την ένταση του ρεύματος
- β. Την διάμετρο του στομίου του μπέκ
- γ. Το ύψος κοπής
- δ. Την ταχύτητα ροής του αερίου
- ε. Την ταχύτητα κοπής
- στ. Το είδος του προς κατεργασία υλικού

6. Η Καθαρότητα του Αερίου

Η καθαρότητα του αερίου είναι θεμελιώδης παράγοντας για την καλή ποιότητα κοπής και τη μεγάλη διάρκεια ζωής των αναλωσίμων.

Ελάχιστες απαιτήσεις καθαρότητας του Αζώτου είναι το 99,995% και για το Οξυγόνο το 99,5%. Αν τα επίπεδα καθαρότητας είναι χαμηλότερα από τα ελάχιστα συνιστώμενα μπορούν αν συμβούν τα παρακάτω:

- Αδυναμία του τόξου να διεισδύσει σε λεπτά υλικά ανεξάρτητα από την ένταση του ρεύματος
- Αυξομειώσεις στην ποιότητα κοπής, ανάλογα με τον βαθμό μόλυνσης του αερίου.
- Εξαιρετικά μικρή διάρκεια ζωής του ηλεκτροδίου
- Όταν κόβουμε με Άζωτο (N_2), εμφάνιση ενός λεπτού μαύρου στρώματος καταλοίπων στο ηλεκτρόδιο και το στόμιο του μπέκ. Όσο μεγαλύτερη η μόλυνση, τόσο εντονότερο το στρώμα των καταλοίπων. Όταν το αέριο είναι καθαρό, το ηλεκτρόδιο και το εσωτερικό του μπέκ θα αποκτούν όψη σαν να έχουν περάσει από διαδικασία αμμοβολής.

2.6 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΟΠΗΣ

Χρήση υψηλής ποιότητας αναλώσιμων. Τα αναλώσιμα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από υλικά υψηλής ποιότητας. Πρέπει επίσης να είναι κατεργασμένα με πολύ μεγάλη προσοχή, χωρίς εγκοπές και ρινίσματα με την βέλτιστη δυνατή ποιότητα επιφανείας, ειδικά στην εσωτερική πλευρά του ηλεκτροδίου και του δακτυλίου περιδίνησης του αερίου κοπής.

Διαστάσεις και ανοχές είναι εξίσου σημαντικές. Η εκκεντρότητα (η ευθυγράμμιση μεταξύ ενός κοινού κέντρου) του ακροφυσίου και του ηλεκτροδίου είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για την επίτευξη καλής ποιότητας κοπής.

Η συναρμολόγηση επίσης του αυλού παίζει σημαντικό ρόλο. Τα ανταλλακτικά πρέπει να συνδένονται στον αυλό έτσι ώστε να επιτυγχάνεται σφιχτή συναρμογή και τέλεια ευθυγράμμιση. Με σωστή συναρμολόγηση επιτυγχάνεται καλή ηλεκτρική επαφή, καλή ροή αερίου και καλή ψύξη του αυλού.

Για κάθε δουλειά απαιτείται το σωστό μέγεθος αναλωσίμων το οποίο επιλέγεται μέσα από το ειδικό βιβλίο του κατασκευαστή. Η ένταση κοπής βασίζεται στο προς κοπή υλικό και στο μέγεθος του ακροφυσίου. Για να επιτύχουμε ταχύτητα και παραγωγικότητα, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το μεγαλύτερο μέγεθος ακροφυσίου και την υψηλότερη ένταση που το σύστημα μας μπορεί να χρησιμοποιήσει.

Για να πετύχουμε ακρίβεια στην κοπή, είναι απαραίτητο να κόβουμε με μικρές ταχύτητες, με μικρό μέγεθος ακροφυσίου και μικρή ένταση. Το αποτέλεσμα είναι μικρότερο διάκενο (kerf) και καλύτερη κοπή.

Το μέγεθος του ακροφυσίου στο αυλό εξαρτάται από την ένταση την οποία μπορεί να αντέξει. Για παράδειγμα, ένα ακροφύσιο διαμέτρου 0.059 in μπορεί να αντέξει ένταση 100 Amp, ενώ ένα διαμέτρου 0.250 in μπορεί να αντέξει ένταση 1000 Amp. Τα περισσότερα συστήματα πλάσμα έχουν προσαρμοζόμενη έξοδο για την ένταση. Προσοχή πρέπει να δοθεί διότι η ένταση δεν πρέπει να ξεπερνά το 95% της έντασης που μπορεί το ακροφύσιο και γενικότερα τα αναλώσιμα να αντέξουν έτσι ώστε να αποφύγουμε την υπερθέρμανση του που θα οδηγήσει σε πρόωρη φθορά.

2.7 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΕΡΙΩΝ ΚΟΠΗΣ

Ένα σημαντικό στοιχείο για την ποιότητα της κοπής είναι και η εκλογή του κατάλληλου αερίου κοπής.

Τα αέρια που απαιτούνται για τις περισσότερες περιπτώσεις είναι το αέριο έναυσης, το αέριο προστασίας και το αέριο κοπής. Σε μερικές περιπτώσεις απαιτείται και ένα επιπλέον αέριο προστασίας. Διαφορετικά αποτελέσματα παίρνουμε με διαφορετικούς συνδυασμούς Αζώτου, Οξυγόνου, αέρα και Η-35 (ένα μίγμα που αποτελείται από 35% Υδρογόνο και 65% Αργόν). Το Αργόν χρησιμοποιείται και για την χάραξη με τσιμπίδα πλάσματος. Οι μεταβλητές που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας όταν αποφασίζουμε τον συνδυασμό των αερίων που θα χρησιμοποιήσουμε είναι:

- Ο τύπος και το πάχος του υλικού
- Η επιθυμητή ποιότητα κοπής
- Η ταχύτητα και
- Το κόστος παραγωγής

Δεν είναι όλα τα αέρια κατάλληλα για όλες τις δουλειές και όλες τις τσιμπίδες. Επίσης το αέριο πρέπει να τηρεί τις παρακάτω προδιαγραφές:

- Να προσφέρει προστασία στο ηλεκτρόδιο έναντι της οξείδωσης,
- Να είναι ουδέτερο ως προς το κατεργαζόμενο υλικό.

Το πιο συνηθισμένο και φτηνό αέριο για την Κοπή και την Χάραξη με Πλάσμα είναι ο **Πεπιεσμένος Αέρας**. Δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα με τα περισσότερα μέταλλα σε πάχη μέχρι 25mm. Επειδή περιέχει οξυγόνο αφήνει την επιφάνεια κοπής οξειδωμένη. Ο πεπιεσμένος αέρας χρησιμοποιείται πολύ συχνά και για χάραξη με Πλάσμα του ανθρακούχου χάλυβα καθώς και για κοπή αλουμινίου.

Το Οξυγόνο χρησιμοποιείται στον ανθρακούχο χάλυβα πάχους μέχρι 60mm και μας δίνει επιφάνειες κοπής πολύ υψηλής ποιότητας. Με οξυγόνο δουλεύεται επίσης και ανοξείδωτο, όπως και το αλουμίνιο αλλά οι επιφάνειες κοπής είναι κάπως χαμηλότερης ποιότητας.

Όταν το υλικό μας έχει πάχος μεγαλύτερο, μέχρι 75mm, τότε χρειαζόμαστε συστήματα με ισχυρότερες πηγές, όπου χρησιμοποιούμε κυρίως το **Αζωτο**. Αυτό δίνει υψηλής ποιότητας επιφάνεια κοπής, χωρίς οξείδωση και κρέμαση (γρέζι).

Το ανοξείδωτο και το αλουμίνιο δουλεύονται συνήθως με μίγματα **Αργού-Υδρογόνου**, ειδικά όταν το υλικό είναι πάχους μεγαλύτερου από 75mm. Η ποιότητα κοπής είναι υψηλή. Τα μίγματα αυτά χρησιμοποιούνται επίσης και όταν θέλουμε να χαράξουμε μεγάλη ποικιλία μετάλλων.

3.ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ (ΜΕΘΟΔΟΣ TAGUCHI)

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Κάθε πείραμα μπορεί να προγραμματιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε τα συμπεράσματα που εξάγονται να είναι ασφαλή και να μας βοηθήσουν στην κατανόηση του φαινομένου που μελετάμε. Στα πειράματα που επιδιώκουμε να εξετάσουμε την συμπεριφορά ενός η περισσοτέρων μεγεθών σε συνάρτηση ενός η περισσοτέρων μεταβλητών, πρέπει να είμαστε προσεχτικοί στην επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιήσουμε. Ειδικά όταν τίθεται θέμα βελτιστοποίησης και βαθμού εξάρτησης των προς μελέτη μεταβλητών, αναζητούμε συμφέρουσες σε χρόνο και κόστος μεθόδους προγραμματισμού πειραμάτων, που διασφαλίζουν ταυτόχρονα την σωστή μελέτη του φαινομένου [20].

Τέτοιες μέθοδοι είναι οι εξής:

✓ Προσέγγιση δοκιμής – λάθους

Με την μέθοδο δοκιμής – λάθους, εκτελούμε πειράματα δοκιμών. Σε κάθε πείραμα μεταβάλλουμε και μετρούμε κατά περίπτωση τα προς μελέτη μεγέθη και καταγράφουμε την συμπεριφορά η και την εξάρτηση τους. Μετά από κάθε πείραμα παρατηρούμε και αναλύουμε τα αποτελέσματα έτσι ώστε να αποφασίσουμε πώς θα εκτελέσουμε το επόμενο πείραμα (δηλαδή ποια παράμετρος πρέπει να μεταβληθεί και πόσο), με το να απορρίψουμε η να δεχθούμε τις μεταβολές που έχουμε κάνει. Στόχος της μεθόδου είναι να κατανοήσουμε την επίδραση των μεταβλητών που εξετάζουμε στα μετρούμενα μεγέθη του πειράματος, δοκιμάζοντας ένα εύρος τιμών που καθορίζεται στην πορεία των πειραμάτων.

Όπως είναι κατανοητό, συνήθως χρειάζεται ένας μεγάλος αριθμός δοκιμών για να διασφαλίσουμε ότι κατανοούμε το προς μελέτη φαινόμενο.

✓ Σχεδιασμός πειραμάτων

Ο σχεδιασμός πειραμάτων είναι ένα μαθηματικά προγραμματισμένο σύνολο πειραμάτων, στο οποίο όλες οι παράμετροι που μελετάμε οργανώνονται πριν την εκτέλεση τους, για το λόγο αυτό έχουμε μια πολύ καλύτερη προσέγγιση για την συμπεριφορά των παραμέτρων. Θεωρητικά, ένα τέτοιο πλήρες σύνολο πειραμάτων οφείλει να δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Συνήθως όμως ο αριθμός των πειραμάτων και οι πόροι (υλικά και χρόνος) που απαιτούνται είναι απαγορευτικά μεγάλοι. Συχνά αποφασίζουμε να εκτελέσουμε ένα υποσύνολο του πλήρους συνόλου πειραμάτων για να εξοικονομήσουμε χρόνο και κόστος. Έτσι δεν διασφαλίζουμε ότι θα εξάγουμε σωστά συμπεράσματα. Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα σε εκείνες που απαιτείται βελτιστοποίηση κάποιων μεγεθών, η μέθοδος δεν δείχνει τις καλύτερες (βέλτιστες) τιμές των παραμέτρων. Προφανώς, μια τέτοια μέθοδος δεν είναι ενδεδειγμένη για να πραγματοποιήσουμε πειράματα ελέγχου η βελτιστοποίησης (εκτός από τον συντονισμό των διαφόρων οργάνων, των επιτροπών των ανθρώπων, του εξοπλισμού, των υλικών κ.λπ.).

✓ Μέθοδος TAGUCHI

Ο Δρ. Taguchi της Ιαπωνικής εταιρείας τηλεπικοινωνιών Nippon (Nippon telephones and telegraph Company) ανέπτυξε μια μέθοδο, η οποία πήρε το όνομα του, βασισμένη στα πειράματα 'ορθογώνιας σειράς' με την οποία μπορούμε να εντοπίσουμε την βέλτιστη τιμή και τον βαθμό επιρροής των μεταβλητών που εξετάζουμε. Οι 'ορθογώνιες σειρές' παρέχουν το ελάχιστο δυνατό σύνολο πειραμάτων ώστε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα και να βελτιστοποιήσουμε τις εξεταζόμενες μεταβλητές.

3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Η ορθολογική σχεδίαση και η βελτίωση προϊόντων και παραγωγικών διαδικασιών επιτυγχάνονται κυρίως μέσω του σχεδιασμού, της εκτέλεσης και της ανάλυσης των αποτελεσμάτων στατιστικών πειραμάτων (design experiments). Σκοπός των πειραμάτων είναι η επιβεβαίωση υποθέσεων ή η διερεύνηση σχέσεων μεταξύ διαφόρων παραμέτρων του εξεταζόμενου συστήματος. Ο πειραματισμός αποτελεί πάντοτε βασικό συστατικό στοιχείο της διαδικασίας ανάπτυξης νέων ή βελτίωσης υφιστάμενων προϊόντων και διαδικασιών. Όμως η αποτελεσματική σχεδίαση σύνθετων πειραμάτων και η επιστημονική ανάλυση των αποτελεσμάτων τους χρονολογούνται από τη δεκαετία του 1920, οπότε ο Sir Ronald Fisher ανέπτυξε και χρησιμοποίησε την ανάλυση της διακύμανσης για να μελετήσει την επίδραση χρήσης διαφόρων λιπασμάτων στην απόδοση γεωργικών καλλιεργειών. Οι σχετικές τεχνικές, που μελετήθηκαν και εξελίχθηκαν στη συνέχεια από πολλούς ερευνητές, όπως ο Douglas Montgomery, είναι γνωστές υπό τον γενικό όρο **Σχεδιασμός Πειραμάτων (Design of Experiments)** και αφορούν την ανάλυση των επιδράσεων μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών στη μέση τιμή μιας εξαρτημένης μεταβλητής [1].

Τα πειράματα γίνονται για να εξετάσουν τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος. Τα αποτελέσματα που αποτιμούνται από τα πειράματα είναι οι απαντήσεις και τα χαρακτηριστικά που κρίνονται χρήσιμα να συλλεχθούν. Ανάλογα με την αντικειμενικότητα των πειραμάτων αναλύονται κατάλληλα οι απαντήσεις. Οι παράγοντες είναι αυτοί που επηρεάζουν τα πειράματα. Δεν είναι εύκολο να προσδιοριστούν όλοι οι παράγοντες ενός πειράματος και να δώσουν σωστά αποτελέσματα, επειδή μπορεί να επηρεάζονται ποικίλα από το περιβάλλον [2].

Πολλές φορές χρειάζεται να γίνουν πειράματα για να δημιουργηθεί ή τροποποιηθεί ένα προϊόν, ή για να βελτιωθεί μία παραγωγική διαδικασία ή ένα σύστημα παραγωγής ή εφοδιασμού που δεν αποδίδουν, ή ακόμη για να αποκτηθούν ειδικές γνώσεις πάνω σε διαδικασίες και προϊόντα.

Ο στατιστικός πειραματικός σχεδιασμός, ή σχεδιασμός πειραμάτων, αποτελεί πανίσχυρη μέθοδο εκτέλεσης πειραμάτων μεγάλης απόδοσης με το μικρότερο δυνατό κόστος. Οι στόχοι της χρήσης του σχεδιασμού πειραμάτων (DOE) είναι να:

- Να προσδιοριστούν οι σημαντικότεροι παράγοντες(μεταβλητές)
- Να γίνουν αντιληπτές οι κύριες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων

- Μείωση των μεταβολών των σημαντικών παραγόντων (παραμέτρων) μέσω επανασχεδιασμού ή βελτιώσεων.
- Αύξηση των ανοχών μη σημαντικών παραγόντων, με ουσιαστικό αποτέλεσμα την μείωση του κόστους πειραματισμού.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος και της διαδικασίας παραγωγής του. Βελτίωση των αποτελεσμάτων της ποιότητας είναι πιθανή όταν επιτυγχάνεται υψηλό επίπεδο στην εκτέλεση της μεθόδου. Το υψηλό αυτό επίπεδο επιτυγχάνεται με την απόφαση των βέλτιστων συνδυασμών των παραγόντων.

Η σταθερότητα στην εκτέλεση επιτυγχάνεται κάνοντας το προϊόν/διαδικασία να μην επηρεάζεται από παράγοντες που δεν μπορούν να ελεγχθούν. Βέλτιστος σχεδιασμός επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας νόμους για τον σχεδιασμό πειραμάτων, και σταθερότητα στην εκτέλεση επιτυγχάνεται με την διεξαγωγή δοκιμαστικών πειραμάτων κάτω από την επιρροή των παραγόντων θορύβου.

Οι παράγοντες συμπεριλαμβάνονται στην μελέτη με σκοπό τον προσδιορισμό της επιρροής τους, ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος της απόδοσης του πειράματος.

Μπορούν να οριστούν ως:

- Σχεδιαστικοί παράμετροι που επηρεάζουν την εκτέλεση
- Είσοδοι που μπορούν να ελεγχθούν.

Τα επίπεδα είναι οι τιμές που ένας παράγοντας μπορεί να πάρει κατά την διάρκεια του πειράματος.

Ως παράγοντες θορύβου μπορούν να περιγραφούν οι παράγοντες οι οποίοι:

- Δεν μπορούν να ελεγχθούν
- Των οποίων η επιρροή δεν είναι γνωστή
- Οι οποίοι σκόπιμα δεν ελέγχονται.

Στην εργασία αυτή παράγοντες θορύβου αποτελούν η μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την εκτέλεση των πειραμάτων, η φθορά και ποιότητα των αναλωσίμων από κοπή σε κοπή και η μεταβολή της σύστασης της λαμαρίνας από σημείο σε σημείο.

Κάθε πείραμα συμπεριλαμβάνει διαδοχικές ενέργειες:

1. **Υπόθεση** (conjecture): η αρχική υπόθεση με την οποία θα ξεκινήσει το πείραμα.
2. **Πείραμα** (experiment): εκτελείται το τεστ ώστε να διερευνηθεί την υπόθεση.
3. **Ανάλυση** (analysis): στατιστική ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από το πείραμα.
4. **Συμπεράσματα** (conclusion): σύγκριση αποτελεσμάτων με αρχική υπόθεση πειράματος, απόφαση για το αν θα υπάρξει επαναλαμβανόμενη υπόθεση, νέο πείραμα και επανάληψη των τεσσάρων βημάτων.

Τα παραπάνω βήματα στηρίζονται στον κύκλο του Deming ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Κύκλος Deming.

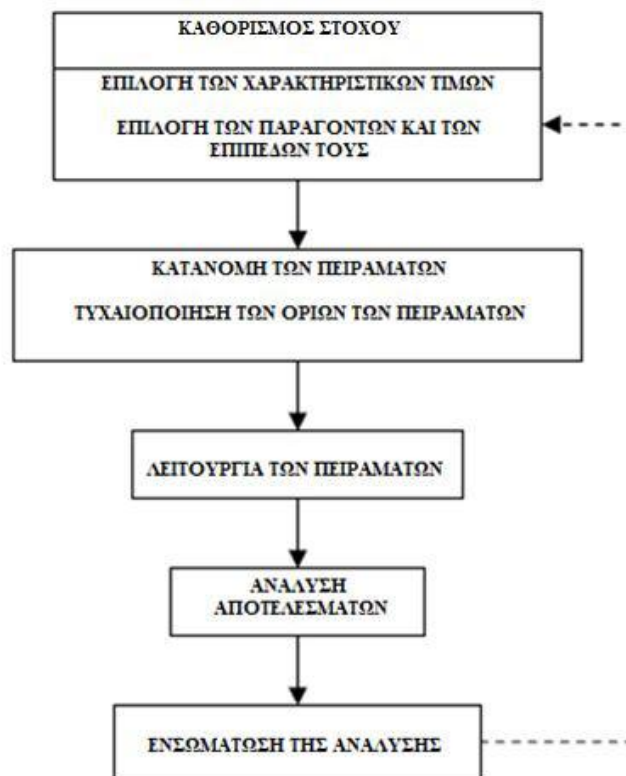
3.2.1 Σχεδιασμός Πειραμάτων- Design of Experiment

Ο σχεδιασμός πειραμάτων ορίζεται ως η συστηματική διαδικασία που πραγματοποιείται υπό ελεγχόμενες συνθήκες προκειμένου να ανακαλυφθεί μια άγνωστη επίδραση, για να εξετάσει ή να καθιερώσει μια υπόθεση, ή για να επεξηγήσει μία γνωστή επίδραση. Κατά την ανάλυση μιας διαδικασίας, τα πειράματα χρησιμοποιούνται συχνά για να αξιολογήσουν ποιες διαδικασίες εισαγωγής (input) έχουν σημαντικό αντίκτυπο στις διαδικασίες αποτελέσματος (output), και ποιο είναι το κατάλληλο επίπεδο των εισαγωγών ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τα πειράματα μπορούν να σχεδιαστούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους ώστε να συλλέξουν αυτές τις πληροφορίες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει τις δαπάνες των πειραμάτων με την επιτάχυνση της διαδικασίας σχεδιασμού, τη μείωση των πρόσφατων αλλαγών σχεδίου εφαρμοσμένης μηχανικής, και τη μείωση υλικών προϊόντων και πολύπλοκων εργασιών. Τα σχεδιασμένα πειράματα είναι επίσης ισχυρά εργαλεία για να επιτύχουν τη μείωση κόστους κατασκευής με την ελαχιστοποίηση της παραλλαγής της διαδικασίας και τη μείωση της επανάληψης, του σφάλματος, και της ανάγκης για την επιθεώρηση ελέγχου.

Γενικά οι στόχοι των πειραμάτων αναφέρονται παρακάτω:

1. υπολογισμός ή αποτίμηση χαρακτηριστικών τιμών, χωρίς να αναλυθούν στατιστικά,
2. αναγνώριση από το πείραμα των παραγόντων οι οποίοι είναι σημαντικοί στο αποτέλεσμα και προσδιορισμός της σημαντικότητας της επιρροής τους. Τα αποτελέσματα του πειράματος αναλύονται στατιστικά,
3. στατιστική αναγνώριση παραγόντων με μικρή επιρροή στο αποτέλεσμα,
4. απόφαση από τις τιμές των σημαντικών παραγόντων. Έτσι μπορεί να βρεθεί η βέλτιστη κατάσταση.

Η μεθοδολογία του Σχεδιασμού Πειραμάτων (Design of Experiment- DoE) καθορίζει την κατανομή και την μέθοδο των πειραμάτων έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αντικειμενικότητα. Ποικίλοι παράγοντες καθορίζονται με την ανάλυση πειραματικών δεδομένων. Η ανάπτυξη του DoE φαίνεται στο Σχήμα (3.2). Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται για αποτελεσματικά πειράματα και αναλύσεις αποτελεσμάτων. Η χαρακτηριστική αξία και οι παράγοντες του DoE ισοδυναμούν με την αντικειμενική λειτουργία και τις μεταβλητές του σχεδιασμού, αντίστοιχα [2].



Σχήμα 3.2: Γενική διαδικασία σχεδιασμού πειραμάτων.

Με την μέθοδο του Σχεδιασμού Πειραμάτων αποφεύγονται τα πολλά λάθη που γίνονται στις πειραματικές διαδικασίες. Οι πειραματικές συνθήκες στη μέθοδο αυτή είναι συστηματικά κατανεμημένες, τα πειράματα εκτελέσιμα και τα αποτελέσματα στατιστικά αναλυμένα. Γενικά χρειάζονται εξοπλισμός και πόροι για ένα πείραμα, επομένως είναι σημαντικό να εκτελείται ένας ελάχιστος αριθμός πειραμάτων και να αποκομίζονται οι μέγιστες πληροφορίες γεγονός το οποίο πετυχαίνει η μέθοδος DoE [3].

Υπάρχουν πολλές επιστημονικές ορολογίες μαθηματικές και στατιστικές για το DoE. Μερικές αναφέρονται στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί:

Πίνακας 3.1 Ορολογίες της μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων.

Ορολογίες στο DoE	Ορολογίες στο σχεδιασμό	Περιγραφή
ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ	ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	Πηγές που επηρεάζουν την χαρακτηριστική λειτουργία ή την αντικειμενική λειτουργία. Μπορούν να αλλάξουν για να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος.
ΕΠΙΠΕΔΟ	ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	Οι τιμές τις οποίες μπορούν να έχουν οι παράγοντες ή οι σχεδιασμένες μεταβλητές.
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	Τα αποτελέσματα του συστήματος, τα οποία μπορούν να ελαχιστοποιηθούν ή να μεγιστοποιηθούν.

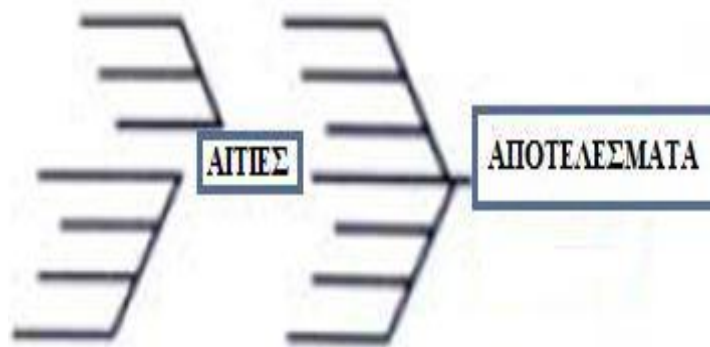
Στόχοι των πειραμάτων είναι να βρεθούν οι μεταβλητές που έχουν σημαντική επιρροή στο επιθυμητό αποτέλεσμα και οι κατάλληλες ρυθμίσεις αυτών των μεταβλητών ώστε το αποτέλεσμα να έχει μικρή μεταβλητότητα και οι «θορυβώδεις» (noisy) μεταβλητές να έχουν μικρή επιρροή. Υπάρχουν πολλές τεχνικές πειραμάτων που βασίζονται στη Σχεδίαση Πειραμάτων. Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται με τη χρήση στατιστικών πακέτων, αφού τα Σχεδιασμένα Πειράματα είναι ευρέως διαδεδομένα.

3.2.2 Βασικές έννοιες και διαδικασίες των σχεδιασμένων πειραμάτων με ένα παράδειγμα

Παρακάτω εξετάζεται το ακόλουθο διάγραμμα μιας διαδικασίας ψησίματος κέικ (Σχήμα 3.4). Υπάρχουν τρεις πτυχές της διαδικασίας που αναλύονται από ένα σχεδιασμένο πείραμα:

Παράγοντες, ή είσοδος (input) στη διαδικασία. Οι παράγοντες μπορούν να ταξινομηθούν είτε ως ελεγχόμενες είτε ως ανεξέλεγκτες μεταβλητές. Σε αυτήν την περίπτωση, οι ελέγξιμοι παράγοντες είναι τα συστατικά για το κέικ και ο φούρνος όπου ψήνεται μέσα το κέικ. Ο κατάλογος συστατικών είναι μικρός για αυτό το παράδειγμα, θα μπορούσαν να υπάρξουν πολλά άλλα συστατικά που έχουν σημαντική σχέση στο τελικό αποτέλεσμα (λάδι, νερό, αρωματική ουσία, κ.λπ.).

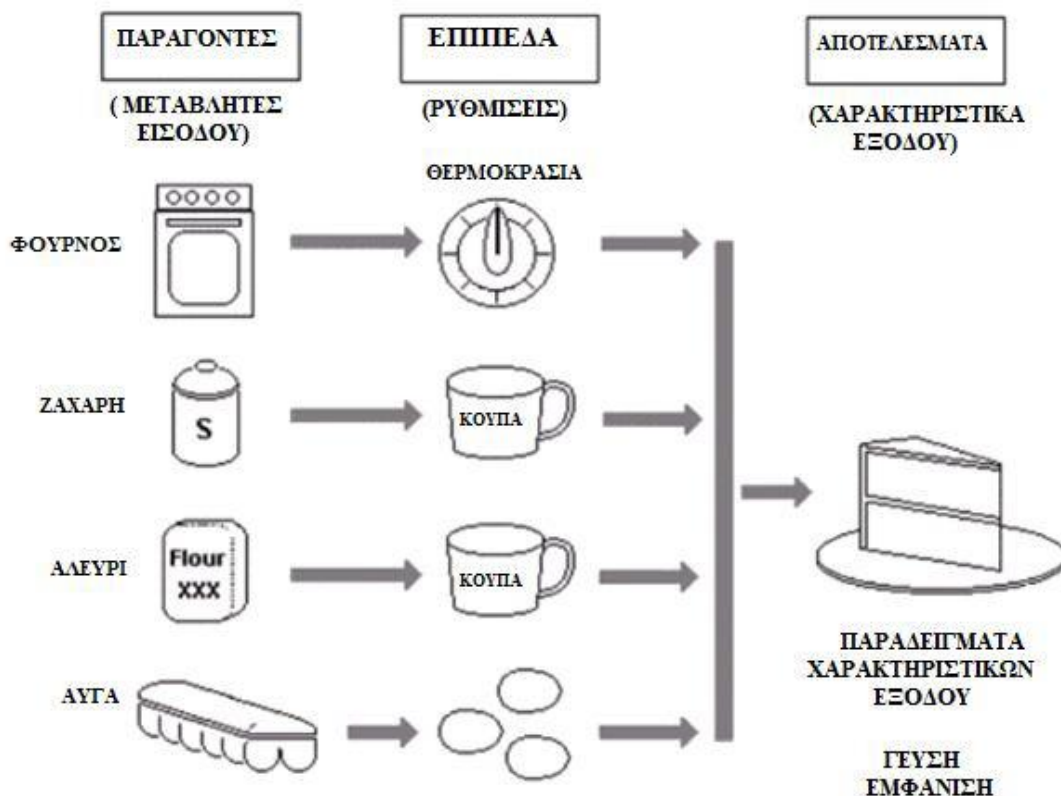
Επιπλέον, θα μπορούσαν να υπάρξουν άλλοι τύποι παραγόντων, όπως η μέθοδος ή τα εργαλεία μίξης, η ακολουθία μίξης, ή ακόμα και οι άνθρωποι που θα πάρουν μέρος στην διαδικασία παραγωγής. Οι άνθρωποι θεωρούνται γενικά παράγοντας θορύβου (noise factors), όπως όλοι οι παράγοντες οι οποίοι δεν είναι εύκολο να ελεγχθούν. Οι πιθανοί παράγοντες μπορούν να ταξινομηθούν χρησιμοποιώντας το διάγραμμα Αιτίου- Αποτελέσματος (Fishbone διάγραμμα).



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα Αιτίου- Αποτελέσματος

Επίπεδα κάθε παράγοντα. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν τη ρύθμιση θερμοκρασίας φούρνων και τα ποσά ζάχαρης, αλευριού, και αυγών.

Απάντηση (response), ή αποτελέσματα εξόδου (output) του πειράματος. Στην περίπτωση του ψησίματος κέικ, η γεύση και η εμφάνιση του κέικ είναι μετρήσιμα χαρακτηριστικά που επηρεάζονται ενδεχομένως από τους παράγοντες και τα αντίστοιχα επίπεδά τους.



Σχήμα3 .4: Παράδειγμα διαδικασίας Σχεδιασμού πειραμάτων.

Ο σχεδιασμός πειραμάτων έχει πολλές πιθανές χρήσεις στη βελτίωση των διαδικασιών και των προϊόντων που περιλαμβάνουν: Σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων.

Στην περίπτωση του παραδείγματος ψησίματος κέικ, μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα από δύο διαφορετικούς τύπους αλευριών. Εάν προκύψει ότι το αλεύρι από τους διαφορετικούς προμηθευτές δεν ήταν σημαντικός παράγοντας στην ποιότητα του κέικ, θα μπορούσε να επιλεγεί ο προμηθευτής με το χαμηλότερο κόστος. Εάν το αλεύρι ήταν σημαντικό, θα επιλεγόταν το καλύτερο αλεύρι.

Προσδιορισμός των σημαντικών παραγόντων (inputs) που έχουν επιπτώσεις σε μια παραγωγή (απάντηση). Επίτευξη βέλτιστης παραγωγικής διαδικασίας (απάντηση). «Ποιοι είναι οι απαραίτητοι παράγοντες, και ποια είναι τα επίπεδα εκείνων των παραγόντων, για να επιτύχουν την κατάλληλη γεύση και την εμφάνιση του κέικ σοκολάτας;» Μείωση της μεταβλητότητας. «Πόσο μπορεί η συνταγή να αλλάξει έτσι ώστε η επιτυχία του κέικ να είναι η ίδια;»

Ελαχιστοποίηση, μεγιστοποίηση, ή στοχοποίηση μιας παραγωγής (απάντηση). «Πώς μπορεί το κέικ να γίνει όσο το δυνατόν πιο αφράτο χωρίς να διαλυθεί;»

3.2.3 Στρατηγική των Πειραμάτων

Πειραματικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως στην έρευνα καθώς επίσης και στο βιομηχανικό περιβάλλον, εντούτοις, μερικές φορές έχουν διαφορετικούς σκοπούς.

Ο αρχικός στόχος στη επιστημονική έρευνα είναι συνήθως να παρουσιαστεί η στατιστική σημασία μιας επίδρασης που ασκεί ένας ιδιαίτερος παράγοντας σε μία μεταβλητή που ενδιαφέρει τους επιστήμονες να μελετηθεί και είναι εξαρτώμενη από αυτόν τον παράγοντα.

Στο βιομηχανικό περιβάλλον, συνήθως ο αρχικός στόχος είναι να εξαχθεί ο μέγιστος αριθμός αντικειμενικών πληροφοριών σχετικά με τους παράγοντες που έχουν επιπτώσεις σε μια παραγωγική διαδικασία, με τις λιγότερες (δαπανηρές) δυνατές παρατηρήσεις [4,5]. Ενώ στην επιστήμη οι τεχνικές ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) χρησιμοποιούνται για να αποκαλύψουν την επίδραση φυσικών φαινομένων στην πραγματικότητα, στο βιομηχανικό περιβάλλον οι αλληλεπιδράσεις υψηλής σημασίας, των παραγόντων θεωρούνται συχνά ως «ενόχληση» (συνήθως θεωρούνται μηδανιού ενδιαφέροντος, περιπλέκουν τη διαδικασία αναγνώρισης των σοβαρών παραγόντων).

Γενικότερα, η προσεκτική επιλογή δειγμάτων αυξάνει τις πιθανότητες να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες από τα δεδομένα. Το κρίσιμο σημείο είναι να αποφασιστεί ποιες μεταβλητές θα αλλαχτούν, τα διαστήματα- επίπεδα για αυτές τις αλλαγές και το σχέδιο των πειραματικών σημείων.

Το Σχεδιασμένο Πείραμα είναι μια στρατηγική που βοηθά στην τεκμηρίωση και στη συλλογή της εμπειρικής γνώσης. Δηλαδή γνώση βασισμένη στην ανάλυση των πειραματικών δεδομένων και όχι σε θεωρητικά πρότυπα. Μπορεί να εφαρμοστεί κατά την έρευνα ενός φαινομένου προκειμένου να επιτευχθεί η κατανόηση ή να βελτιωθεί η απόδοση αυτού του φαινομένου.

Η οικοδόμηση ενός Σχεδιασμένου Πειράματος σημαίνει προσεκτική επιλογή ενός μικρού αριθμού πειραμάτων που πρόκειται να εκτελεστούν υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Υπάρχουν τέσσερα βήματα στην οικοδόμηση ενός σχεδίου:

1. Καθορισμός του στόχου της έρευνας. Καλύτερη κατανόηση, οργάνωση των σημαντικών μεταβλητών, εύρεση των βέλτιστων όρων.
2. Καθορισμός των μεταβλητών που θα ελεγχθούν κατά τη διάρκεια του πειράματος (σχεδιασμένες μεταβλητές- design variables), καθώς και των επιπέδων που θα διακυμανθούν.
3. Καθορισμός των μεταβλητών που θα μετρηθούν για να περιγράψουν την έκβαση των πειραματικών διαδικασιών (μεταβλητές απάντησης- response variables), και να εξεταστεί η ακρίβειά τους.
4. Επιλογή μεταξύ των διαθέσιμων τυποποιημένων σχεδίων, αυτού που είναι συμβατό με το στόχο, τον αριθμό των σχεδιασμένων μεταβλητών και την ακρίβεια των μετρήσεων, με ένα λογικό κόστος.

Η διεξαγωγή πειραμάτων για τους μηχανικούς αποτελεί ένα φυσικό κομμάτι της δουλειάς τους. Στατιστικά, τεχνικές βασιζόμενες σε πειραματικό σχεδιασμό είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στον κόσμο των μηχανικών αφού βελτιώνουν την απόδοση της παραγωγικής διαδικασίας.

Έχουν επίσης επεκτείνει την εφαρμογή τους στην ανάπτυξη διαδικασιών νέων προϊόντων αλλά και στην πρόγνωση βλαβών στις διαδικασίες παραγωγής. Πολλές διαδικασίες μπορούν να περιγραφούν στα πλαίσια ποικίλων ελεγχόμενων μεταβλητών, όπως θερμοκρασίας, πίεσης και δύναμης τροφοδοσίας. Με τη χρήση των Σχεδιασμένων Πειραμάτων, οι μηχανικοί μπορούν να καθορίσουν ποια μεταβλητή, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας (πχ κατεργασία), έχει την μεγαλύτερη επιρροή στην απόδοση της διαδικασίας. Τα αποτελέσματα από τέτοια πειράματα περιγράφονται παρακάτω:

1. βελτίωση της διαδικασίας παραγωγής, κατεργασίας κ.α.
2. ελάττωση του παραγωγικού χρόνου,
3. μείωση του κόστους της διαδικασίας.

Τα Σχεδιασμένα Πειράματα συνήθως χρησιμοποιούνται διαδοχικά. Αυτό σημαίνει ότι, το πρώτο πείραμα για ένα πολύπλοκο σύστημα (πχ μία παραγωγική διαδικασία) το οποίο έχει πολλές ελεγχόμενες μεταβλητές, είναι συνήθως ένα αρχικό ή αναγνωριστικό πείραμα (screening experiment) σχεδιασμένο να προσδιορίζει ποιες μεταβλητές είναι πιο σημαντικές. Τα επόμενα πειράματα χρησιμοποιούνται για να αναλύσουν και να επεξεργαστούν αυτές τις πληροφορίες και να καθορίσουν ποιες ρυθμίσεις αυτών των κρίσιμων μεταβλητών είναι απαραίτητες για την βελτίωση της διαδικασίας. Τέλος, το επόμενο βήμα είναι να καθοριστούν τα επίπεδα των κρίσιμων μεταβλητών που έχουν ως αποτέλεσμα την καλύτερη διαδικασία κατεργασίας [3, 6].

3.2.4 Εφαρμογές για τις Σχεδιασμένες Πειραματικές Τεχνικές

Οι διαδικασίες έχουν πολλές και διαφορετικές μεταβλητές χωρίς να είναι όλες, απαραίτητα σημαντικές. Η αρχική λίστα των υποψήφιων μεταβλητών, που συμπεριλαμβάνονται στο πείραμα, κατασκευάζεται συνδυάζοντας τις γνώσεις και τις πληροφορίες για την διαδικασία από όλα τα μέλη της επιστημονικής ομάδας που θα διεκπεραιώσει το πείραμα.

Αυτή η λίστα μπορεί να συμπληρωθεί με την χρήση του διαγράμματος «προβληματισμού» (brainstorming diagram). Γενικά υπάρχουν μεταβλητές οι οποίες είναι ελεγχόμενες (π.χ βάθος κοπής και ταχύτητα κοπτικού εργαλείου κατά τη διάρκεια διάτρησης μεταλλικού αντικειμένου) και άλλες οι οποίες δεν γίνεται να ελεγχθούν (περιβαλλοντικοί παράγοντες). Συχνά οι παράγοντες που δεν μπορούν να ελεγχθούν καλούνται ως θορυβώδεις μεταβλητές (noisy factors). Οι μηχανικοί χρειάζεται να διακρίνουν ανάμεσα σε αυτές τις μεταβλητές, ελεγχόμενες ή μη, ποιες έχουν επιρροή στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Η διαδικασία που ακολουθείται καλείται ως αρχικό ή αναγνωριστικό πείραμα (screening experiment).

Το επόμενο βήμα είναι να ξεχωρίσουν τις μεταβλητές οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά και βελτιστοποιούν το αποτέλεσμα. Αυτή η διαδικασία καλείται πείραμα βελτιστοποίησης (optimization experiment). Στο παρακάτω Σχήμα (3.5) φαίνονται οι διαδικασίες.



Σχήμα 3.5: Πειραματικές Διαδικασίες.

Οι τεχνικές πειραμάτων επιλέγονται με βάση το πλήθος των παραγόντων που θα εξετασθούν για να ελεγχθεί η επιρροή τους στο αποτέλεσμα αλλά και με άλλα στοιχεία. Βασικές τεχνικές παρουσιάζονται ακολούθως:

Παραγοντικά Πειράματα (Full Factorial): είναι στατιστικά πειράματα που μελετούν αποτελέσματα λίγων (συνήθως μέχρι τεσσάρων- πέντε) σχεδιασμένων μεταβλητών ανεξάρτητων μεταξύ τους, συμπεριλαμβανομένων των αλληλεπιδράσεών τους. Σχεδιασμένες μεταβλητές είναι αυτές που μπορούν να ελεγχθούν κατά τη διάρκεια του πειράματος και μπορούν να ρυθμιστούν ανάμεσα σε κάποιο αριθμό επιπέδων. Τα παραγοντικά πειράματα είναι τα μοναδικά που μπορούν να υπολογίσουν και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μεταβλητών, οι οποίες σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι μεγάλες, με αποτέλεσμα αν δεν υπολογισθούν να καταλήξει το πείραμα σε λάθος συμπεράσματα.

Κλασματικά Πειράματα (Fractional Factorial): χρησιμοποιούνται όταν ο αριθμός των σχεδιασμένων μεταβλητών είναι μεγάλος και ο στόχος είναι να ανακαλυφθεί με μικρό αριθμό πειραμάτων ποιες μεταβλητές χρειάζεται να ερευνηθούν περεταίρω.



Σχήμα 3.6: Παραγοντικά και Κλασματικά πειράματα.

Παρακάτω θα εστιάσουμε σε πειράματα τα οποία συμπεριλαμβάνουν δύο ή τρεις παράγοντες οι οποίοι είναι σημαντικοί για τους επιστήμονες που θα εκτελέσουν το πείραμα. Ο σχεδιασμός παραγοντικών πειραμάτων (factorial experimental design) μπορεί να αποτελέσει μία δυναμική τεχνική γι' αυτού του είδους τα πειράματα. Είναι μία από τις πιο διαδεδομένες και πιο χρησιμοποιημένες τεχνικές του Σχεδιασμού Πειραμάτων. Γενικά, στα παραγοντικά πειράματα, οι πειραματικές δοκιμές εκτελούνται για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των επιπέδων των παραγόντων.

3.2.5 Στατιστικά πειράματα με έναν Παράγοντα

Ο πιο απλός τύπος στατιστικών πειραμάτων είναι εκείνος που εξετάζει την επίδραση ενός μόνο ελεγχόμενου παράγοντα (factor), και όχι σε παραπάνω παράγοντες όπως τα παραγοντικά, σε συγκεκριμένη μεταβλητή απόκρισης (response variable). Ο παράγοντας αυτός είναι είτε κάποια παράμετρος του προϊόντος, είτε κάποια παράμετρος της παραγωγικής διαδικασίας. Σε σπανιότερες περιπτώσεις, οι τιμές του παράγοντα μπορεί να εκφράζουν συνθήκες λειτουργίας ή χρήσης του προϊόντος (πχ θερμοκρασία περιβάλλοντος ή αποθήκευσης), οπότε δεν είναι πρακτικά ελεγχόμενες, αν και μπορεί να είναι ελεγχόμενες σε εργαστηριακές συνθήκες για τις ανάγκες του πειράματος. Η μεταβλητή απόκρισης είναι το χαρακτηριστικό, του οποίου οι τιμές ενδιαφέρουν τον ερευνητή.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων τέτοιων πειραμάτων γίνεται με την τεχνική της ανάλυσης διακύμανσης (Analysis of Variance- ANOVA) [1].

3.2.6 Στατιστικά πειράματα με πολλούς Παράγοντες

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές η κατανομή τιμών μιας τυχαίας μεταβλητής Y , η οποία εκφράζει το χαρακτηριστικό που ενδιαφέρει, εξαρτάται από δύο ή περισσότερους παράγοντες, οι οποίοι γενικά αλληλεπιδρούν. Κύρια επίδραση (main effect) ενός παράγοντα σε μία τυχαία μεταβλητή Y λέγεται η μεταβολή της τυχαίας μεταβλητής που οφείλεται σε αλλαγή της τιμής του παράγοντα, ενώ αλληλεπίδραση (interaction) μεταξύ παραγόντων υπάρχει όταν η μεταβολή της Y , μεταξύ δύο τιμών ενός παράγοντα, εξαρτάται από τα επίπεδα τιμών των άλλων παραγόντων.

Ο παραδοσιακός τρόπος διεξαγωγής πειραμάτων, που εξακολουθεί να εφαρμόζεται σε κάποιο βαθμό ακόμη και σήμερα, χαρακτηρίζεται από τη διαδοχική μεταβολή των τιμών των διαφόρων παραγόντων, διατηρώντας κάθε φορά όλους τους υπόλοιπους παράγοντες σταθερούς (one-factor-at-a-time experimentation).

Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι αδυνατεί να λάβει υπόψη και να προσδιορίσει τις πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων. Προκειμένου να εξεταστούν όχι μόνο οι κύριες επιδράσεις αλλά και οι αλληλεπιδράσεις, τα επίπεδα τιμών των διαφόρων παραγόντων είναι αναγκαίο να **μεταβάλλονται ταυτόχρονα και μάλιστα κατά οργανωμένο και με συγκεκριμένο τρόπο.**

Για να εξεταστούν όλες οι κύριες επιδράσεις και όλες οι δυνατές αλληλεπιδράσεις μεταξύ παραγόντων, ο πιο απλός και ακριβής τρόπος είναι να αναζητηθούν στοιχεία (τιμές της Y) για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς τιμών των παραγόντων που εξετάζονται. Τα πειράματα που σχεδιάζονται και εκτελούνται με αυτόν ακριβώς τον τρόπο λέγονται **παραγοντικά πειράματα (factorial experiments).**

Όταν οι παράγοντες είναι πολλοί και τα επίπεδα τιμών κάθε παράγοντα είναι επίσης πολλά, ο αριθμός των δυνατών συνδυασμών γίνεται απαγορευτικά μεγάλος από οικονομική άποψη. Χρησιμοποιούνται τότε τα **κλασματικά παραγοντικά πειράματα (fractional factorial experiments)** [3], που περιλαμβάνουν υποσύνολα του συνόλου των δυνατών συνδυασμών.

3.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI

Ο γενικός στόχος της μεθόδου Taguchi είναι να παραχθεί ένα προϊόν υψηλής ποιότητας με χαμηλό κόστος για τον κατασκευαστή. Ο Δρ Taguchi ανέπτυξε μια μέθοδο πειραματικής βελτιστοποίησης για να ερευνήσει πως οι διαφορετικές παράμετροι έχουν επιπτώσεις στο μέσο όρο και πως η μεταβολή ενός χαρακτηριστικού της διαδικασίας την επηρεάζει. Το πειραματικό σχέδιο που προτείνεται από τον Δρ Taguchi περιλαμβάνει την χρησιμοποίηση των ορθογώνιων σειρών για να οργανώσει τις παραμέτρους που επιδρούν στη διαδικασία και τα επίπεδα στα οποία πρέπει να κυμαίνονται. Αντί να εξετάζει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς, η μέθοδος Taguchi εξετάζει τα ζευγάρια των συνδυασμών. Αυτό επιτρέπει την συλλογή τόσων απαραίτητων στοιχείων όσων χρειάζονται για να καθορίσουμε ποιοι παράγοντες επηρεάζουν την μετρούμενη έξοδο και πόσο, με τους ελάχιστους δυνατούς πόρους. Η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιείται καλύτερα όταν υπάρχει ένας ενδιάμεσος αριθμός μεταβλητών (3 έως 50), λίγων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μεταβλητών, και όταν μόνο μερικές μεταβλητές συμβάλλουν σημαντικά στην μετρούμενη έξοδο.

Οι σειρές που χρησιμοποιούνται επιλέγονται από τον αριθμό των παραγόντων ελέγχου και τον αριθμό των επιπέδων τους. Η ανάλυση της διαφοράς των συλλεξάντων στοιχείων από τον προγραμματισμό της μεθόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αν επιλέξουμε νέες τιμές παραμέτρων για να βελτιστοποιήσουμε περαιτέρω τους παράγοντες ελέγχου. Τα στοιχεία από τις σειρές μπορούν να αναλυθούν με την χάραξη των στοιχείων και τη εκτέλεση μιας οπτικής ανάλυσης, για να εξεταστεί ο βαθμός επιρροής τους.

Η μέθοδος Taguchi είναι ένας επιστημονικός μηχανισμός που χρησιμοποιείτε για την βελτιστοποίηση προϊόντων, διαδικασιών, υλικών, των εξοπλισμών και εγκαταστάσεων.

Η μέθοδος στοχεύει στη βελτίωση των επιθυμητών χαρακτηριστικών και ταυτόχρονα την μείωση του αριθμού ατελειών μελετώντας τις μεταβλητές που ελέγχουν την διαδικασία. Η μέθοδος χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα της εφαρμοσμένης μηχανικής και περιλαμβάνει τις διαδικασίες σχεδιασμού η και κατασκευής πρώτων υλών, υποσυστημάτων, επαγγελματικών προϊόντων αλλά και την βελτιστοποίηση υπηρεσιών, συστημάτων ελέγχου κ.α.

3.3.1 ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI

Η φιλοσοφία της μεθόδου Taguchi είναι η εξής:

- ✓ Η ποιότητα πρέπει να επιτυγχάνεται με τον σχεδιασμό ενός προϊόντος και όχι να προκύπτει από αυτό. Αυτό διασφαλίζεται μέσω μίας συστηματικής διαδικασίας σχεδιασμού και ελέγχου της μορφής των παραμέτρων και των ανοχών του προϊόντος. Η ποιότητα που εξετάζεται σε ένα προϊόν σημαίνει ότι τα παραχθέντα προϊόντα που αποκλίνουν σημαντικά του αποδεκτού μέσου όρου, απλά απορρίπτονται.
- ✓ Η ποιότητα επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση της απόκλισης από έναν στόχο. Το προϊόν πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι ανεπηρέαστο από τους ανεξέλεγκτους εξωτερικούς παράγοντες. Με άλλα λόγια ο λόγος του σήματος (ποιότητα των προϊόντων) προς το θόρυβο (ανεξέλεγκτοι παράγοντες) πρέπει να είναι υψηλός.
- ✓ Το κόστος της ποιότητας πρέπει να ελέγχεται σαν συνάρτηση της απόκλισης από τα αποδεκτά πρότυπα που προκύπτουν από τον βέλτιστο σχεδιασμό με την εξίσωση απώλειας. Η χαμηλή ποιότητα με όφελος στο κόστος παραγωγής έχει επιπτώσεις στον αγοραστή του προϊόντος και άρα στην κοινωνία. Επειδή ο παραγωγός είναι επίσης μέλος της κοινωνίας και επειδή η δυσαρέσκεια των καταναλωτών θα αποθαρρύνει την μελλοντική εμπιστοσύνη στα προϊόντα του, αυτό το κόστος στον πελάτη και την κοινωνία θα επιστρέψει στον παραγωγό. Κατά τον Δρ Taguchi, βέλτιστο και ποιοτικό είναι ένα προϊόν του οποίου τα βασικά χαρακτηριστικά έχουν την ελάχιστη δυνατή επιρροή από εξωτερικούς, μη ελεγχόμενους παράγοντες.

3.3.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI

- **Πλεονεκτήματα**

Ένα κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου που αφορά τον σχεδιασμό προϊόντων, είναι ότι βελτιστοποιεί τα χαρακτηριστικά που επιλέγουμε και διαμορφώνει τα όρια των προδιαγραφών, βελτιώνοντας κατά συνέπεια την ποιότητα των προϊόντων.

Επιπλέον, όσον αφορά τον πειραματικό σχεδιασμό, η μέθοδος είναι απλή και εύκολο να εφαρμοστεί σε πολλά πεδία. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να συντομεύσει το χρόνο ενός ερευνητικού προγράμματος η για να προσδιορίσει τα προβλήματα σε μια διαδικασία παραγωγής. Είναι σημαντικό ότι η μέθοδος Taguchi επιτρέπει την ανάλυση πολλών διαφορετικών παραμέτρων χωρίς ένα απαγορευτικά υψηλό κόστος πειραμάτων.

Για παράδειγμα, μια διαδικασία με 8 μεταβλητές (παράγοντες), κάθε μία με 3 επίπεδα τιμών, θα απαιτούσε 6561 πειράματα για την εξέταση όλων των μεταβλητών.

Εντούτοις χρησιμοποιώντας τις ορθογώνιες σειρές, μόνο 18, 27, 36 κτλ πειράματα είναι απαραίτητα, ανάλογα με την ορθογώνια σειρά που επιλέγεται (L18,L27,L36, κτλ).

- **Μειονεκτήματα**

Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και δεν προσδιορίζουν ακριβώς πια παράμετρος έχει την υψηλότερη επίδραση στη μετρούμενη έξοδο. Η μέθοδος Taguchi έχει επικριθεί για την δυσκολία της να εντοπίσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων.

Ένας άλλος περιορισμός είναι ότι η μέθοδος είναι ακατάλληλη για την τη μελέτη δυναμικά μεταβαλλόμενων διαδικασιών. Επιπλέον, δεδομένου ότι η μέθοδος έχει σαν στόχο την βελτιστοποίηση από τον αρχικό σχεδιασμό του προϊόντος, κρίνεται μάλλον αναποτελεσματική όταν εφαρμόζεται στα τελευταία στάδια παραγωγής του προϊόντος. Έτσι θα πρέπει να εφαρμόζεται στα πρώτα στάδια της διαδικασίας.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΟΠΗΣ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ (ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI)

4.1 Πειραματική διαδικασία

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων αυτών η εργαλειομηχανή που χρησιμοποιήθηκε είναι η KF 2512 της εταιρείας KALTENBACH σε συνδυασμό με το σύστημα κοπής τόξου πλάσματος HYPERMAX HPR 260 της HYPERTHERM.



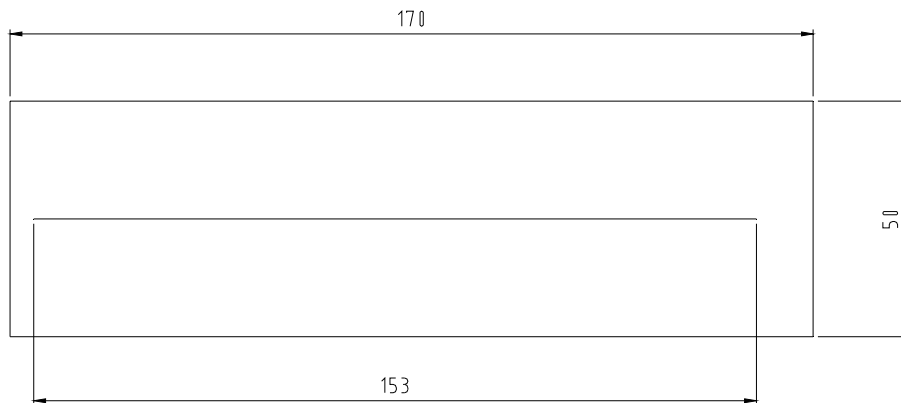
Εικόνα 4.1: Αριστερά μονάδα πλάσματος HPR 260, δεξιά CNC εργαλειομηχανή κατεργασίας φύλλων λαμαρίνα KF 2512.

Το σύστημα αυτό της hypertherm χρησιμοποιεί πυρσό ο οποίος έχει τη δυνατότητα χρήσης προστατευτικού αερίου (dual gas flow). Τα αναλώσιμα του συγκεκριμένου πυρσού φαίνονται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας. Επίσης η μηχανή διαθέτει αυτόματη προσαρμογή ύψους κοπής (torch height control) το οποίο για την διεξαγωγή των πειραμάτων απενεργοποιήθηκε. Η συγκεκριμένη εργαλειομηχανή έχει δυνατότητα κατεργασίας ελασμάτων από μαλακό χάλυβα αλλά και ανοξείδωτο χάλυβα πάχους από τρία χιλιοστά έως εξήντα. Στην περίπτωση μας ως αέριο κοπής χρησιμοποιήθηκε οξυγόνο και ως αέριο προστασίας βιομηχανικός αέρας. Το οξυγόνο που χρησιμοποιήθηκε είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές καθαρότητας 99,5%. Ένα σημαντικό στοιχείο που επίσης πρέπει να αναφερθεί είναι πως όλες οι κοπές έγιναν με περιδίνηση του αερίου κοπής ωρολογιακή.

Το υλικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι ο κοινός μαλακός χάλυβας κατασκευών (S 235) που χρησιμοποιείται σε μεγάλο ποσοστό στην κατασκευαστική βιομηχανία. Οι χημικές και μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου τύπου χάλυβα παρουσιάζονται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας. Το πάχος της λαμαρίνας που χρησιμοποιήθηκε είναι 15 χιλιοστά.

Όσον αφορά τον προγραμματισμό της εργαλειομηχανής πρέπει να αναφερθεί ότι έγινε μέσω του προγράμματος Lantek expert cam, πρόγραμμα που μας δίνει τον κώδικα που εισάγουμε στην εργαλειομηχανή.

Για όλα τα δοκίμια που κόπηκαν χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σχέδιο το οποίο κατασκευάστηκε στο πρόγραμμα AutoCAD. Αυτό έγινε ώστε να επιτύχουμε απολύτως συγκρίσιμα αποτελέσματα και δόθηκε μεγάλη σημασία στην σταθερότητα του τόξου για αυτό και το μήκος των δοκιμίων έγινε αρκετά μεγάλο. Επίσης για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια η τοποθέτηση των δοκιμίων στην λαμαρίνα έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε η κατεύθυνση κοπής να είναι πάντα ίδια και πιο συγκεκριμένα, με κίνηση μόνο του ενός άξονα.



Σχήμα 4.1: Σχέδιο δοκιμίου.

Στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας αυτής παρουσιάζεται ο κώδικας κοπής που χρησιμοποιήθηκε για την κοπή των δοκιμίων.

4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Στην έρευνα αυτή χρησιμοποιείται η μέθοδος του σχεδιασμού πειραμάτων (μέθοδος Taguchi) για την εκτίμηση της επιρροής της κάθε παραμέτρου στην ποιότητα της κοπής.

Ειδικότερα οι παράμετροι οι οποίοι θα ελεγχθούν είναι:

- A) Ταχύτητα κοπής (Cs)
- B) Ύψος κοπής (Ch)
- Γ) Ισχύς κοπής (Cp)
- Δ) Πίεση αερίου κοπής (Gp)

Οι παράμετροι αυτοί θα αποτελέσουν παρακάτω τους παράγοντες στην εφαρμογή του σχεδιασμού πειραμάτων.

Ο έλεγχος των παραμέτρων αυτών θα γίνει ελέγχοντας τα παρακάτω στοιχεία:

- Τον συντελεστή τραχύτητας (Ra/Rz)
- Την κωνικότητα της κοπής
- Την θερμικά επηρεασθείσα περιοχή (HAZ)

Αρχικά πριν την εφαρμογή της μεθόδου του σχεδιασμού πειραμάτων θα πρέπει να γίνουν κάποια αναγνωριστικά πειράματα (screening experiments) έτσι ώστε να εκλεγούν οι κατάλληλες συνθήκες για το πείραμα. Επίσης θα πρέπει να ερευνηθεί ξεχωριστά η επιρροή της κάθε παραμέτρου.

Για να εξασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα που θα πάρουμε θα είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις πραγματικές τιμές πρέπει η κάθε παράμετρος να ελεγχθεί ξεχωριστά. Αυτό συμβαίνει διότι ελέγχοντας τις παραμέτρους ξεχωριστά, η επιρροή τους στο τελικό αποτέλεσμα είναι πολύ πιο έντονη και είναι εύκολο να εντοπιστεί μέσα σε μικρό αριθμό πειραμάτων.

Για τον λόγο αυτό η πειραματική διαδικασία χωρίστηκε σε 4 φάσεις:

- Στην **1^η φάση** έγινε έλεγχος των παραμέτρων κοπής που αναφέρθηκαν παραπάνω με σκοπό την δημιουργία ενός πίνακα που θα περιέχει το εύρος των τιμών που μπορεί κάθε παράμετρος να πάρει ώστε να έχουμε κοπή.
- Στην **2^η φάση** έγινε έλεγχος των παρακάτω παραμέτρων κοπής:
 - α) Ταχύτητα κοπής (Cs)
 - β) Ύψος κοπής (Ch)
- Στην **3^η φάση** έγινε έλεγχος των παρακάτω παραμέτρων κοπής:
 - α) Ισχύς κοπής (Cp)
 - β) Πίεση αερίου κοπής (Gp)
- Στην **4^η φάση** ελέγχτηκαν συνδυαστικά όλοι οι παραπάνω παράμετροι χρησιμοποιώντας την μέθοδο του σχεδιασμού πειραμάτων. Η μέθοδος αυτή αποτελείται από επτά βήματα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:
 1. Προσδιορισμός των ποιοτικών χαρακτηριστικών και επιλογή των παραμέτρων που θα ελεγχθούν.
 2. Απόφαση του αριθμού των επιπέδων κάθε παραμέτρου και των πιθανών αλληλεξαρτήσεων τους, αν υπάρχουν.
 3. Επιλογή της κατάλληλης ορθογώνιας σειράς η κατασκευή της αν δεν ανήκει σε κάποια από τις τυποποιημένες.
 4. Συμπλήρωση του πίνακα και διεξαγωγή των πειραμάτων βάση της ορθογώνιας σειράς.
 5. Ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους ανάλυσης των μέσων (S/N) και ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA).
 6. Επιλογή των βέλτιστων επιπέδων των παραμέτρων.
 7. Επαλήθευση των βέλτιστων επιπέδων των παραμέτρων εκτελώντας το πείραμα επιβεβαίωσης.

4.3 1^Η ΦΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Στην πρώτη φάση έγινε έλεγχος των παραμέτρων κοπής που αναφέρονται παραπάνω έτσι ώστε να εκτιμηθούν τα όρια μέσα στα οποία πρέπει να κυμαίνονται οι τιμές των παραμέτρων.

Ο προσδιορισμός των τιμών των παραμέτρων γίνεται με την βοήθεια ενός πίνακα της αντίστοιχης εργαλειομηχανής που χρησιμοποιούμε. Ο πίνακας φαίνεται παρακάτω:

Cutting thickness	mm/min	Cutting kerf	Cutting power	Ignition height	Arc voltage	Cutting height	O2 Preflow	Air Preflow	O2 Cutflow	Air Cutflow
6mm	5250mm	1.8mm	200A	6.6mm	124V	3.3mm	24	65	69	28
8mm	4520mm	1.9mm	200A	6.8mm	130V	3.5mm	24	65	69	28
10mm	3460mm	2.2mm	200A	7.0mm	126V	3.7mm	24	65	69	28
12mm	3060mm	2.3mm	200A	7.2mm	128V	3.9mm	24	65	69	28
15mm	2275mm	2.7mm	200A	7.5mm	131V	4.1mm	24	65	69	28
20mm	1575mm	3.0mm	200A	8.2mm	133V	4.4mm	24	65	69	28
22mm	1360mm	3.6mm	200A	10.2mm	137V	4.7mm	24	65	69	28
25mm	1165mm	3.8mm	200A	10.2mm	143V	5.1mm	24	65	69	28
28mm	980mm	4.0mm	200A	10.2mm	144V	5.1mm	24	65	69	28
30mm	860mm	4.2mm	200A	10.2mm	145V	5.1mm	24	65	69	28
32mm	750mm	4.3mm	200A	10.2mm	145V	5.1mm	24	65	69	28
35mm	630mm	4.4mm	200A	10.2mm	148V	5.1mm	24	65	69	28

Εικόνα 4.2: Ρυθμίσεις CNC εργαλειομηχανής KF 2512.

Από τον πίνακα αυτό έχοντας ως δεδομένα το είδος του υλικού (μαλακός χάλυβας s235) και το πάχος του (15 mm) μπορούμε να δούμε όλες τις ρυθμίσεις που απαιτούνται για την κοπή του αντίστοιχου υλικού. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε πως στην διαδικασία που ακολουθεί παρακάτω ελέγχεται ένας παράγοντας κάθε φορά, έτσι όλες οι τιμές των παραμέτρων εκτός από αυτήν που ελέγχουμε διατηρούνται σταθερές και σύμφωνες με τον παραπάνω πίνακα.

A) Ταχύτητα κοπής (Cs)

Για την ταχύτητα κοπής στην περίπτωση μας η τιμή που παίρνουμε από τον πίνακα της εργαλειομηχανής είναι $Cs=2275$ mm/min.

Στην εργαλειομηχανή που χρησιμοποιήθηκε υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της ταχύτητας από 0% έως 120%. Έτσι οι τιμές που ελέγχθηκαν ήταν από 60% έως 120% ή αντίστοιχα από 1365mm/min έως 2730mm/min.

Έτσι για την ταχύτητα κοπής χρειάστηκαν 4 δοκίμια με τιμές 60%, 80%, 100% και 120% αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει δυνατότητα κοπής σε αυτό το εύρος των τιμών.

B) Ύψος κοπής (Ch)

Για το ύψος κοπής η τιμή που παίρνουμε από τον πίνακα είναι $Ch=4.1\text{mm}$. Οι τιμές που ελέγχθηκαν εδώ είναι 4.1, 6.1, 8.1, 10.1. Τα αποτελέσματα εδώ έδειξαν ότι υπάρχει δυνατότητα κοπής μόνο στις περιπτώσεις α, β, γ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για την περίπτωση δ το ύψος κοπής είναι αρκετά μεγάλο με αποτέλεσμα η έναρξη του πιλοτικού τόξου να είναι αδύνατη. Έτσι για το ύψος κοπής λόγω αυτού του περιορισμού το εύρος των τιμών κυμαίνεται από 4.1mm έως 8.1mm.

Γ) Ισχύς κοπής (Cp)

Για την ισχύ κοπής η τιμή που παίρνουμε από τον πίνακα είναι $Cp=200A$. Στην εργαλειομηχανή που χρησιμοποιήθηκε υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της έντασης από 0 έως 280A. Οι τιμές που επιλέχθηκαν να ελεγχθούν εδώ είναι 150, 180, 210, 240. Τα αποτελέσματα εδώ έδειξαν ότι υπάρχει δυνατότητα κοπής μόνο στις περιπτώσεις β, γ και δ. Στην περίπτωση α η ένταση είναι πολύ μικρή έτσι ώστε να αναπτυχθεί θερμότητα ικανή για την τήξη και απομάκρυνση του υλικού από την επιφάνεια της κοπής.

Δ) Πίεση αερίου κοπής (Gp)

Για την πίεση του αερίου κοπής η τιμή που παίρνουμε από τον αντίστοιχο πίνακα είναι $Gp=65\text{psi}$. Στην εργαλειομηχανή που χρησιμοποιήθηκε υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της πίεσης του αερίου κοπής από 0 έως 99 psi. Οι τιμές οι οποίες ελέγχθηκαν είναι 55, 70, 85, 99 psi. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει δυνατότητα κοπής στις περιπτώσεις β, γ και δ. Στην περίπτωση α η πίεση του αερίου κοπής είναι αρκετά χαμηλή με αποτέλεσμα η τήξη και αφαίρεση του υλικού από την δέσμη του πλάσματος είναι αδύνατη.

Με το τέλος των πειραμάτων αυτών έχει δημιουργηθεί μια πρώτη εικόνα για το εύρος των τιμών της κάθε παραμέτρου. Παρ' όλα αυτά για κάποιες παραμέτρους υπάρχουν τιμές οι οποίες δεν έχουν διευκρινιστεί. Η πρώτη είναι η ταχύτητα κοπής για την οποία δεν έχουμε το ανώτατο όριο. Παρά το γεγονός ότι εκτελέστηκε πείραμα με ταχύτητα 120% τιμή πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που μας παρέχει ο πίνακας η κοπή ήταν δυνατή. Αυτό δείχνει τον μεγάλο συντελεστή ασφαλείας που έχουν θέσει οι κατασκευαστές της εργαλειομηχανής. Δεύτερη είναι το ύψος κοπής όπου δεν έχει προσδιοριστεί το κατώτερο δυνατό ύψος κοπής. Για το λόγο αυτό θα γίνουν δύο ακόμα πειράματα χρησιμοποιώντας αυτή την φορά ρυθμίσεις από τον πίνακα για πάχος δοκιμίου $t=12\text{mm}$.

Αυτό το κάνουμε διότι για αυτό το πάχος μπορούμε να έχουμε μεγαλύτερες τιμές για την ταχύτητα κοπής και μικρότερες τιμές για το ύψος κοπής. Επίσης θα διεξαχθούν δύο ακόμα πειράματα ένα για την εύρεση της κατώτερης τιμής για την ισχύ κοπής και ένα για το κατώτερο όριο της πίεσης του αερίου κοπής.

Έπειτα από την εκτέλεση αυτών των συμπληρωματικών πειραμάτων όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την δημιουργία του πίνακα με το εύρος των τιμών της κάθε παραμέτρου είναι διαθέσιμες. Το αποτέλεσμα φαίνεται στον πίνακα (3.2) που ακολουθεί.

Στο στάδιο αυτό έχει γίνει μια πρώτη εκτίμηση για το ποιες τιμές των παραμέτρων θα αποτελέσουν παρακάτω τα αντίστοιχα επίπεδα στην εφαρμογή της μεθόδου του σχεδιασμού πειραμάτων (μέθοδος Taguchi).

Πίνακας 4.1: Εύρος τιμών για κάθε παράμετρο.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΟΠΗΣ	ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ	ΑΝΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ
Ταχύτητα κοπής (Cs)	1365mm/min	3365mm/min
Ύψος κοπής (Ch)	3.7mm	9.9mm
Ισχύς κοπής (Cp)	160A	280A
Πίεση αερίου κοπής (Gp)	60psi	99psi

4.4 2^Η ΦΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Στην φάση αυτή θα ερευνηθούν οι παράμετροι:

- α) Ταχύτητα κοπής (Cs)
- β) Ύψος κοπής (Ch)

Με την βοήθεια του πίνακα (4.1) που κατασκευάστηκε στην 1^η φάση της πειραματικής διαδικασίας επιλέγουμε τις κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους που θέλουμε να ελέγξουμε. Οι τιμές των παραμέτρων αλλά και όλες οι τιμές που πρέπει να ρυθμιστούν για την διεξαγωγή του πειράματος που ακολουθεί φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.2: Ρυθμίσεις πειραμάτων 2^{ης} φάσης.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	Π 1	Π 2	Π 3	Π 4	Π 5	Π 6	Π 7	ΜΟΝΑΔΕΣ
Ταχύτητα κοπής <i>Cutting speed</i>	3060	3060	3060	3060	1836	2448	3060	mm/min
Ένταση κοπής <i>Cutting power</i>	200	200	200	200	200	200	200	amp
Ύψος κοπής <i>Cutting height</i>	3,9	5,9	7,9	9,9	3,9	3,9	3,9	mm
Ύψος έναρξης τόξου <i>Ignition Height</i>	7,2	9,2	11,2	13,2	7,2	7,2	7,2	mm
Πίεση O ₂ προθέρμανσης <i>O₂ preflow</i>	24	24	24	24	24	24	24	psi
Αέρας προθέρμανσης <i>Air preflow</i>	65	65	65	65	65	65	65	psi
O ₂ κοπής <i>O₂ cutflow</i>	69	69	69	69	69	69	69	psi
Αέρας κοπής <i>Air cutflow</i>	28	28	28	28	28	28	28	psi

4.4.1 Διαδικασία κοπής δοκιμίων στην εργαλειομηχανή κοπής τόξου πλάσματος

Αφού ο πίνακας αυτός έχει κατασκευαστεί ακολουθεί μια διαδικασία η οποία είναι κοινή για όλες τις φάσεις του πειράματος. Η διαδικασία αυτή έχει ως εξής:

1. Φόρτωση της προς κατεργασία λαμαρίνας στην CNC εργαλειομηχανή.

2. Εισαγωγή του σχεδίου του δοκιμίου στο πρόγραμμα cam (lanteck expert). Επιλογή του αριθμού των τεμαχίων που θέλουμε να κόψουμε και τοποθέτηση τους στην λαμαρίνα (nesting). Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθούν κάποιες επιλογές που έγιναν όσον αφορά την τοποθέτηση και τον τρόπο κοπής των κομματιών με σκοπό την δημιουργία όσο το δυνατόν σταθερότερων συνθηκών κατεργασίας έτσι ώστε να πάρουμε εγκυρότερα αποτελέσματα.
 - A) Η τοποθέτηση των δοκιμίων έγινε χωρίς κοινό κόψιμο, το κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε έτσι ώστε να κοπεί ανεξάρτητα από τα άλλα.
 - B) Ο αριθμός των τεμαχίων επιλέχθηκε να είναι 10 παρά το γεγονός ότι τα πειράματα που έπρεπε να εκτελεστούν ήταν 7. Αυτό έγινε διότι πριν την έναρξη των πειραμάτων δύο από τα δοκίμια κόπηκαν με σκοπό την άνοδο της θερμοκρασίας της λαμαρίνας σε ένα μέσο όριο. Με άλλα λόγια αυτό έγινε για να μπορέσουμε να αποφύγουμε την μεγάλη μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ πρώτου και έβδομου δοκιμίου. Μέχρι στιγμή έχουμε σύνολο 9 τεμάχια ενώ το 10 θα κοπεί χρησιμοποιώντας τις ίδιες ρυθμίσεις με αυτό του πρώτου. Κάνοντας αυτό θα έχουμε εικόνα για το κατά πόσο πετύχαμε τον σκοπό μας ελέγχοντας αν η διαφορά των αποτελεσμάτων του πρώτου με του δέκατου είναι μέσα στα επιθυμητά όρια.
 - Γ) Η απόσταση των δοκιμίων για τον ίδιο λόγο που αναφέρθηκε παραπάνω επιλέχθηκε να είναι 50 χιλιοστά.
 - Δ) Μεταξύ δύο διαδοχικών κοπών αφέθηκε χρονικό περιθώριο 5 λεπτών ώστε η λαμαρίνα να επανέλθει στην επιθυμητή θερμοκρασία.

Έπειτα από την τοποθέτηση των δοκιμίων σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια έχουμε πλέον στα χέρια μας τον κώδικα που θα εισάγουμε στην εργαλειομηχανή.

3. Εισαγωγή του κώδικα στην CNC εργαλειομηχανή.
4. Σετάρισμα των εργαλείων, στην περίπτωση μας το μόνο που χρειάζεται είναι ένα τρυπάνι διαμέτρου 10 χιλιοστών. Αυτό χρησιμοποιείται κατά την έναρξη της κοπής και είναι ουσιαστικά το σημείο έναρξης του τόξου (Lead in).
5. Ρύθμιση των παραμέτρων κοπής. Σύμφωνα με τον πίνακα που κατασκευάσαμε παραπάνω και με μεγάλη προσοχή ρυθμίζουμε τις παραμέτρους για κάθε ένα από τα πειράματα που έχουμε να εκτελέσουμε.
6. Κοπή των δοκιμίων σύμφωνα με την σειρά του πίνακα.
7. Συλλογή και μαρκάρισμα των δοκιμίων.
8. Αποθήκευση των δοκιμίων για την μετέπειτα επεξεργασία.



Εικόνα 4.3: Φωτογραφία των δοκιμίων μετά το τέλος της κατεργασίας κοπής.

Το επόμενο βήμα είναι να χωρίσουμε τα δοκίμια σε 3 μέρη έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα μετρήσεων για την τραχύτητα, την κωνικότητα και την θερμικά επηρεασθείσα περιοχή.

Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε πριονοκορδέλα με ρυθμίσεις πολύ χαμηλής πρόωσης και μεγάλης παροχής ψυκτικού υγρού έτσι ώστε να μην υπάρχει καμία περίπτωση περαιτέρω θέρμανσης των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής φαίνονται στην εικόνα παρακάτω (4.4).



Εικόνα 4.4: Διάρθρωση δοκιμίων σε 3 μέρη

Τα δύο από τα τρία μέρη θα χρησιμοποιηθούν το ένα για την μέτρηση της τραχύτητας και το άλλο για την μέτρηση της κωνικότητας και της θερμικά επηρεασθείσας περιοχής. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως ο πυρσός της συγκεκριμένης εργαλειομηχανής χρησιμοποιεί δακτύλιο περιδίνησης αερίου ωρολογιακής φοράς.

Αυτό σημαίνει ότι η καλή πλευρά είναι η δεξιά με σεβασμό στην κατεύθυνση κίνησης του πυρσού.

Άρα απαιτείται προσοχή κατά την επιλογή της πλευράς στην οποία θα γίνουν οι μετρήσεις τραχύτητας. Τα μέρη αυτά φαίνονται στην εικόνα (4.5) που ακολουθεί.



Εικόνα 4.5: (Αριστερά) τμήμα του δοκιμίου το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για μέτρηση τραχύτητας. (Δεξιά) τμήμα το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για μέτρηση κωνικότητας και HAZ.

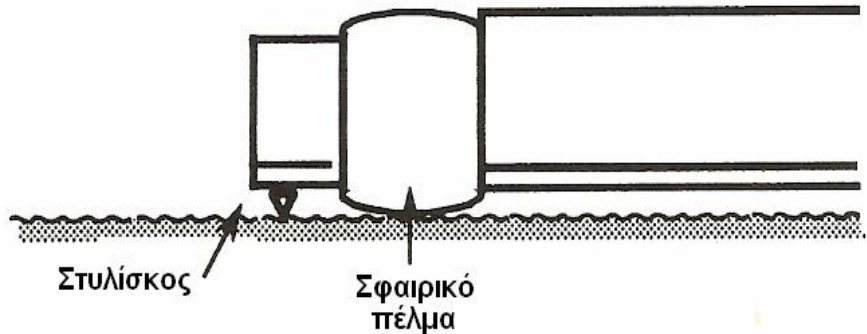
4.4.2 Μετρήσεις τραχύτητας

Οι μετρήσεις τραχύτητας έγιναν με ηλεκτρομηχανικό τραχύμετρο τύπου στυλίσκου της εταιρίας mitutoyo (surftest SJ-400). Το τραχύμετρο αυτό έχει δυνατότητα μέτρησης 36 διαφορετικών παραμέτρων τραχύτητας σύμφωνα με τα πρότυπα ISO, DIN, ANSI και JIS (1994/1982).



Εικόνα 4.6: Μέτρηση τραχύτητας δοκιμίων

Με το όργανο αυτό είχαμε δυνατότητα μέτρησης των πιο κύριων παραμέτρων που περιγράφουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας. Η λειτουργία της συσκευής αυτής βασίζεται στην κοινή αρχή λειτουργίας όλων των ηλεκτρομηχανικών τραχύμετρων που είναι η ιχνηλάτηση των ανωμαλιών της επιφάνειας από το στυλίσκο. Στη συνέχεια, το μετακινούμενο στέλεχος του, μεταφέρει τις κατακόρυφες κινήσεις του στυλίσκου σε ένα αναλογικό όργανο, όπου καταγράφεται η κατατομή και υπολογίζονται, μέσω ενσωματωμένου αλγορίθμου, τα κύρια μέτρα τραχύτητας.



Εικόνα 4.7: Μετακινούμενο στέλεχος (αισθητήρας).

Το τραχύμετρο είναι εφοδιασμένο με αδαμάντινη ακίδα προσαρμοσμένη στο βραχίονα μορφοτροπέα που μετακινείται από τη μονάδα εγκάρσιας κίνησης και το σήμα περνώντας από αναλογικό ενισχυτή/ καταγραφέα ενισχύεται και καταγράφεται. Χαρακτηριστικό των οργάνων τύπου στυλίσκου είναι η πολύ μικρή δύναμη, με την οποία πιέζεται η ακίδα επάνω στη μετρούμενη επιφάνεια. (1 mN), ώστε να αποφεύγεται κατά το δυνατόν η χάραξη της επιφάνειας, άρα και η αλλοίωση των μετρούμενων μεγεθών. Στην πραγματικότητα, η αδαμάντινη ακίδα (Εικόνα 4.7) χαράσσει την επιφάνεια, αλλά σε τόσο μικρό βάθος, ώστε η επίδρασή της να θεωρείται αμελητέα. Σε απόσταση από την ακίδα, υπάρχει ένα «στοιχείο αντίληψης» που κατά τη μέτρηση ολισθαίνει επάνω στη μετρούμενη επιφάνεια.

Η μονάδα εγκάρσιας κίνησης μετακινεί ηλεκτρικά το στοιχείο αντίληψης με σταθερή ταχύτητα κατά μήκος της επιφάνειας του δοκιμίου. Το μήκος διαδρομής της ακίδας μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τον επιλεγόμενο συνδυασμό μήκους ολοκλήρωσης (cut-off) και οριζόντιας μεγέθυνσης V_h .

Επιλέχθηκαν δύο από τους πιο σημαντικούς οι οποίοι είναι το R_a και το R_z .

A) Μέση αριθμητική τραχύτητα R_a

Ως μέση αριθμητική τραχύτητα (R_a) ορίζεται το μέτρο της τραχύτητας που δίνεται από την σχέση:

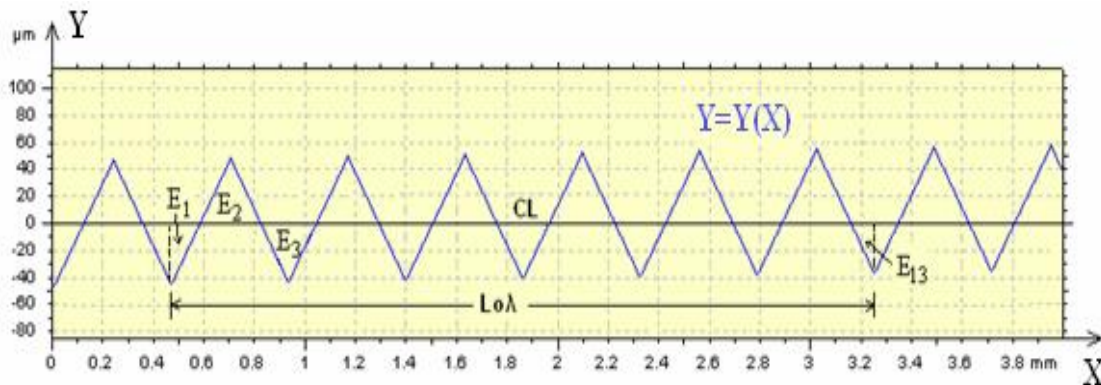
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx$$

Παριστάνει τη μέση τιμή των αποκλίσεων όλων των σημείων της πραγματικής κατατομής από την κεντρική γραμμή, στο δεδομένο μήκος δειγματοληψίας.

Η τραχύτητα R_a είναι η πλέον διαδεδομένη, διότι ο προσδιορισμός της κεντρικής γραμμής γίνεται αυτόματα από τα ηλεκτρικά όργανα μέτρησης (τραχύμετρα) και, κατά συνέπεια, η διαδικασία προσδιορισμού της είναι ταχύτατη.

Ειδικά για απλές γεωμετρικές κατατομές, η παραπάνω σχέση μπορεί να απλουστευθεί ως άθροισμα των εμβαδών όλων των διακριτών «απλού σχήματος» ανωμαλιών που εμπεριέχονται στο μήκος δειγματοληψίας.

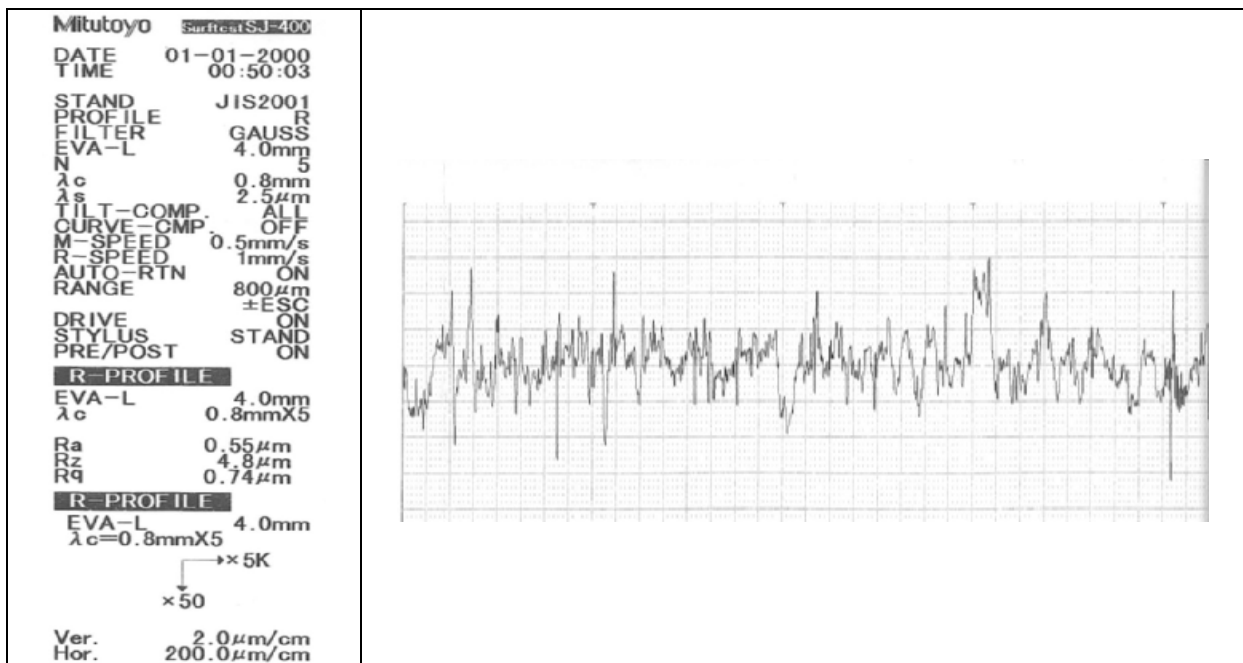
$$R_a = \frac{E_{o\lambda}}{L_{o\lambda}} = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_{13}}{L_{o\lambda}}$$



Σχήμα 4.2: Υπολογισμός της R_a απλής γεωμετρικής κατατομής.

B) R_z

Ύψος δέκα σημείων, ή μέση υψομετρική διαφορά μεταξύ των πέντε υψηλότερων κορυφών και των πέντε χαμηλότερων κοιλάδων.



Εικόνα 4.8: Αποτελέσματα μέτρησης τραχύτητας στο τραχύμετρο Mitutoyo.

Όπως φαίνεται και παρακάτω για να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στην μέτρηση της τραχύτητας, σε κάθε δοκίμιο έγιναν 5 μετρήσεις σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους.

4.4.3 Αποτελέσματα μέτρησης τραχύτητας για την 2^η φάση του πειράματος

Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας όπου φαίνονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα μέτρησης του συντελεστή τραχύτητας Ra και Rz για την 2^η φάση του πειράματος. Για κάθε ένα από τα δοκίμια πάρθηκαν 5 μετρήσεις και υπολογίστηκε ο μέσος όρος για το κάθε ένα έτσι ώστε να πετύχουμε την καλύτερη δυνατή ακρίβεια. Στον τελευταίο πίνακα φαίνονται οι ρυθμίσεις που έγιναν για τα δοκίμια αυτά.

Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτικός πίνακας μέτρησης Ra.

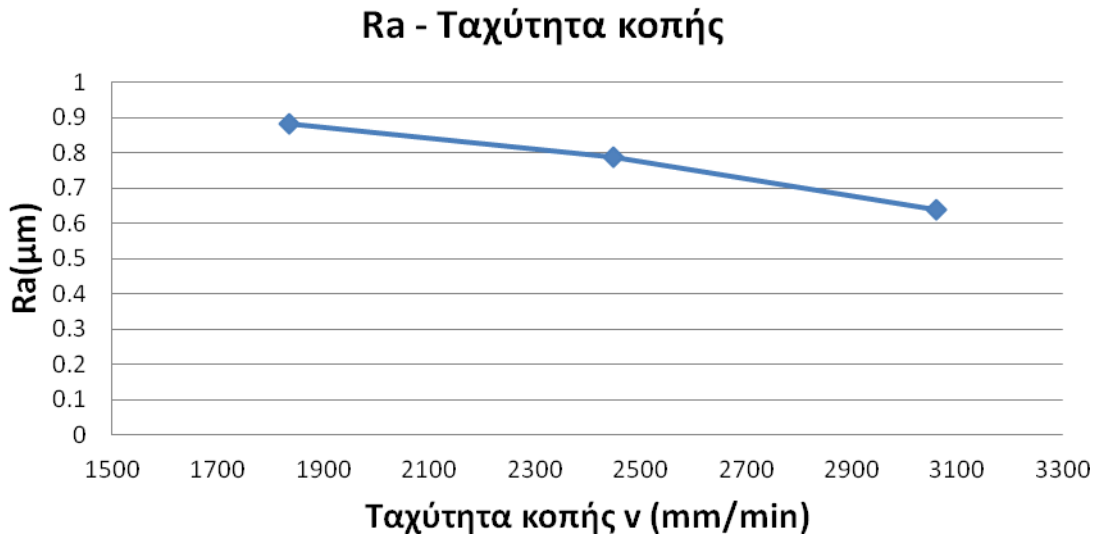
Ra(μm)	Δοκίμιο 1	Δοκίμιο 2	Δοκίμιο 3	Δοκίμιο 4	Δοκίμιο 5	Δοκίμιο 6	Δοκίμιο 7
Σημείο 1	0,55	0,84	1,3	1,23	0,83	0,7	0,73
Σημείο 2	0,56	0,61	1,08	1,47	0,88	0,72	0,58
Σημείο 3	0,68	0,9	0,94	1,12	0,71	0,86	0,56
Σημείο 4	0,71	0,81	1,1	1,37	1,12	0,84	0,62
Σημείο 5	0,66	0,7	0,95	1,39	0,87	0,81	0,7
M.O Ra	0,632	0,772	1,074	1,316	0,882	0,786	0,638

Πίνακας 4.4: Συγκεντρωτικός πίνακας μέτρησης Rz.

Rz(μm)	Δοκίμιο 1	Δοκίμιο 2	Δοκίμιο 3	Δοκίμιο 4	Δοκίμιο 5	Δοκίμιο 6	Δοκίμιο 7
Σημείο 1	4,9	6	7,5	8,9	8,2	6,6	5,2
Σημείο 2	4,5	4,8	7	9,8	7,8	5,8	5,2
Σημείο 3	5,3	5,9	7,4	8,4	6,7	8,2	5,2
Σημείο 4	6,3	5,8	6,5	8,9	9,7	6,4	5,2
Σημείο 5	5,8	5,2	7,6	9,5	8,2	8,8	5,3
M.O Rz	5,36	5,54	7,2	9,1	8,12	7,16	5,22

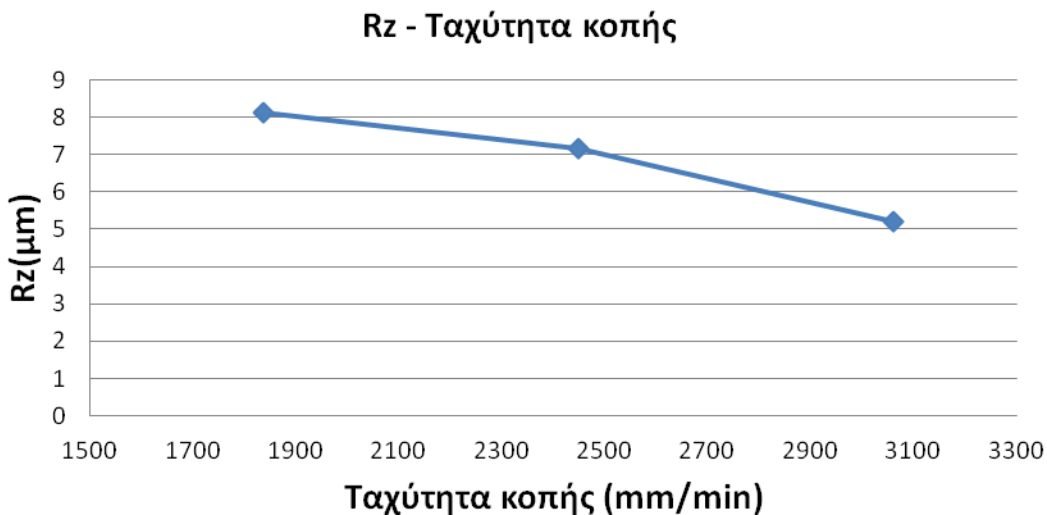
Βάση των αποτελεσμάτων αυτών κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα που ακολουθούν, τα οποία θα μας δώσουν πληροφορίες για το πως η κάθε μεταβλητή (παράγοντας) επηρεάζει την επιφανειακή τραχύτητα του δοκιμίου.

4.4.4 Διαγράμματα 2^{ης} φάσης



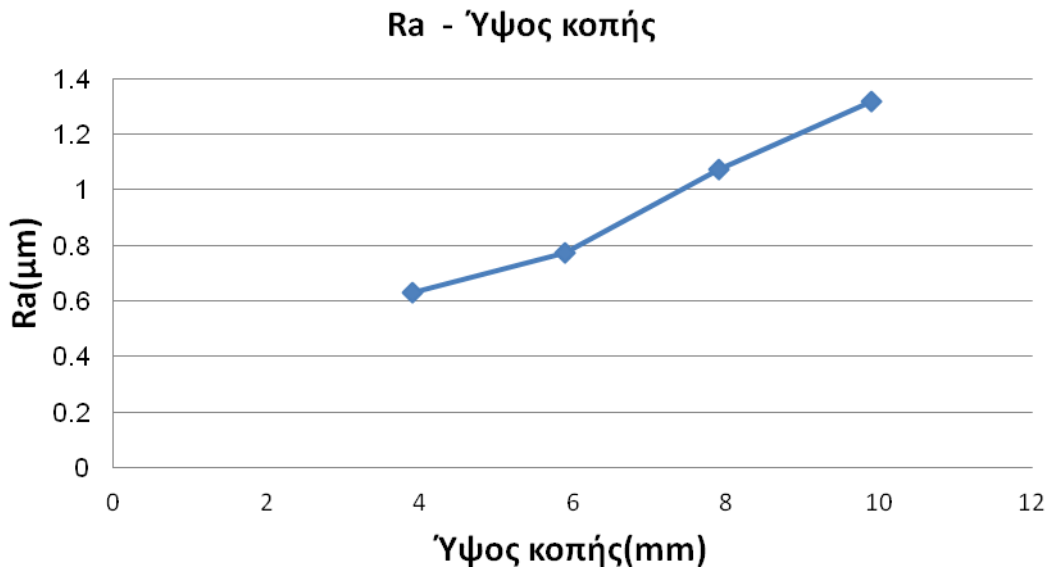
Γράφημα 4.1: Διάγραμμα συντελεστή τραχύτητας (Ra) σε σχέση με την ταχύτητα κοπής.

Σύμφωνα με το γράφημα αυτό με την αύξηση της ταχύτητας κοπής και διατηρώντας τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές έχουμε μείωση του συντελεστή τραχύτητας Ra. Το γράφημα αυτό ποιοτικά έρχεται σε συμφωνία με αντίστοιχο γράφημα παρόμοιας διαδικασίας διαφορετικού υλικού (αλουμινίου) [15].



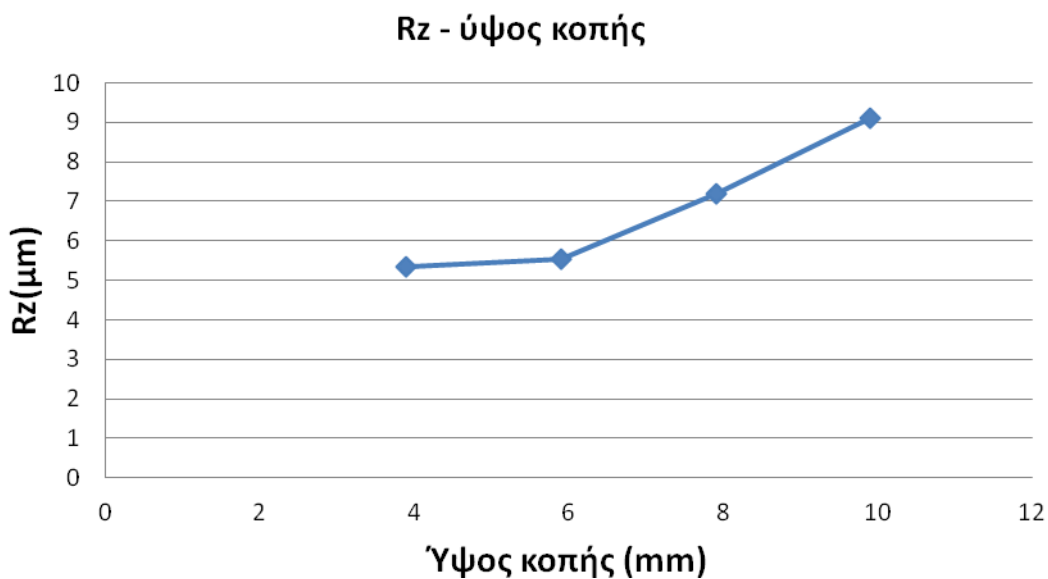
Γράφημα 4.2: Διάγραμμα συντελεστή τραχύτητας (Rz) σε σχέση με την ταχύτητα κοπής.

Από το γράφημα αυτό συμπεραίνουμε ότι αύξηση της ταχύτητας κοπής συνεπάγεται μείωση του συντελεστή τραχύτητας Rz όπως και παραπάνω για το Ra.



Γράφημα 4.3: Διάγραμμα συντελεστή τραχύτητας (Ra) σε σχέση με το ύψος κοπής.

Από το παραπάνω γράφημα μπορούμε να δούμε πως με την αύξηση του ύψους κοπής και διατηρώντας τις άλλες μεταβλητές σταθερές ο συντελεστής τραχύτητας Ra αυξάνεται.



Γράφημα 4.4: Διάγραμμα συντελεστή τραχύτητας (Rz) σε σχέση με το ύψος κοπής.

Από το γράφημα αυτό συμπεραίνουμε ότι αύξηση του ύψους κοπής συνεπάγεται αύξηση και του συντελεστή τραχύτητας Rz.

4.5 3^η ΦΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Στην φάση αυτή θα ερευνηθούν οι παράμετροι:

- A) Ισχύς κοπής (Cp)
- B) Πίεση αερίου κοπής (Gp)

Με την βοήθεια του πίνακα (4.1) που κατασκευάστηκε στην 1^η φάση της πειραματικής διαδικασίας επιλέγουμε τις κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους που θέλουμε να ελέγξουμε. Οι τιμές των παραμέτρων αλλά και όλες οι τιμές που πρέπει να ρυθμιστούν για την διεξαγωγή του πειράματος που ακολουθεί φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.5: Ρυθμίσεις πειραμάτων 3^{ης} φάσης.

ΠΕΙΡΑΜΑ	Π 1	Π 2	Π 3	Π 4	Π 5	Π 6	
Ταχύτητα κοπής <i>Cutting speed</i>	2275	2275	2275	2275	2275	2275	mm/min
Ένταση κοπής <i>Cutting power</i>	180	200	220	220	220	220	Amp
Ύψος κοπής <i>Cutting height</i>	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	mm
Ύψος έναρξης <i>Ignition height</i>	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	mm
Πίεση O ₂ προθέρμανσης <i>O2 preflow</i>	24	24	24	24	24	24	psi
Πίεση αέρα προθέρμανσης <i>Air preflow</i>	65	65	65	65	65	65	psi
Πίεση O ₂ κοπής <i>O2 cutflow</i>	69	69	69	60	70	80	psi
Πίεση αέρα κοπής <i>Air cutflow</i>	28	28	28	28	28	28	psi

Αφού ο πίνακας αυτός έχει κατασκευαστεί ακολουθεί η ίδια διαδικασία όπως και στην 2^η φάση του πειράματος.

4.5.1 Αποτελέσματα μέτρησης τραχύτητας για την 3^η φάση του πειράματος

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα συντελεστή τραχύτητας Ra.

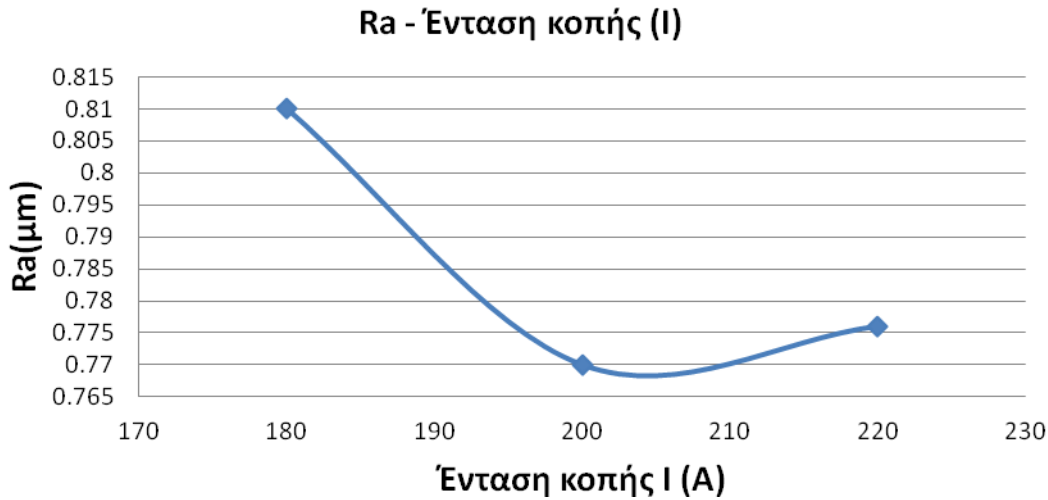
Ra(μm)	Δοκίμιο 1	Δοκίμιο 2	Δοκίμιο 3	Δοκίμιο 4	Δοκίμιο 5	Δοκίμιο 6
Σημείο 1	0,82	0,7	0,83	1	0,75	0,84
Σημείο 2	0,84	0,82	0,83	1,16	0,79	0,76
Σημείο 3	0,8	0,78	0,61	0,88	0,78	0,79
Σημείο 4	0,8	0,8	0,79	0,85	0,79	0,8
Σημείο 5	0,79	0,75	0,82	0,93	0,88	0,74
M.O Ra	0,81	0,77	0,776	0,964	0,798	0,786

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα συντελεστή τραχύτητας Rz.

Rz(μm)	Δοκίμιο 1	Δοκίμιο 2	Δοκίμιο 3	Δοκίμιο 4	Δοκίμιο 5	Δοκίμιο 6
Σημείο 1	5,3	4,8	6,3	7,2	5,9	6,7
Σημείο 2	5,2	5,2	5,8	8,2	6,7	5,1
Σημείο 3	5,9	5,9	4,7	7,1	5,6	5,1
Σημείο 4	5,7	6,1	6,1	6,8	5,9	4,9
Σημείο 5	5,2	4,8	6,4	6,9	6,8	4,6
M.O Rz	5,46	5,36	5,86	7,24	6,18	5,28

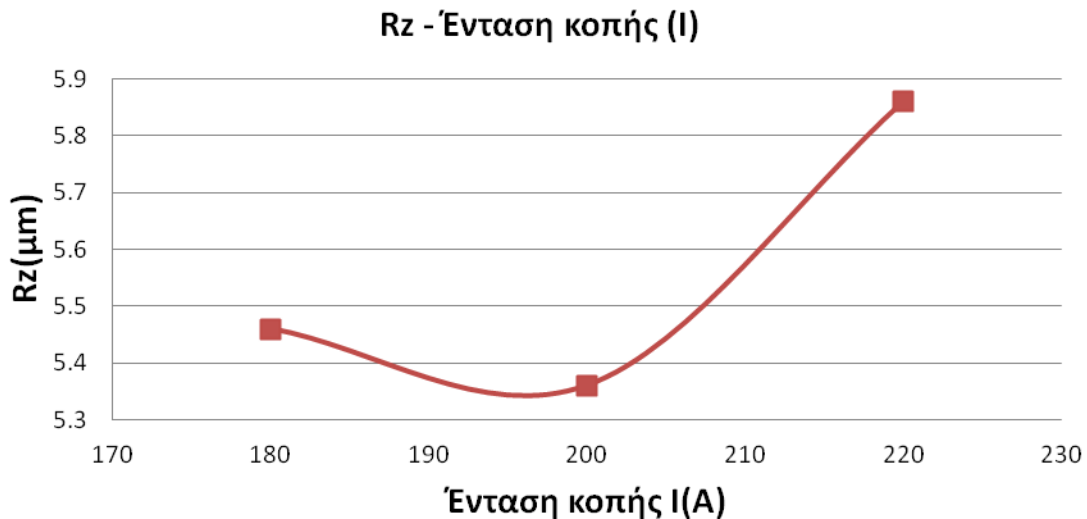
Βάση των αποτελεσμάτων αυτών κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα που ακολουθούν, τα οποία θα μας δώσουν πληροφορίες για το πως η κάθε μεταβλητή (παράγοντας) επηρεάζει την επιφανειακή τραχύτητα του δοκιμίου.

4.5.2 Διαγράμματα 3^{ης} φάσης

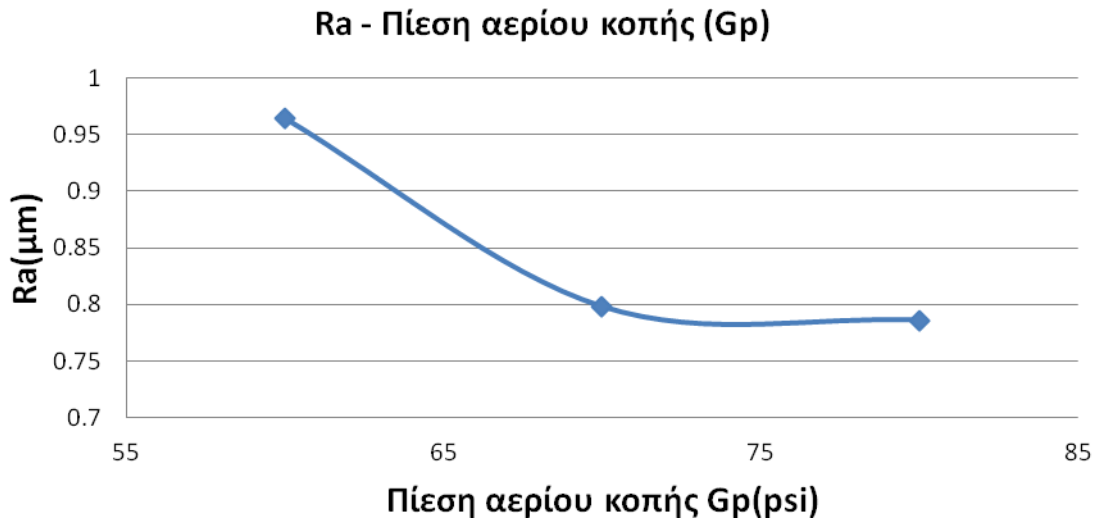


Γράφημα 4.5: Διάγραμμα συντελεστή τραχύτητας (Ra) σε σχέση με την ένταση κοπής.

Σύμφωνα με το γράφημα αυτό με την αύξηση της έντασης κοπής και διατηρώντας τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές βλέπουμε πως υπάρχει μια σχετική μείωση του συντελεστή τραχύτητας Ra αλλά δεν μπορούμε να έχουμε ξεκάθαρη άποψη καθώς το διάγραμμα δεν μεταβάλλεται γραμμικά. Η μείωση αυτή επαληθεύεται ποιοτικά από παρόμοια έρευνα διαφορετικού υλικού (ανοξείδωτος χάλυβας) [16].

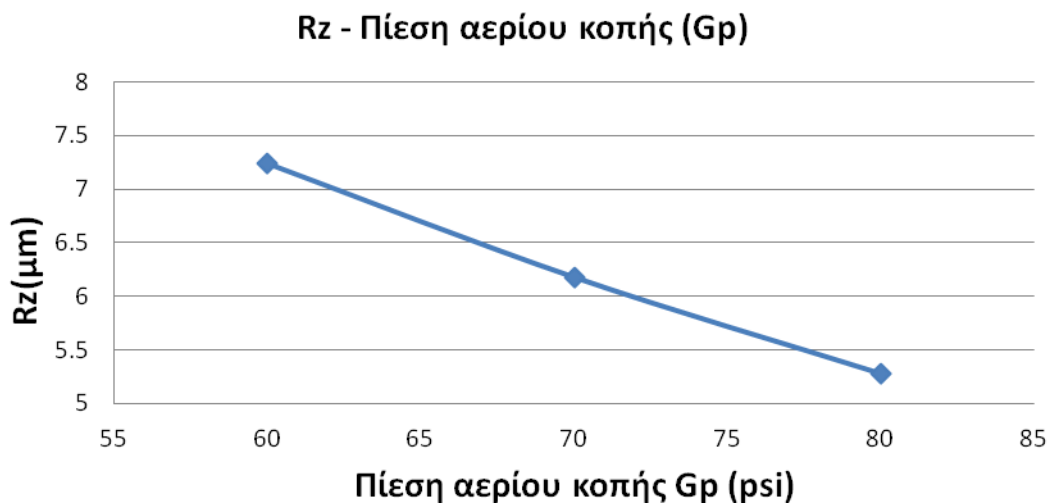


Γράφημα 4.6: Διάγραμμα συντελεστή τραχύτητας (Rz) σε σχέση με την ένταση κοπής.



Γράφημα 4.7: Διάγραμμα συντελεστή τραχύτητας (Ra) σε σχέση με την πίεση του αερίου κοπής.

Σύμφωνα με το γράφημα αυτό με την αύξηση της πίεσης του αερίου κοπής και διατηρώντας τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές έχουμε μείωση του συντελεστή τραχύτητας Ra.



Γράφημα 4.8: Διάγραμμα συντελεστή τραχύτητας (Rz) σε σχέση με την πίεση του αερίου κοπής.

Σύμφωνα με το γράφημα αυτό με την αύξηση της πίεσης του αερίου κοπής και διατηρώντας τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές έχουμε μείωση του συντελεστή τραχύτητας Rz.

4.6 4^Η ΦΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Στην φάση αυτή εφαρμόζεται ο σχεδιασμός πειραμάτων (design of experiment) μέθοδος taguchi [22].

- **Βήμα 1^ο:** Προσδιορισμός των ποιοτικών χαρακτηριστικών και επιλογή των παραμέτρων που θα ελεγχθούν.

Σύμφωνα και με το δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που επιλεχτήκαν να ελεγχθούν είναι η τραχύτητα, η κωνικότητα και η θερμικά επιρρεασθείσα περιοχή και οι παράμετροι (παράγοντες) που θα ελεγχθούν και ασκούν μεγάλη επιρροή στα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι η ταχύτητα κοπής, το ύψος κοπής, η ένταση κοπής και η πίεση του αερίου κοπής.

- **Βήμα 2^ο:** Απόφαση του αριθμού των επιπέδων κάθε παραμέτρου και των πιθανών αλληλεξαρτήσεων τους, αν υπάρχουν.

Ύστερα από έρευνα που έγινε στις δύο προηγούμενες φάσεις του πειράματος, είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε ποίοι είναι οι παράγοντες αυτοί οι οποίοι ασκούν την μεγαλύτερη επιρροή στο τελικό αποτέλεσμα και ποια τα επίπεδα που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Έτσι ο αριθμός των επιπέδων που επιλέχτηκαν για κάθε παράγοντα είναι τρία ενώ αλληλεξαρτήσεις θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχουν μεταξύ των μεταβλητών αυτών.

Επομένως οι παράγοντες που θα ελεγχθούν είναι 4 και τα επίπεδα τους 3.

Πίνακας 4.8: Παράγοντες και τα αντίστοιχα επίπεδα τους για το σχεδιασμό πειραμάτων.

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	ΕΠΙΠΕΔΟ 1 ^ο	ΕΠΙΠΕΔΟ 2 ^ο	ΕΠΙΠΕΔΟ 3 ^ο	ΜΟΝΑΔΕΣ
Ταχύτητα κοπής (Cs)	1820	2275	2730	mm/min
Ύψος κοπής (Ch)	4.1	6.1	8.1	mm
Ισχύς κοπής (Cp)	180	210	240	A
Πίεση αερίου κοπής (Gp)	60	75	90	psi

- **Βήμα 3^ο:** Επιλογή του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα η κατασκευή της αν δεν ανήκει σε κάποια από τις τυποποιημένες.

Στην περίπτωση μας δηλαδή για τέσσερις παράγοντες με τρία επίπεδα για τον κάθε ένα ο ορθογώνιος πίνακας που ταιριάζει απόλυτα είναι ο L9. Όλοι οι τυποποιημένοι πίνακες για το σχεδιασμό πειραμάτων με χρήση της μεθόδου taguchi φαίνονται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας. Η μορφή του πίνακα αυτού φαίνεται παρακάτω.

Πίνακας 4.9: Μορφή πίνακα που αποτελείται από εννέα σειρές (L9).

Πείραμα	P1	P2	P3	P4
1	L1	L1	L1	L1
2	L1	L2	L2	L2
3	L1	L3	L3	L3
4	L2	L1	L2	L3
5	L2	L2	L3	L1
6	L2	L3	L1	L2
7	L3	L1	L3	L2
8	L3	L2	L1	L3
9	L3	L3	L2	L1

Όπου (P1,P2,P3,P4) οι παράγοντες 1,2,3,4 και (L1,L2,L3) τα επίπεδα 1,2,3. Στο στάδιο αυτό αφού ο ορθογώνιος πίνακας έχει εκλεγεί και επίσης είναι γνωστοί τόσο οι παράμετροι (παράγοντες) που θα ελέγξουμε όσο και τα επίπεδα που θα έχουν είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τους βαθμούς ελευθερίας του πειράματος. Οι βαθμοί ελευθερίας μας δείχνουν ουσιαστικά τον ελάχιστο αριθμό πειραμάτων που πρέπει να διεξαχθούν ώστε να ελεγχθούν όλοι οι παράγοντες που έχουν επιλεγεί. Αν ο αριθμός αυτός είναι μικρότερος του εννιά που αποτελεί τον αριθμό των πειραμάτων τότε η μελέτη είναι εφικτή με τον συγκεκριμένο πίνακα. Αν ο αριθμός είναι μεγαλύτερος του εννιά τότε ένας πίνακας με περισσότερες σειρές και επομένως περισσότερα πειράματα κρίνεται απαραίτητος. Στο κεφάλαιο πέντε θα δούμε αναλυτικά πως γίνεται ο υπολογισμός των βαθμών ελευθερίας.

- Βήμα 4^ο: Συμπλήρωση του πίνακα και διεξαγωγή των πειραμάτων βάσει της ορθογώνιας σειράς.

Παρακάτω φαίνεται συμπληρωμένος ο πίνακας και ακολουθεί η διεξαγωγή των πειραμάτων.

Πίνακας 4.10: Πίνακας (L9) με τις τιμές του πειράματος.

Πείραμα	P1	P2	P3	P4
1	1820	180	4,1	60
2	1820	210	6,1	75
3	1820	240	8,1	90
4	2275	180	6,1	90
5	2275	210	8,1	60
6	2275	240	4,1	75
7	2730	180	8,1	75
8	2730	210	4,1	90
9	2730	240	6,1	60

Τα υπόλοιπα τρία βήματα περιγράφονται στο πέμπτο κεφάλαιο όπου γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν παρακάτω.

4.6.1 Αποτελέσματα μέτρησης τραχύτητας για την 4^η φάση του πειράματος

Για την μέτρηση της τραχύτητας ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία όπως στις προηγούμενες φάσεις του πειράματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα συντελεστή τραχύτητας Ra για την 4^η φάση.

Ra (μm)	Δοκ 1	Δοκ 2	Δοκ 3	Δοκ 4	Δοκ 5	Δοκ 6	Δοκ 7	Δοκ 8	Δοκ 9
Σημείο 1	0,83	0,93	1,02	0,81	1,08	0,74	1,05	0,75	0,92
Σημείο 2	0,93	1,06	1,32	0,88	0,88	0,8	1,2	0,69	0,95
Σημείο 3	0,82	0,87	1,32	0,94	0,95	0,77	1	0,67	0,88
Σημείο 4	0,72	0,86	1,06	0,91	1,05	0,83	0,98	0,76	0,9
Σημείο 5	0,8	0,84	1,17	0,9	0,92	0,72	0,88	0,75	0,89
M.O. Ra	0,82	0,912	1,178	0,888	0,976	0,772	1,022	0,724	0,908

Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα συντελεστή τραχύτητας Rz για την 4^η φάση.

Rz (μm)	Δοκ 1	Δοκ 2	Δοκ 3	Δοκ 4	Δοκ 5	Δοκ 6	Δοκ 7	Δοκ 8	Δοκ 9
Σημείο 1	5,4	7,4	7,6	5,6	7,2	5,8	6,9	5,1	7,6
Σημείο 2	7,2	8,1	9,3	5,6	6,2	6,5	7,7	5,4	6,9
Σημείο 3	5,9	7,5	10,7	6,2	7,2	6,7	6,9	6,1	6,1
Σημείο 4	5,1	5,8	8,3	5,6	7,3	5,7	6	5,6	6,4
Σημείο 5	5,7	6,5	8,7	7,1	8,2	5,9	6,1	5,2	5,4
M.O. Rz	5,86	7,06	8,92	6,02	7,22	6,12	6,72	5,48	6,48

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως η διασπορά για το μέσο όρο τραχύτητας Ra των δειγμάτων του πίνακα (4.11) είναι $\sigma^2=0,018$ ενώ για τον μέσο όρο τραχύτητας Rz του πίνακα (4.12) είναι $\sigma^2=1,043$.

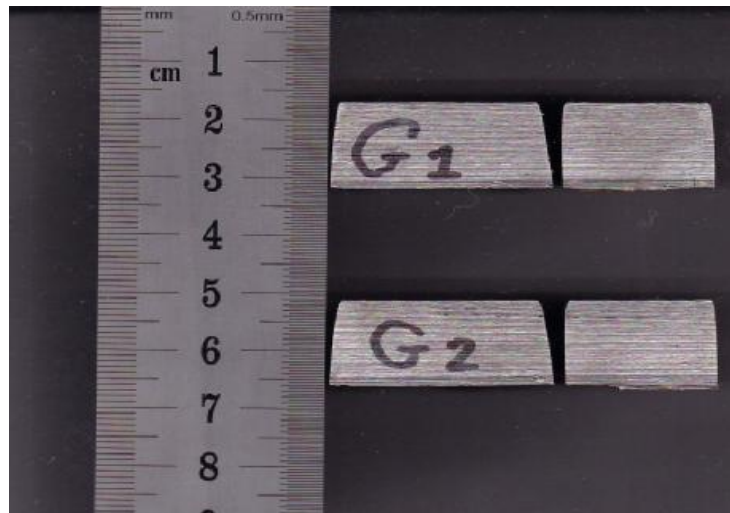
Πίνακας 4.13: Ρυθμίσεις παραμέτρων 4^η φάσης (DoE).

C. speed	1820	1820	1820	2275	2275	2275	2730	2730	2730	(mm/min)
C. power	180	210	240	180	210	240	180	210	240	(amp)
C. height	4,1	6,1	8,1	6,1	8,1	4,1	8,1	4,1	6,1	(mm)
I. height	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	(mm)
O₂ preflow	24	24	24	24	24	24	24	24	24	(psi)
Air preflow	65	65	65	65	65	65	65	65	65	(psi)
O₂ cutflow	60	75	90	90	60	75	75	90	60	(psi)
Air cutflow	28	28	28	28	28	28	28	28	28	(psi)

4.6.2 Μέτρηση κωνικότητας

Με το τέλος και της 4^η φάσης του περάματος τα δοκίμια κόβονται μέσω πριονοκορδέλας σε 3 μέρη, όπως και στις προηγούμενες δύο φάσεις του πειράματος (Εικόνα 4.5).

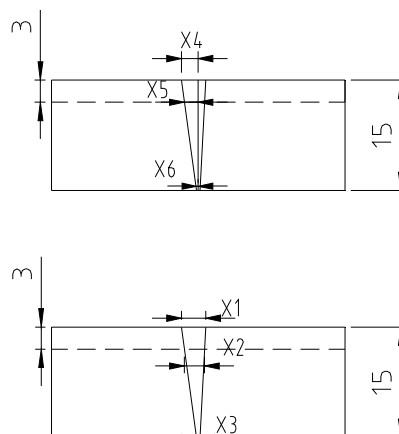
Έπειτα τα κομμάτια στα οποία φαίνεται καθαρά η κωνικότητα συλλέγονται και σαρώνονται σε σαρωτή (scanner) υψηλής ανάλυσης. Επίσης σαρώνουμε μαζί και μια κλίμακα η οποία έχει ακρίβεια 0.5mm.



Εικόνα 4.9: Εικόνα από σαρωτή για την μέτρηση της τραχύτητας.

Στην συνέχεια εισάγουμε τα αρχεία αυτά στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD μέσω του οποίου έχουμε την δυνατότητα να διαστασιολογήσουμε και κατά συνέπεια να μετρήσουμε την κωνικότητα των δοκιμίων. Ουσιαστικά χρησιμοποιήσαμε το κλιμακόμετρο για να δημιουργήσουμε μια μονάδα αναφοράς.

Στην συνέχεια όλες οι μετρήσεις που κάναμε τις συγκρίναμε με αυτή τη μονάδα αναφοράς με αποτέλεσμα να πετύχουμε πολύ μεγάλη ακρίβεια.



Σχήμα 4.3: Μέτρηση κωνικότητας

Στο παραπάνω σχήμα (4.3) φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η διαστασιολόγηση. Στο πάνω μέρος φαίνονται οι μετρήσεις X4,5,6 οι οποίες είναι μετρήσεις που δηλώνουν απόσταση από κατακόρυφο άξονα. Στο κάτω μέρος φαίνονται οι μετρήσεις X1,2,3 οι οποίες δείχνουν την απόσταση μεταξύ των δύο κωνικών πλευρών. Σύνολο διαστασιολογήθηκαν 6 σημεία από τα οποία επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε για την μέτρηση της κωνικότητας τα X5 και X6. Οι μετρήσεις 1,2,3 δεν χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό της κωνικότητας διότι μετρούν δύο κωνικές πλευρές οι οποίες έχουν διαφορετική κλίση (γωνία). Η διαφορά αυτή οφείλεται στην περιδίνηση του αερίου κοπής. Η μέτρηση 4 δεν χρησιμοποιήθηκε διότι δεν θα μας βοηθούσε στο σωστό υπολογισμό της κωνικότητας λόγω του φαινομένου της επιφανειακής καμπυλότητας (top edge rounding) που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο δύο. Έτσι χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις πέντε και έξι ο υπολογισμός έγινε εύκολα και με ακρίβεια μέσω του τύπου (4.1) που ακολουθεί.

Πίνακας 4.14 Μετρήσεις σημείων για την εύρεση της κωνικότητας.

A/A	ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ							
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	S (%)	S(%)στρ
1	4,319	2,677	1,634	2,808	1,996	0,575	11,8417	11,84
2	4,805	3,275	2,16	2,929	2,133	0,951	9,85	9,85
3	5,249	3,447	2,319	3,535	2,568	1,677	7,425	7,43
4	4,224	2,581	1,539	2,801	1,852	0,736	9,3	9,3
5	5,002	2,934	1,549	2,377	1,406	0,271	9,45833	9,46
6	4,147	3,112	1,81	2,505	1,983	0,716	10,5583	10,56
7	4,232	2,506	0,864	2,709	1,8	0,744	8,8	8,8
8	3,965	2,763	1,259	3,012	2,335	0,98	11,2917	11,29
9	4,317	3,108	1,727	3,038	2,43	1,461	8,075	8,08

Ο υπολογισμός έγινε βάσει του τύπου:

$$S\% = \frac{H}{L} * 100 \quad (4.1)$$

Όπου:

S είναι η κλίση και κατά συνέπεια η κωνικότητα των δοκιμίων

H είναι η υψομετρική διαφορά των σημείων X5 και X6 (H=X5-X6)

L είναι το μήκος της κωνικότητας (L=12mm)

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινίσουμε ότι στην περίπτωση μας το L είναι 13mm αυτό έγινε διότι όπως βλέπουμε και στο σχήμα (4.3) η απόσταση X5 έχει μετρηθεί 3 χιλιοστά κάτω από την κορυφή του δοκιμίου.

Ο λόγος που έγινε αυτό είναι ότι έτσι αποφύγαμε ένα μεγάλο ποσοστό σφάλματος που θα είχαμε λόγο του φαινομένου που καλείται καμπυλότητα στην κορυφή της επιφάνειας κοπής ή (top edge rounding).

4.6.3 Μέτρηση θερμικά επιρρεασθειας περιοχής (haz)

Για την μέτρηση του HAZ χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια μέρη του δοκιμίου με τα οποία μετρήσαμε και την κωνικότητα και είναι αυτά τα οποία φαίνονται στην εικόνα (4.11). Για να πάρουμε τις μετρήσεις αυτές ακολουθήθηκε μια διαδικασία στην οποία τα τμήματα αυτά του δοκιμίου προσβλήθηκαν χημικά με διάλυμα νιτρικού οξέως (nital) περιεκτικότητας 5%.

Το NITAL (HNO_3) είναι ένα διάλυμα από αλκοόλη και νιτρικό οξύ και χρησιμοποιείται κυρίως για την επεξεργασία μετάλλων. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στο να φανερώνει την μικροδομή ειδικά των ανθρακούχων χαλύβων. Η αλκοόλη συνήθως είναι αιθανόλη ή μαιθανόλη. Το διάλυμα αυτό είναι αρκετά επικίνδυνο και πρέπει να αποφεύγεται η επαφή με το δέρμα καθώς και η έκθεση στα αέρια που παράγονται από το διάλυμα αυτό. Επίσης σε περίπτωση που η περιεκτικότητα του νιτρικού οξέως ξεπεράσει το 10% τότε υπάρχει πιθανότητα έκρηξης.

Το nital μας παρέχει την δυνατότητα να μπορούμε ύστερα από την χημική προσβολή ενός μετάλλου από αυτό, να δούμε τις περιοχές εκείνες στις οποίες η κρυσταλλική δομή έχει επηρεασθεί ή αλλοιωθεί. Αυτό γίνεται ορατό λόγο της αλλαγής του χρώματος στην περιοχή αυτή.

Για να λειτουργήσει όμως αυτό θα πρέπει πριν το μέταλλο υποστεί αυτή την προσβολή η επιφάνεια που θέλουμε να μελετήσουμε να είναι αρκετά λεία. Αν η επιφάνεια που θα προσβληθεί δεν είναι λεία τότε τα αποτελέσματα δεν θα είναι ορατά.

4.6.3.1 Διαδικασία λείανσης

Το τμήμα του δοκιμίου που χρησιμοποιείται για την μέτρηση του HAZ είχε προηγουμένως κοπεί με πριονοκορδέλα επομένως η λείανση του είναι απαραίτητη. Η λείανση των δοκιμίων έγινε σε ειδικό μηχάνημα το οποίο φέρει δύο λειαντικούς δίσκους οι οποίοι περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα και ταυτόχρονα έχουν την δυνατότητα παροχής ψυκτικού υγρού.



Εικόνα 4.10: Λειαντική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα.

Η λείανση επιτυγχάνεται κρατώντας την επιφάνεια που θέλουμε να λειάνουμε σε επαφή με τους λειαντικούς δίσκους.



Εικόνα 4.11: Τμήμα δοκιμίου για μέτρηση της Θερμικά επηρεασθείσας περιοχής (haz) πριν την λείανση (επάνω), μετά τη λείανση (κάτω).

Λόγο της πολύ τραχιάς επιφάνειας των δοκιμίων η λείανση τους έγινε σε στάδια χρησιμοποιώντας διάφορους τύπους λειαντικών δίσκων. Ξεκινήσαμε με δίσκους των 500 κόκκων/cm² και καταλήξαμε σε δίσκους των 1200.

4.6.3.2 Προσβολή με διάλυμα νιτρικού οξέος (nital)

Εφόσον τα δοκίμια είναι πλέον λεία είναι έτοιμα για την χημική προσβολή. Με πολύ προσοχή και χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα μέτρα προστασίας έγινε εμβάπτιση του κάθε δοκιμίου ξεχωριστά σε δοχείο το οποίο περιείχε το διάλυμα νιτρικού οξέος. Ο χρόνος της εμβάπτισης επιλέχθηκε να είναι 45sec.

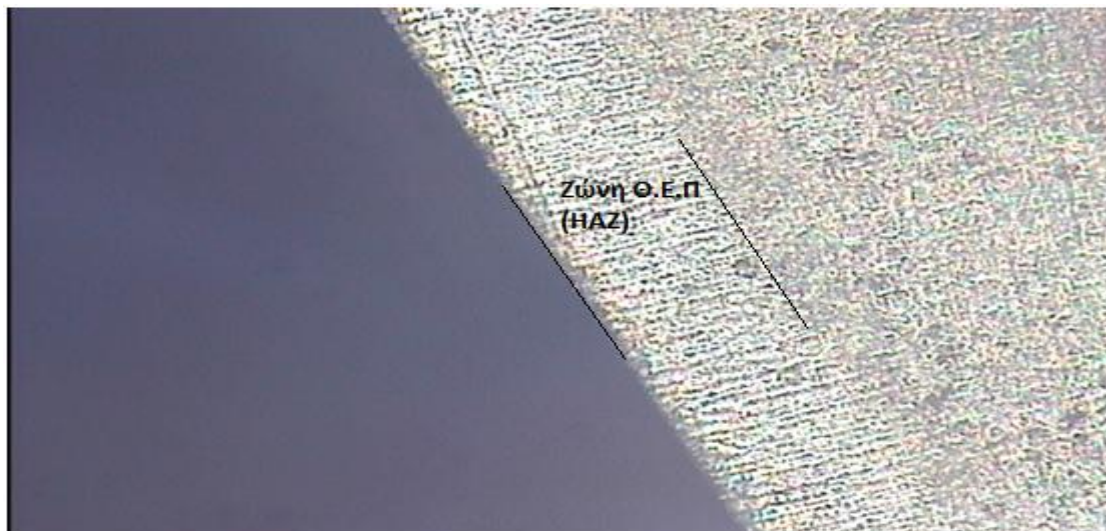
Ο χρόνος εκλέχθηκε βάσει δοκιμών που έγιναν ώστε η επίδραση να είναι ορατή και τα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν πιο ευδιάκριτα. Μετά και την διαδικασία αυτή η περιοχή των δοκιμίων όπου υπάρχει αλλαγή στην κρυσταλλική δομή είναι ορατή και με γυμνό μάτι για να μετρηθεί όμως με ακρίβεια η χρήση μικροσκοπίου είναι απαραίτητη.

4.6.3.3 Φωτογράφιση του HAZ στο μικροσκόπιο

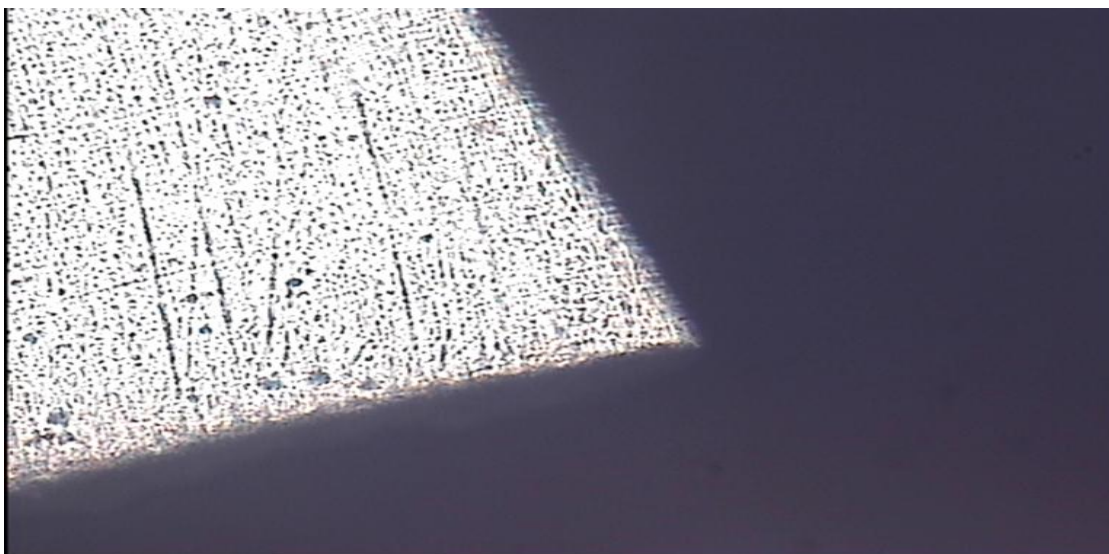
Για να καταφέρουμε την μέγιστη ακρίβεια στην μέτρηση του haz είναι απαραίτητη η φωτογράφιση της θερμικά επηρεασθείσας περιοχής μέσω μικροσκοπίου. Έτσι κάθε ένα κομμάτι τοποθετείται στην ειδική πλάκα και μπαίνει στο μικροσκόπιο έτσι ώστε να ανιχνευτεί και να φωτογραφηθεί το haz.

Στο μικροσκόπιο οι φωτογραφίες πάρθηκαν με φακό 50mm και αποθηκεύτηκαν σε υπολογιστή ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με αυτό.

Επίσης ένα πρότυπο μήκους 1mm φωτογραφήθηκε έτσι ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση. Για κάθε δοκίμιο πήραμε μια εικόνα πριν προσβληθεί χημικά και αρκετές μετά ώστε να έχουμε δυνατότητα επιλογής της καλύτερης για χρήση στο επόμενο στάδιο.



Εικόνα 4.12: Φωτογραφία δοκιμίου μετά την χημική προσβολή.



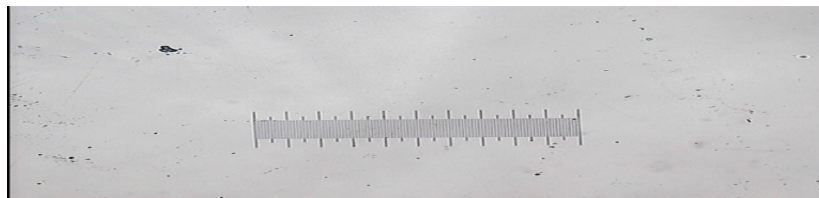
Εικόνα 4.13: Φωτογραφία δοκιμίου πριν την χημική προσβολή.

4.6.3.4 Εισαγωγή των φωτογραφιών στο AutoCAD για την μέτρηση του HAZ

Στο στάδιο αυτό της πειραματικής διαδικασίας έχοντας συγκεντρώσει τις απαραίτητες φωτογραφίες για το κάθε δοκίμιο είμαστε έτοιμοι για την μέτρηση της θερμικά επηρεασθείσας περιοχής (HAZ).

Η μέτρηση θα γίνει μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD. Η διαδικασία έχει ως εξής:

- Επιλέγουμε για το κάθε ένα από τα δοκίμια μια φωτογραφία(αυτήν όπου η θερμικά επηρεασθείσα περιοχή είναι όσο το δυνατόν πιο ευδιάκριτη) και την εισάγουμε στο AutoCAD.
- Εισάγουμε στο ίδιο αρχείο του AutoCAD και την φωτογραφία από το πρότυπο δοκίμιο που μετρήσαμε με το μικροσκόπιο.



Εικόνα 4.14: Φωτογραφία πρότυπου μήκους που μετρήθηκε στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο για την μέτρηση της θερμικά επηρεασθείσας περιοχής.

- Έπειτα κάνοντας χρήση της δυνατότητας διαστασιολόγησης του προγράμματος μετράμε το πρότυπο μήκος που αντιστοιχεί σε 1 mm και έτσι ουσιαστικά δημιουργούμε μια νέα μονάδα μέτρησης.
- Στην συνέχεια βάζοντας διαστάσεις σε κάθε μια από τις φωτογραφίες των δοκιμίων και συγκρίνοντας με την νέα μονάδα που δημιουργήσαμε μπορούμε να μετρήσουμε το μήκος της θερμικά επηρεασθείσας περιοχής.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε πως η μετρήσεις έγιναν στο μέσο του δοκιμίου. Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας που περιέχει συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα για την μέτρηση της θερμικά επηρεασθείσας περιοχής (HAZ) για τα 9 δοκίμια της 4^{ης} φάσης του πειράματος.

Πίνακας 4.15: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την μέτρηση της θερμικά επηρεασθείσας περιοχής

A/A	HAZ		
	L1	Haz (mm)	Haz (μm)
1	0,16	0,400	400
2	0,20	0,500	500
3	0,22	0,550	550
4	0,17	0,425	425
5	0,17	0,425	425
6	0,16	0,400	400
7	0,14	0,350	350
8	0,16	0,400	400
9	0,13	0,325	325

5.ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι μέθοδοι του πειραματικού σχεδιασμού ανακαλύφθηκαν αρχικά από τον Fisher. Παρόλα αυτά οι κλασικές μέθοδοι σχεδιασμού πειραμάτων ήταν πολύ περίπλοκες και ήταν δύσκολο να χρησιμοποιηθούν. Επιπλέον όσο ο αριθμός των παραμέτρων που εμπλέκονταν στο πείραμα μεγάλωνε ένας επίσης μεγάλος αριθμός πειραμάτων ήταν αναγκαίος για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα η μέθοδος taguchi χρησιμοποιεί έναν ειδικό σχεδιασμό από ορθογώνιες σειρές για να εξετάσει την επιρροή της κάθε παραμέτρου με όσο το δυνατόν λιγότερα πειράματα. Έπειτα τα πειραματικά αποτελέσματα μετατρέπονται με την χρήση εξισώσεων που θα δούμε παρακάτω σε λόγο σήματος θορύβου (S/N). Ο Taguchi συνιστά την χρήση του λόγου (S/N) για την μέτρηση της απόκλισης των ποιοτικών χαρακτηριστικών από τις επιθυμητές τιμές.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες ποιοτικών χαρακτηριστικών στην ανάλυση του λόγου (S/N).

- Το 'μικρότερο' το 'καλύτερο'
- Το 'μεγαλύτερο' το 'καλύτερο'
- Το 'ονομαστικό' το 'καλύτερο'

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που θέλουμε να μετρήσουμε, επιλέγουμε μία από τις παραπάνω αναλύσεις, οι οποίες καθορίζουν και την εξίσωση που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Στην περίπτωση που σκοπός μας είναι να ελαχιστοποιήσουμε την τιμή ενός ή περισσότερων ποιοτικών χαρακτηριστικών, όπως στην πτυχιακή αυτή εργασία, θα επιλέξουμε την ανάλυση 'μικρότερο' το 'καλύτερο'. Αν θέλουμε να την αυξήσουμε θα επιλέξουμε την ανάλυση 'μεγαλύτερο' το καλύτερο και αν οι τιμή θέλουμε να είναι κοντά σε μια ονομαστική τιμή, η ανάλυση που θα επιλέξουμε είναι 'ονομαστικό' το καλύτερο. Ο λόγος (S/N) για κάθε επίπεδο των παραμέτρων της διαδικασίας υπολογίζετε βάση της ανάλυσης του (S/N).

Ανεξαρτήτως της κατηγορίας των ποιοτικών χαρακτηριστικών, ένας μεγάλος λόγος (S/N) σημαίνει καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Γι' αυτό το βέλτιστο επίπεδο της κάθε παραμέτρου είναι αυτό το οποίο έχει το μεγαλύτερο λόγο (S/N). Επιπροσθέτως μια στατιστική ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA) θα εκτελεστεί προκειμένου να δούμε ποίοι από τους παράγοντες (μεταβλητές) ασκούν την μεγαλύτερη επιρροή στο αποτέλεσμα.

5.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ

Η ανάλυση της διακύμανσης (ANalysis Of VAriance – ANOVA) [18] είναι μία στατιστική μέθοδος με την οποία η μεταβλητότητα που υπάρχει σ' ένα σύνολο δεδομένων διασπάται στις επιμέρους συνιστώσες της με στόχο την κατανόηση της σημαντικότητας των διαφορετικών πηγών προέλευσής της. Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας οφείλεται στον θεμελιωτή της σύγχρονης στατιστικής επιστήμης, άγγλο

στατιστικό Sir Ronald Aylmer Fisher (1890-1962). Στην πραγματικότητα η ANOVA περιλαμβάνει μία ομάδα στατιστικών μεθόδων καταλλήλων για την ανάλυση δεδομένων που προκύπτουν από πειραματικούς σχεδιασμούς. Τα δεδομένα ενός δείγματος ανάλογα με την προέλευσή τους διακρίνονται σε παρατηρήσεις (observational sampling) ή σε πειραματικά (designed sampling). Στην πρώτη κατηγορία ο στατιστικός ερευνητής απλά παρατηρεί τις τιμές που εμφανίζονται χωρίς να έχει δυνατότητα επέμβασης στις αντίστοιχες μεταβλητές. Αντίθετα στη δεύτερη κατηγορία ο στατιστικός ερευνητής προσπαθεί να ελέγξει τα επίπεδα μιας ή περισσοτέρων ανεξάρτητων (independent) μεταβλητών προκειμένου να προσδιορίσει την επίδραση που έχουν πάνω στην υπό μελέτη μεταβλητή που καλείται εξαρτημένη (dependent) η απόκριση (response). Στόχος κάθε στατιστικού πειράματος είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης μιας ή περισσοτέρων ανεξάρτητων μεταβλητών πάνω στην απόκριση. Οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται συνήθως σαν παράγοντες (factors) και μπορεί να είναι είτε ποσοτικές είτε ποιοτικές. Οι τιμές του παράγοντα που προσδιορίζονται στο πείραμα λέγονται επίπεδα (levels). Σε ένα πείραμα με ένα παράγοντα οι μεταχειρίσεις (treatments) του πειράματος είναι τα επίπεδα του παράγοντα. Σε ένα πείραμα με δύο ή περισσότερους παράγοντες οι μεταχειρίσεις είναι οι συνδυασμοί παραγόντων-επιπέδων.

Στο κεφάλαιο λοιπόν αυτό θα δούμε τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων του πειράματος και θα κατανοήσουμε με ποιόν τρόπο αλλά και σε τι βαθμό η κάθε μεταβλητή (παράγοντας) επηρεάζει την ποιότητα της κοπής. Το στάδιο αυτό αποτελεί το 5^ο βήμα του σχεδιασμού πειραμάτων της μεθόδου taguchi όπως αναφέρθηκε στην αρχή του προηγούμενου κεφαλαίου.

Στην συνέχεια ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας που περιέχει τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν.

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ποιοτικών χαρακτηριστικών.

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ			
ΑΡ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ	Θ.Ε.Π (HAZ)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ
	(αδ)	(μm)	(μm)
1	11,84	400	0,820
2	9,85	500	0,912
3	7,43	550	1,178
4	9,30	425	0,888
5	9,46	425	0,976
6	10,56	400	0,772
7	8,80	350	1,022
8	11,29	400	0,724
9	8,08	325	0,908

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τα οποία μελετήσαμε είναι:

- α) Η κωνικότητα,
- β) Η θερμικά επιρρεασθείσα περιοχή (HAZ)
- γ) Η τραχύτητα (Ra, Rz)

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου αυτού, η μέθοδος που χρησιμοποιούμε έχει τρεις κατηγορίες ποιοτικών χαρακτηριστικών. Επομένως η κατηγορία που ταιριάζει στην περίπτωση μας είναι αυτή όπου ιδανική τιμή είναι η μικρότερη ('μικρότερο' το καλύτερο). Αυτό συμβαίνει διότι για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά οι τιμές που μετρήσαμε θέλουμε να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες για να έχουμε την βέλτιστη ποιότητα κοπής.

5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΣΩΝ (ANOM)

Στο στάδιο αυτό θα γίνει η ανάλυση των μέσων (ANOM) η οποία θα μας αποκαλύψει το βέλτιστο επίπεδο για την κάθε μεταβλητή (παράγοντα) της διαδικασίας.

Αρχικά υπολογίζετε ο λόγος σήματος-θορύβου (S/N) του κάθε πειράματος μέσω της λογαριθμικής συνάρτησης του μέσου τετραγώνου της αποκλίσεως. Λόγω της μεθόδου ανάλυσης που επιλέξαμε, 'μικρότερο' το 'καλύτερο' η συνάρτηση που χρησιμοποιούμε ορίζεται ως:

$$\left[\frac{S}{N} \right]_i = -10 \log_{10} \left(\frac{\sum y_i^2}{n} \right) \quad (5.1)$$

Όπου:

- y_i είναι η τιμή της i παρατήρησης του κάθε πειράματος,
- n είναι ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων πειραμάτων,
- F_j είναι το επίπεδο j του παράγοντα F ,
- m είναι ο αριθμός των πειραμάτων όπου συμμετέχει το F_j και
- $(S/N)_i$ είναι ο λόγος σήματος-θορύβου του πειράματος στο οποίο συμμετέχει το F_j .

Τα αποτελέσματα για κάθε πείραμα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα υπολογισμού του λόγου σήματος θορύβου για κάθε πείραμα.

ΑΡ.ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	ΛΟΓΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΘΟΡΥΒΟΥ (S/N)			ΜΟΝΑΔΕΣ
	ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ	Θ.Ε.Π (haz)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ	
1	-21,46703405	-52,04119983	1,723722952	(Db)
2	-19,86872461	-53,97940009	0,800103233	(Db)
3	-17,41977628	-54,80725379	-1,422905809	(Db)
4	-19,36965897	-52,5677786	1,031740684	(Db)
5	-19,51782273	-52,5677786	0,211003647	(Db)
6	-20,47327836	-52,04119983	2,247653993	(Db)
7	-18,88965344	-50,88136089	-0,189017916	(Db)
8	-21,05387884	-52,04119983	2,805228676	(Db)
9	-18,14822722	-50,23766722	0,83828303	(Db)
Μ.Ο (S/N)	-19,57867272	-52,35164874	0,893979166	(Db)

Επόμενο βήμα αποτελεί ο υπολογισμός του μέσου των επιπέδων (Mean of level), που γίνεται μέσο της εξίσωσης που ακολουθεί:

$$\left[\frac{S}{N} \right]_{Fj} = \sum_{i=1}^m \frac{(S/N)_i}{m} \quad (5.2)$$

Όπου:

Fj είναι η τιμή του επιπέδου j για τον παράγοντα F

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα υπολογισμού του μέσου των επιπέδων για την κωνικότητα.

Μέσος επιπέδων (mean of level)			
ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 3
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΟΠΗΣ	-19,58517831	-19,78692002	-19,3639198
ΕΝΤΑΣΗ ΚΟΗΣ	-19,90878215	-20,14680873	-18,6804273
ΥΦΟΣ ΚΟΠΗΣ	-20,99806375	-19,12887027	-18,6090841
ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΚΟΠΗΣ	-19,711028	-19,74388547	-19,2811047

Πίνακας 5.4:Αποτελέσματα υπολογισμού του μέσου των επιπέδων για την θερμικά επιρρεασθείσα περιοχή.

Μέσος επιπέδων (mean of level)			
Θ.Ε.Π. (HAZ)	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 3
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΟΠΗΣ	-53,60928457	-52,39225234	-51,0534093
ΕΝΤΑΣΗ ΚΟΗΣ	-51,8301131	-52,86279284	-52,3620403
ΥΨΟΣ ΚΟΠΗΣ	-52,04119983	-52,2616153	-52,7521311
ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΚΟΠΗΣ	-51,61554855	-52,3006536	-53,1387441

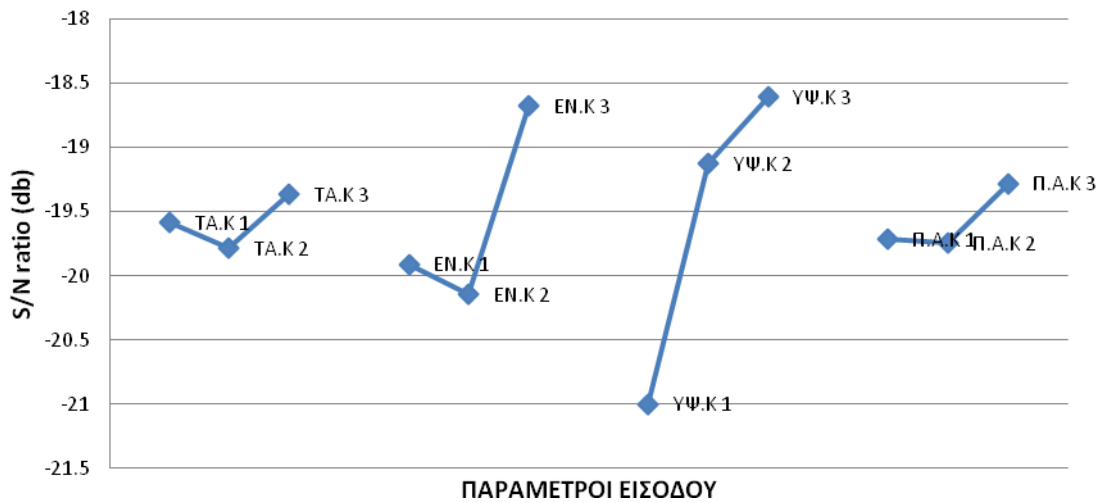
Πίνακας 5.5:Αποτελέσματα υπολογισμού του μέσου των επιπέδων για την τραχύτητα.

Μέσος επιπέδων (mean of level)			
ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 3
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΟΠΗΣ	0,366973459	1,163466108	1,15149793
ΕΝΤΑΣΗ ΚΟΗΣ	0,855481907	1,272111852	0,554343738
ΥΨΟΣ ΚΟΠΗΣ	2,258868541	0,890042316	-0,46697336
ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΚΟΠΗΣ	0,924336543	0,952913104	0,80468785

Έπειτα από τους υπολογισμούς αυτούς είμαστε σε θέση να κατασκευάσουμε τα γραφήματα που ακολουθούν τα οποία μας δείχνουν τα επίπεδα εκείνα ανά παράγοντα που μας δίνουν την βέλτιστη ποιότητα κοπής. Στον χ άξονα των γραφημάτων εμφανίζονται οι παράμετροι εισόδου οι οποίοι είναι:

1. Ταχύτητα κοπής (ΤΑ.Κ)
2. Ένταση κοπής (ΕΝ.Κ)
3. Ύψος κοπής (ΥΨ.Κ)
4. Πίεση αερίου κοπής (Π.Α.Κ)

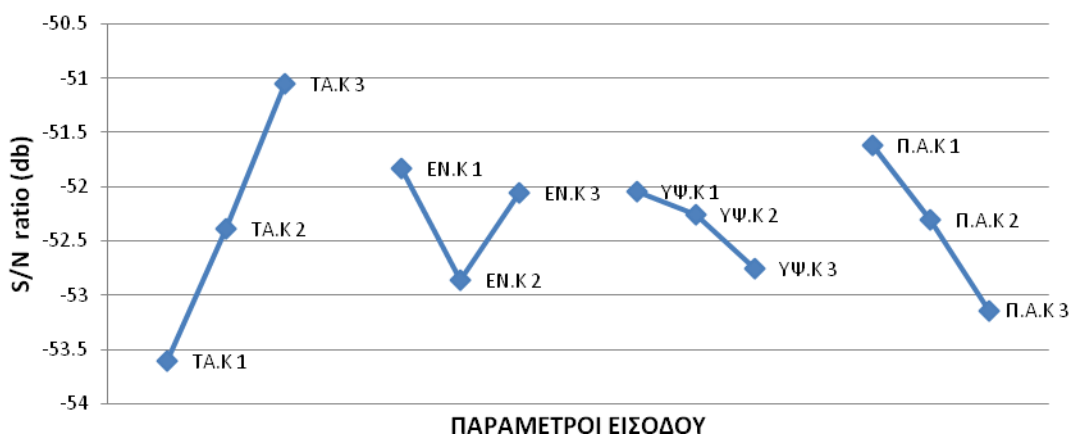
Επίδραση παραμέτρων στην κωνικότητα



Γράφημα 5.1: Επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας στην κωνικότητα της επιφάνειας κοπής.

Στην αρχή του κεφαλαίου αυτού αναφέραμε πως όσο πιο μεγάλος είναι ο λόγος (S/N) τόσο καλύτερη είναι και η ποιότητα κοπής που πετυχαίνουμε. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό και παρατηρώντας το παραπάνω γράφημα συμπεραίνουμε πως για να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερη κωνικότητα στην επιφάνεια κοπής πρέπει για την ταχύτητα κοπής, την ένταση της κοπής, το ύψος κοπής και την πίεση του αερίου κοπής να επιλεγεί το επίπεδο τρία.

Επίδραση παραμέτρων στη Θ.Ε.Π



Γράφημα 5.2: Επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας στην Θερμικά επιρρεασθείσα περιοχή (HAZ) της επιφάνειας κοπής.

Από το παραπάνω γράφημα παρατηρούμε πως για να έχουμε την μικρότερη δυνατή θερμικά επιρρεασθείσα περιοχή πρέπει για την ταχύτητα κοπής να επιλεγεί το επίπεδο τρία ενώ για την ένταση της κοπής, το ύψος κοπής και την πίεση του αερίου κοπής το επίπεδο ένα.



Γράφημα 5.3: Επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας στην τραχύτητα (R_a) της επιφάνειας κοπής.

Από το παραπάνω γράφημα παρατηρούμε πως για να έχουμε την μικρότερη δυνατή τραχύτητα στην επιφάνεια κοπής πρέπει για την ταχύτητα κοπής, την ένταση κοπής και την πίεση του αερίου κοπής να επιλεγεί το επίπεδο δύο, ενώ για το ύψος κοπής το επίπεδο ένα.

5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ANOVA)

Με την ανάλυση του μέσου (ANOM) που είδαμε παραπάνω καταφέραμε να ανακαλύψουμε τις βέλτιστες τιμές (επίπεδα) των παραμέτρων ανάλογα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που θέλουμε να πετύχουμε. Για να ανακαλύψουμε τώρα το ποσοστό της επιρροής που ασκεί η κάθε παράμετρος και ουσιαστικά πόσο σημαντική είναι η κάθε παράμετρος για την διαδικασία χρειάζεται μια παραπάνω ανάλυση, η ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA).

Αρχικά για κάθε ένα από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που επιλέξαμε να μελετήσουμε υπολογίζουμε την επίδραση της κάθε παραμέτρου (effect of each parameter). Η τιμή αυτή υπολογίζεται ως η διαφορά του μέσου των επιπέδων της κάθε παραμέτρου από το ολικό μέσο.

$$(e_{\text{oe}}) = \text{Μέσος επιπέδων (mean of level)} - \text{Ολικό μέσο (overall mean)} \quad (5.3)$$

Πίνακας 5.6: Επίδραση της κάθε παραμέτρου στην κωνικότητα της επιφάνειας κοπής.

Επίδραση της κάθε παραμέτρου (Effect of each parameter)			
ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 3
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΟΠΗΣ	-0,00650559	-0,2082473	0,214752889
ΕΝΤΑΣΗ ΚΟΗΣ	-0,330109432	-0,568136004	0,898245437
ΥΨΟΣ ΚΟΠΗΣ	-1,419391029	0,449802456	0,969588573
ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΚΟΠΗΣ	-0,132355276	-0,165212751	0,297568027

Πίνακας 5.7: Επίδραση της κάθε παραμέτρου στην θερμικά επιρρεασθείσα περιοχή (HAZ) της επιφάνειας κοπής.

Επίδραση της κάθε παραμέτρου (Effect of each parameter)			
HAZ	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 3
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΟΠΗΣ	-1,257635827	-0,040603602	1,298239429
ΕΝΤΑΣΗ ΚΟΗΣ	0,521535636	-0,511144098	-0,010391538
ΥΨΟΣ ΚΟΠΗΣ	0,310448914	0,090033438	-0,400482352
ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΚΟΠΗΣ	0,736100191	0,05099514	-0,787095332

Πίνακας 5.8: Επίδραση της κάθε παραμέτρου στην τραχύτητα (Ra) της επιφάνειας κοπής.

Επίδραση της κάθε παραμέτρου (Effect of each parameter)			
ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 3
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΟΠΗΣ	-0,527005707	0,269486942	0,257518764
ΕΝΤΑΣΗ ΚΟΗΣ	-0,038497259	0,378132686	-0,339635428
ΥΨΟΣ ΚΟΠΗΣ	1,364889375	-0,00393685	-1,360952525
ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΚΟΠΗΣ	0,030357377	0,058933938	-0,089291315

Επόμενο βήμα αποτελεί ο υπολογισμός του ολικού αθροίσματος τετραγώνων, και του αθροίσματος τετραγώνων για κάθε παράγοντα. Αυτό υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης που ακολουθεί:

Άθροισμα τετραγώνων ανά παράγοντα:

$$N [S_n]_F = \sum_{j=1}^m m \left(\left[\frac{S}{N} \right] F_j - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{S}{N} \right] i \right)^2 \quad (5.4)$$

Ολικό άθροισμα τετραγώνων:

$$[S_n]_{\text{Total}} = \sum_{i=1}^n \left(\left[\frac{S}{N} \right] i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{S}{N} \right] i \right)^2 \quad (5.5)$$

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα για το άθροισμα τετραγώνων για κάθε παράγοντα.

ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΤΕΤ ΑΝΑ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ (Sum of squares due to factor)			
(Sn)	ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ	Θ.Ε.Π (HAZ)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΟΠΗΣ	0,268584192	9,806166428	1,250022423
ΕΝΤΑΣΗ ΚΟΗΣ	3,715786862	1,600127075	0,779455774
ΥΨΟΣ ΚΟΠΗΣ	9,471285425	0,794611988	11,14539084
ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΚΟΠΗΣ	0,400079707	3,491889173	0,037103155

Για να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα είναι απαραίτητο να γίνει υπολογισμός των βαθμών ελευθερίας (degrees of freedom). Ξεκινώντας έναν βαθμό ελευθερίας έχει το ολικό μέσο (overall mean) ανεξαρτήτως του αριθμού των παραγόντων που μελετάμε [17]. Ένας παράγοντας που έχει τρία επίπεδα έχει δύο βαθμούς ελευθερίας, διότι για ένα παράγοντα τριών επιπέδων A, ενδιαφερόμαστε για δύο συγκρίσεις.

Θέτοντας οποιοδήποτε επίπεδο (π.χ A1), ως βασικό επίπεδο, μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε πως ο παράγοντας συμπεριφέρεται όταν το επίπεδο αλλάζει σε A2, A3. Γενικά, ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας που έχει ένας παράγοντας ισούται με έναν λιγότερο από τον αριθμό των επιπέδων του παράγοντα αυτού.

Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται οι βαθμοί ελευθερίας το άθροισμα των τετραγώνων καθώς και το μέσο άθροισμα τετραγώνων που υπολογίζεται με τον τύπο που ακολουθεί:

$$\text{Μέσο άθροισμα τετραγώνων (MSn)} = S_n / \text{Βαθμοί ελευθερίας (dof)} \quad (5.6)$$

Πίνακας 5.10: Βαθμοί ελευθερίας ,άθροισμα τετραγώνων, συνολικό και μέσο άθροισμα τετραγώνων για την κωνικότητα.

	ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ	SN	MSN
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΟΠΗΣ	2	0,26858	0,13429
ΕΝΤΑΣΗ ΚΟΗΣ	2	3,71579	1,857895
ΥΨΟΣ ΚΟΠΗΣ	2	9,47129	4,735645
ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΚΟΠΗΣ	2	0,40008	0,20004
ΣΦΑΛΜΑ	0	3,53469E-12	
ΣΥΝΟΛΟ	8	13,85574	

Πίνακας 5.11: Βαθμοί ελευθερίας ,άθροισμα τετραγώνων, συνολικό και μέσο άθροισμα τετραγώνων για την θερμικά επιρρεασθείσα περιοχή.

	ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ	SN	MSN
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΟΠΗΣ	2	9,8062	4,9031
ΕΝΤΑΣΗ ΚΟΗΣ	2	1,6001	0,80005
ΥΨΟΣ ΚΟΠΗΣ	2	0,7946	0,3973
ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΚΟΠΗΣ	2	3,4919	1,74595
ΣΦΑΛΜΑ	0	2,33581E-09	
ΣΥΝΟΛΟ	8	15,6928	

Πίνακας 5.12: Βαθμοί ελευθερίας ,άθροισμα τετραγώνων, συνολικό και μέσο άθροισμα τετραγώνων για την τραχύτητα.

	ΒΑΘΜΟΙ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ	SN	MSN
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΟΠΗΣ	2	1,250022	0,625011
ΕΝΤΑΣΗ ΚΟΗΣ	2	0,779456	0,389728
ΥΨΟΣ ΚΟΠΗΣ	2	11,14539	5,572695
ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΚΟΠΗΣ	2	0,037103	0,0185515
ΣΦΑΛΜΑ	0	2,68E-13	
ΣΥΝΟΛΟ	8	13,211971	

Τέλος για να υπολογίσουμε την επίδραση του κάθε παράγοντα στο τελικό αποτέλεσμα αρκεί να διαιρέσουμε το άθροισμα τετραγώνων του κάθε παράγοντα με το συνολικό άθροισμα τετραγώνων. Αυτό εκφράζεται με τον τύπο:

$$F_{\text{Resp}} = 100 \frac{[S_n]F}{[S_n]_{\text{Total}}} \% \quad (5.7)$$

Πίνακας 5.13:Επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας.

% ΕΠΙΔΡΑΣΗ		
ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ	Θ.Ε.Π (HAZ)	ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ
1,938402424	62,48852977	9,461283256
26,81769433	10,1963958	5,899619368
68,35643567	5,063468597	84,35826872
2,887467577	22,25160583	0,280828652

Παρακάτω ακολουθούν τα ποσοτικά διαγράμματα που μας δείχνουν το ποσοστό επιρροής του κάθε παράγοντα.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: % επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας στην κωνικότητα.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: % επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας στην Θ.Ε.Π (HAZ).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: % επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας στην τραχύτητα.



Από τα παραπάνω γραφήματα συμπεραίνουμε πως για την περίπτωση της κωνικότητας μεγάλη επιρροή ασκούν οι παράγοντες ύψος κοπής και ένταση κοπής. Για την περίπτωση της Θ.Ε.Π μεγάλη επιρροή ασκούν οι παράγοντες ταχύτητα κοπής και πίεση αερίου κοπής, ενώ για την περίπτωση της τραχύτητας κυρίως το ύψος κοπής αλλά και η ένταση κοπής ασκούν μεγάλη επιρροή.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

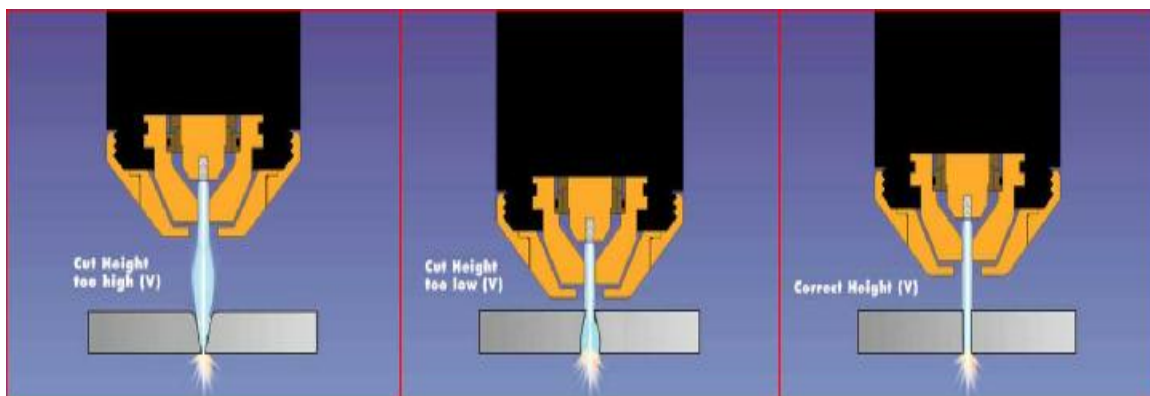
6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι τεχνολογίες οι οποίες βασίζονται στο θερμικό αποτέλεσμα του πλάσματος κατέχουν μια πολύ σημαντική θέση στο πεδίο των μη συμβατικών κατεργασιών. Σε αντίθεση με άλλες κατεργασίες στην κατεργασία κοπής με πλάσμα για να πετύχεις καλά αποτελέσματα πρέπει να ξέρεις καλά την διαδικασία. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να ξέρεις ακριβώς τις παραμέτρους που εμπλέκονται στην διαδικασία καθώς και την επιρροή που ασκούν.

Μελετώντας λοιπόν την επιρροή των παραγόντων στην ποιότητα της κοπής και χρησιμοποιώντας τα γραφήματα του 5^{ου} κεφαλαίου φτάνουμε στα συμπεράσματα που ακολουθούν.

6.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΤΗΝ ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ

Όσον αφορά την κωνικότητα βλέπουμε πως πολύ σημαντικό ρόλο παίζει ο παράγοντας ύψος κοπής. Η εξήγηση του αποτελέσματος αυτού βρίσκεται στο ότι η δέσμη του πλάσματος δεν είναι μία κυλινδρικής μορφής δέσμη αλλά μοιάζει σχηματικά με ανεστραμμένη φλόγα κεριού. Επομένως ανάλογα με το σημείο στο οποίο βρίσκεται η δέσμη σε σχέση με το κομμάτι μεταβάλλεται και η κωνικότητα [13,24]. Αυτό φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν:



Εικόνα 6.1: Αριστερά μεγάλο ύψος κοπής, κέντρο μικρό ύψος κοπής, δεξιά κανονικό ύψος κοπής.

Επίσης βλέπουμε πως και ο παράγοντας ένταση κοπής ασκεί επιρροή στην κωνικότητα. Αυτό έχει να κάνει με τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού, μικρή ένταση κοπής συνεπάγεται αύξηση της κωνικότητας. Λόγο μικρού ρυθμού αφαίρεσης υλικού έχουμε σαν αποτέλεσμα την αφαίρεση υλικού κυρίως στο επάνω μέρος του δοκιμίου με αποτέλεσμα την αύξηση της κωνικότητας. Ουσιαστικά το μεγαλύτερο ποσό της ενέργειας καταναλώνεται στο επάνω μέρος της επιφάνειας κοπής με αποτέλεσμα την δημιουργία της κωνικότητας αυτής.

Το φαινόμενο αυτό έχει και σαν αποτέλεσμα την δημιουργία επιφανειακής καμπυλότητας (top edge rounding) ένα πρόβλημα που περιγράψαμε και στο 2^ο κεφάλαιο της πτυχιακής αυτής εργασίας. Επίσης μέσω της ανάλυσης του μέσου (ANOM) και του γραφήματος (5.1) του προηγούμενου κεφαλαίου παρατηρούμε πως μικρότερη κωνικότητα έχουμε όταν η ένταση κοπής είναι μέγιστη. Επίσης πρέπει να αναφερθεί πως στο συγκεκριμένο πείραμα για να μπορούμε να ελέγχουμε το ύψος κοπής η αυτόματη προσαρμογή του ύψους κοπής απενεργοποιήθηκε (torch height control). Αυτό σημαίνει ότι αύξηση του ύψους κοπής συνεπάγεται ανάλογη αύξηση της τάσης κοπής. Η αύξηση της τάσης κοπής με την σειρά της ή οποία είναι και τάση ιονισμού έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού ιονισμένου αερίου. Αυτό οδηγεί στην αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού άρα και στην μείωση της κωνικότητας.

6.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΤΗΝ Θ.Ε.Π (HAZ)

Όσον αφορά την Θ.Ε.Π (HAZ) βλέπουμε πως ο παράγοντας που ασκεί την μεγαλύτερη επιρροή είναι η ταχύτητα κοπής. Όπως είναι λογικό μικρή ταχύτητα κοπής έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια κοπής, αφού αυτή μένει περισσότερο χρόνο σε επαφή με το τόξο. Επίσης από την ανάλυση των μέσων (ANOM) που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο, βλέπουμε μέσω του γραφήματος (5.2) πως το επίπεδο που μας δίνει την μικρότερη Θ.Ε.Π είναι το τρίτο. Δηλαδή το επίπεδο όπου η ταχύτητα κοπής είναι μέγιστη. Σημαντική επιρροή ασκεί επίσης η πίεση του αερίου κοπής. Αυτό οφείλεται στο ποσό της θερμότητας που παράγεται στο τόξο καθώς μεγάλη παροχή αερίου κοπής συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας στο τόξο, άρα και στην προς κατεργασία επιφάνεια. Επίσης στο γράφημα 5.2 παρατηρούμε πως για μείωση της Θ.Ε.Π το βέλτιστο επίπεδο είναι το ένα, δηλαδή το επίπεδο που η πίεση του αερίου κοπής είναι μικρότερη.

6.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ

Για την τραχύτητα παρατηρούμε πως πολύ μεγάλη επιρροή ασκεί ο παράγοντας ύψος κοπής καθώς επίσης σε μικρότερο βαθμό η ταχύτητα κοπής. Γενικά η τραχύτητα είναι ένα στοιχείο καθοριστικής σημασίας στην ποιότητα κοπής, αυτός είναι και ο λόγος που δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στην εξέταση αυτού του ποιοτικού χαρακτηριστικού. Στην τεχνολογία κοπής τόξου πλάσματος η τραχύτητα συνδέεται άμεσα με ένα στοιχείο, την σταθερότητα του τόξου. Όσο πιο σταθερό είναι το τόξο τόσο μικρότερη τραχύτητα έχουμε. Όταν η ταχύτητα κοπής γίνει πολύ μεγάλη, έχουμε σαν αποτέλεσμα ο πυρσός να κινείται πολύ γρήγορα ενώ ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού να μένει σταθερός. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το τόξο να χάνει την σταθερότητα του και ουσιαστικά να μένει πίσω. Αποτέλεσμα της συμπεριφοράς αυτής είναι το τόξο να μην είναι κάθετο στην επιφάνεια κατεργασίας, αλλά να παίρνει κλίση με αποτέλεσμα τον σχηματισμό κυματοειδών γραμμών (drag lines), πρόβλημα που αναφέρθηκε και στο δεύτερο κεφάλαιο, που είναι υπεύθυνες για την αύξηση της τραχύτητας.

Αντιθέτως πολύ μικρή ταχύτητα κοπής έχει σαν αποτέλεσμα εντονότερη αφαίρεση υλικού, το περισσότερο αυτό υλικό είναι πλέον δύσκολό να απομακρυνθεί από την δέσμη του πλάσματος και καθώς επαναστεροποιείται δημιουργεί μεγάλη τραχύτητα. Το ύψος κοπής τώρα έχει άμεση σχέση με όσα αναφέρθηκαν διότι όσο μεγαλύτερο ύψος κοπής έχουμε, τόσο πιο μεγάλο είναι το μήκος του τόξου και επομένως πιο μεγάλη η κλίση που παίρνει. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό έντονων κυματοειδών γραμμών που συντελούν στην αύξηση της τραχύτητας. Αυτό φαίνεται και στο γράφημα (5.3) του προηγούμενου κεφαλαίου όπου βλέπουμε πως για την βελτίωση του συντελεστή τραχύτητας το βέλτιστο επίπεδο για το ύψος κοπής είναι το πρώτο δηλαδή όταν το ύψος κοπής είναι ελάχιστο.

Επίσης από το γράφημα (4.3) της 2^{ης} φάσης της πειραματικής διαδικασίας βλέπουμε για ακόμα μια φορά πως αύξηση του ύψους κοπής συνεπάγεται αύξηση της τραχύτητας.

Γενικά παρατηρούμε πως το ύψος κοπής σαν παράγοντας ασκεί πολύ μεγάλη επιρροή στα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο τα τελευταία χρόνια υπάρχει μεγάλη εξέλιξη στα συστήματα αυτόματης ρύθμισης του ύψους κοπής (torch height control).

6.5 ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗΣ

6.5.1 Βέλτιστα επίπεδα πειράματος επιβεβαίωσης

Με την ανάλυση που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο καταλήξαμε στην αναγνώριση των επιπέδων εκείνων που για κάθε παράγοντα μας δίνουν το καλύτερο αποτέλεσμα για το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό που θέλουμε να βελτιώσουμε, διαδικασία η οποία αποτελεί το 6^ο βήμα του σχεδιασμού πειραμάτων. Αυτό έγινε μέσω της μεθόδου ανάλυσης των μέσων (ANOM) και τα αποτελέσματα της φαίνονται συγκεντρωτικά στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 6.1: Βέλτιστα επίπεδα ανά ποιοτικό χαρακτηριστικό.

Ποιοτικά χαρακτηριστικά	Ταχύτητα κοπής	Ένταση κοπής	Ύψος κοπής	Πίεση αερίου κοπής
Κωνικότητα	Επίπεδο 3	Επίπεδο 3	Επίπεδο 3	Επίπεδο 3
Θ.Ε.Π	Επίπεδο 3	Επίπεδο 1	Επίπεδο 1	Επίπεδο 1
Τραχύτητα	Επίπεδο 2	Επίπεδο 2	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2

Επόμενο βήμα (7^ο σχεδιασμού πειραμάτων) αποτελεί η διεξαγωγή του πειράματος επιβεβαίωσης. Για την διαδικασία αυτή απαιτούνται τρία πειράματα ένα για το κάθε ποιοτικό χαρακτηριστικό που θέλουμε να βελτιώσουμε. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι τιμές των βέλτιστων επιπέδων που θα χρησιμοποιηθούν στα πειράματα.

Πίνακας 6.2: Βέλτιστες τιμές επιπέδων ανά ποιοτικό χαρακτηριστικό

Αριθμός πειράματος	Ποιοτικά χαρακτηριστικά	Ταχύτητα κοπής	Ένταση κοπής	Ύψος κοπής	Πίεση αερίου κοπής
1	Κωνικότητα	2730	240	8,1	90
2	Θ.Ε.Π	2730	180	4,1	60
3	Τραχύτητα	2275	210	4,1	75
(ΜΟΝΑΔΕΣ)		(mm/min)	(l)	(mm)	(psi)

6.5.2 Αποτελέσματα πειράματος επιβεβαίωσης

Μετά την διεξαγωγή των πειραμάτων επιβεβαίωσης τα αποτελέσματα μετρήθηκαν με τον ίδιο τρόπο όπως στο τέταρτο κεφάλαιο. Για την κωνικότητα η τιμή που μετρήθηκε είναι 6.925, για την Θ.Ε.Π 278.85 μm και για την τραχύτητα 0.6226 μm .

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα τραχύτητας πειράματος επιβεβαίωσης.

Μέτρηση τραχύτητα πειράματος επιβεβαίωσης (μm)					
Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	Σημείο 4	Σημείο 5	Μ.Ο (Ra)
0,599	0,642	0,628	0,608	0,636	0,6226

Επόμενο στάδιο αποτελεί η σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων με τις βέλτιστες τιμές των προηγούμενων πειραμάτων που αναφέρονται στο τέταρτο κεφάλαιο. Στο οποίο έχουμε για την κωνικότητα 7.43, για την Θ.Ε.Π 325 μm και για την τραχύτητα 0.723 μm .

Τα αποτελέσματα του πειράματος επιβεβαίωσης έδειξαν μια συνολική μείωση σε όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά σε σχέση με αυτά τα οποία μετρήθηκαν κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Πιο συγκεκριμένα ρυθμίζοντας τις παραμέτρους στις βέλτιστες τιμές, η κωνικότητα μειώθηκε κατά 6,8%, η Θ.Ε.Π κατά 14,2% και η τραχύτητα κατά 14%.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γιώργος Ν. Ταγαράς, “Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας”, Εκδ. Ζήτη, ISBN:960-431-706-7, 2001.
- [2] Gyung- Jin Park, “*Analytic Methods for Design Practice*”, Springer, ISBN: 978-1-84628-472-4, 2007.
- [3] Douglas C. Montgomery, George C. Runger, Norma F. Hubele, “*Engineering Statistics*”, Wiley, ISBN: 0-471-17026-7.
- [4] S.K. Choudhury, G. Bartarya, “*Role of temperature and surface finish in Predicting tool wear using neural network and design of experiments*”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, pages 747–753, 2003.
- [5] I.A. Choudhury, M.A. El-Baradie, “*Tool-life prediction model by design of experiments for turning high strength steel (290 BHN)*”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 77, pages 319–326, 1998.
- [6] Christopher Chatfield, “*Statistics for technology*”, Chapman and Hall, third edition, 1983.
- [7] Marinescu, N.I., Nanu, D., Lăcătuș, E. et al. Manufacturing processes, (2000).
- [8] Hypertherm Inc. What is plasma. www.hypertherm.com
- [9] Nemchinsky, V.A., Severance, W.-S., What we know and what we do not know about Plasma arc cutting J. Phys. D: Appl. Phys. 39 (2006) R423 – R438.
- [10] Slătineanu, L., Nagǎț, Gh., Dodun, O., Coteață, et.al., Non-traditional manufacturing processes, Editura Tehnica-Info, Kishinew. (2004).
- [11] C. H. C. HaronK, Kadirgama, M. M. Noor, M. M. Rahman, M. R. M. Rejab, K. A. Abou-El-Hossein. European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.25 No.2 (2009), pp.250-256
- [12] Dobre, M., Nistor, R. Plasma physics. Course for students use, Bucharest, Publisher: Polytechnic University of Bucharest, Physics Departament, Romania. (1996).
- [13] Dave Cook .Torch Height Control for Plasma Cutting " Welding Design & Fabrication" - March 2000
- [14] J.A. Hogan and J.B. Lewis, "Plasma Processes of Cutting and Welding". (Project Report by Bethlehem Steel Corporation in cooperation with U.S. Maritime Administration 1976). Adapted from "20 Years To Practical Plasma", Hypertherm.
- [15] A.P.Hoult, I.R. Pashby, K. Chan. Fine plasma cutting of advanced aerospace materials. Journal of Materials Processing Technology 48 (1995) 825-831
- [16] Sanda-Maria Ilii, Margareta CoteaÑă & Adriana Munteanu. Experimental results concerning the variation of surface roughness parameter (ra) at plasma arc cutting of a stainless steel workpiece. International Journal of Modern Manufacturing Technologies ISSN 2067–3604, Vol. II, No. 1 / 2010

- [17] Madhav S. Phadke. Quality engineering using robust design. Published by P T R Prentice-Hall, Inc 1989 by AT&T Bell Laboratories.
- [18] Μανταλία Γεωργία. Μελέτη των δυνάμεων κοπής στις κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων. Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο. Τμήμα μηχανολόγων μηχανικών, τομέας τεχνολογίας των κατεργασιών. Αθήνα 2009.
- [19] Nemchinsky VA (1998) Plasma flow in a nozzle during plasma arc cutting. J Phys D Appl Phys.
- [20] Δουλγέρης Ηλίας. Βελτιστοποίηση ποδιών αράχνης μήτρας εκβολής πλαστικού σωλήνα. Αθήνα, Ιούλιος 2010.
- [21] Jia Deli , You Bo. An intelligent control strategy for plasma arc cutting technology. Harbin University of Science and Technology, China 13 April 2010.
- [22] A. Stournaras, P. Stavropoulos, K. Salonitis, G. Chryssolouris. An investigation of quality in CO2 laser cutting of aluminum. Laboratory for Manufacturing Systems and Automation, Department of Mechanical Engineering and Aeronautics, University of Patras, Greece 2009.
- [23] Shaofeng Guo • Qianhong Zhou • Wenkang Guo • Ping Xu. Computational Analysis of a double nozzle structure. Springer Science+Business Media, LLC 2009.
- [24] Joseph V. Warren. The Contribution of Arc Voltage Control to Quality Plasma Cutting. ESAB Cutting Systems, 2005.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παρακάτω παρουσιάζεται μέρος του κώδικα κοπής που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων και συγκεκριμένα της τέταρτης φάσης της πειραματικής διαδικασίας:

(Version 1.0)
(Path: G:\KODIKAS NC.NC)
(11/25/11 07:01:15)

(Installed by Lukasz Marks)
(Assisted by Lukasz Rasala)
(Total Number of Drills: 24)
(Drill of 10 : 24)

%00005200

(Tool T1)
N2 EXB10=1
N3 EXF11=10 (Δήλωση εργαλείων, στην περίπτωση μας διαμέτρου 10 χιλιοστών)
N4 EXF12=0
N5 EXB15=0
N6 EXF16=0
N7 EXF17=0

(Tool T2)
N8 EXB20=0
N9 EXF21=0.0
N10 EXF22=0.0
N11 EXB25=0
N12 EXF26=0.0
N13 EXF27=0.0

(Tool T3)
N14 EXB30=0
N15 EXF31=0.0
N16 EXF32=0.0
N17 EXB35=0
N18 EXF36=0.0
N19 EXF37=0.0

(Tool T4)
N20 EXB40=0
N21 EXF41=0.0
N22 EXF42=0.0

N23 EXB45=0
N24 EXF46=0.0
N25 EXF47=0.0

(Tool T5)

N26 EXB50=0
N27 EXF51=0.0
N28 EXF52=0.0
N29 EXB55=0
N30 EXF56=0.0
N31 EXF57=0.0

(Tool T6) (Το μηχάνημα έχει δυνατότητα συγκράτησης 6 εργαλείων)

N32 EXB60=0
N33 EXF61=0.0
N34 EXF62=0.0
N35 EXB65=0
N36 EXF66=0.0
N37 EXF67=0.0
N38 M07
N39 M04

N40 EXB0=2
N41 MW1=1
N42 EXF0=15.000
N43 EXF1=1200.000
N44 EXF2=1000.000
N45 EXF3=135.000
N46 EXF5=1.5
N47 FR8
N48 MF9=0.000
N49 MF10=144.000
N50 MF11=0
N51 M06

N52 M04

(Start Drilling) (Έναρξη κατεργασίας διάτρησης)

N896 MW2=1
N897 Lsrdrill

(Normal Drill)

N898 MW4=1
N899 MF5=10.000
N900 MF6=0
N901 G00 X16.500 Y5.000 M203
N902 M50

(Normal Drill)

N903 MW4=1
N904 MF5=10.000

N905 MF6=0
N906 G00 X16.500 Y191.000 M203
N907 M50

(Επανάληψη του κύκλου κατεργασίας διάνοιξης οπών για τις υπόλοιπες 22 τρύπες)

(Brush) (Σκούπα για την απομάκρυνση του γρεζιού)

N1018 R1=98.415
N1019 Lsrbrush
N1020 M04

(Start Burning) (Έναρξη κοπής)

N1021 MW2=1
N1022 Lsrplasma
N1023 G00 X34.657 Y26.061

(Interior Contour) (Κοπή πρώτου δοκιμίου εσωτερικά)

N1024 M34
N1025 G01 X43.097 Y34.500
N1026 G01 X46.500 Y34.500
N1027 G01 X46.500 Y184.500
N1028 G01 X39.500 Y184.500
N1029 G01 X39.500 Y34.500
N1030 G01 X44.218 Y34.500
N1031 M31
N1032 MW8=3
N1033 G00 X74.218 Y134.500
N1034 M00
N1035 G00 X16.500 Y10.000

(Exterior Contour) (Κοπή πρώτου δοκιμίου εξωτερικά)

N1036 M34
N1037 G01 X16.500 Y18.000
N1038 G01 X16.500 Y189.500
N1039 G01 X69.500 Y189.500
N1040 G01 X69.500 Y16.500
N1041 G01 X18.000 Y16.500
N1042 G01 X15.000 Y16.500
N1043 M31
N1044 M91 (Nestings\2\2520\plak st!)
N1045 MW8=3
N1046 G00 X45.000 Y116.500
N1047 M00
N1048 G00 X34.647 Y212.061

(Επανάληψη διαδικασίας για τα υπόλοιπα δοκίμια)

(Segment Cut) (τελικό κόψιμο, καθάρισμα λαμαρίνας)

N1326 Lsrscstar
N1327 G01 X144.000 Y1200.000
N1328 M03
N1329 M30

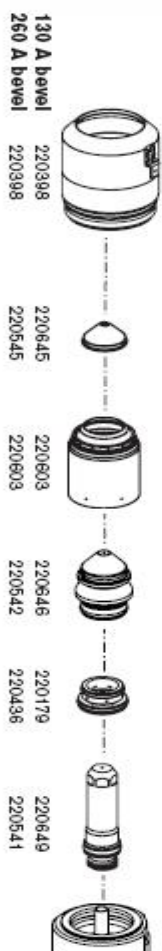
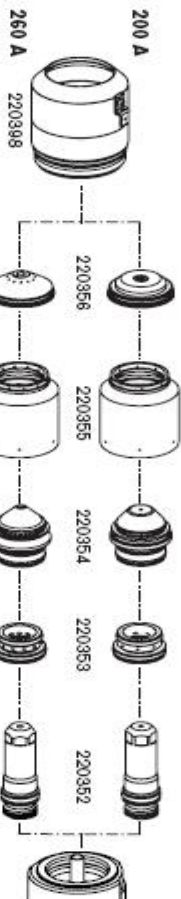
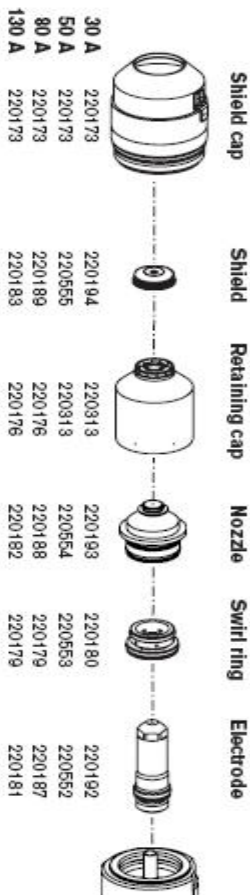
Αναλώσιμα πυρσού τόξου πλάσματος για την εργαλειομηχανή KF 2512:

**Hyperformance® Plasma
HPR260™**

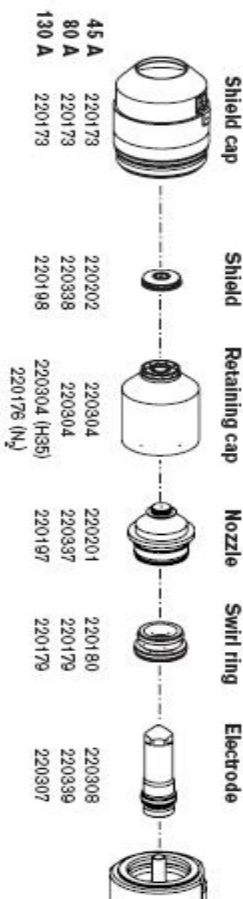
Consumables



Mild steel



Stainless steel



Πίνακας για την επιλογή του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα:

		Αριθμός Παραμέτρων / Μεταβλητών																		
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Αριθμός Επιπέδων	2	L4	L4	L8	L8	L8	L8	L12	L12	L12	L12	L16	L16	L16	L16	L32	L32	L32	L32	L32
	3	L9	L9	L9	L18	L18	L18	L18	L27	L27	L27	L27	L27	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36
	4	L'16	L'16	L'16	L'16	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32										
	5	L25	L25	L25	L25	L25	L50	L50	L50	L50	L50	L50								

Χημικές και μηχανικές ιδιότητες μαλακού χάλυβα τύπου s235:

Characteristics of the material S235 (S235, C235).

Material :	S235 (S235, C235)
Substitute:	СТ3кп2
Classification :	Steel for structural constructions

Chemical composition in % of the material S235 (S235, C235).

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu
max 0.22	max 0.05	max 0.6	max 0.3	max 0.05	max 0.04	max 0.3	max 0.012	max 0.3

Mechanical properties under T=20°C of the material S235 (S235, C235).

Assortment	Dimension	Direct.	S _B	S _T	d ₅	y	KCU	Heat treatment
-	mm	-	MPa	MPa	%	%	kJ / m ²	-
Sheet	2 - 3.9		360	235	20			

Technological properties of the material S235 (S235, C235).

Weldability:	without limitations.
---------------------	----------------------

Specification :

Mechanical properties :

- S_B** - Tensile strength , [MPa]
- S_T** - Yield stress, [MPa]
- d₅** - Specific elongation at fracture , [%]
- y** - Reduction of area , [%]
- KCU** - Impact strength , [kJ / m²]
- HB** - Brinell hardness , [MPa]