



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Βελτιστοποίηση στίλβωσης επίπεδων μεταλλικών επιφανειών σε
κέντρα κατεργασιών CNC**

Θεόδωρος Μητρόπουλος

Επιβλέπων: Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2017

Περίληψη

Η στίλβωση μεταλλικών επιφανειών αποτελεί ερευνητικό πεδίο με ιδιαίτερο ενδιαφέρον κυρίως λόγω των βιομηχανικών εφαρμογών της, ειδικά στην βιομηχανία κατασκευής μεταλλικών καλουπιών, όπου ευθύνεται για το 15-70% του συνολικού κόστους ενός καλουπιού. Παρόλα αυτά λόγω της πολυπλοκότητας τους οι διεργασίες αυτές εκτελούνται ακόμα επί το πλείστον χειροκίνητα από έμπειρους τεχνίτες με πολλά έτη εμπειρίας στο αντικείμενο. Έτσι η στίλβωση καθίσταται ως μια χρονοβόρα, επίπονη διαδικασία που αφήνει μικρά περιθώρια λάθους. Όλα τα παραπάνω τονίζουν την ανάγκη και τα πλεονεκτήματα της αυτοματοποίησης μια τέτοιας διεργασίας.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η βελτιστοποίηση και η απόδειξη της λειτουργικότητας συστήματος στίλβωσης που προσαρμόζεται σε κέντρο κατεργασιών CNC και έχει σχεδιαστεί με σκοπό την αυτόματη στίλβωση μεταλλικών επιφανειών, εκμεταλλευόμενο στιλβωτικούς δακτυλίους.

Για την εξυπηρέτηση του σκοπού αυτού έγινε μια σειρά τροποποιήσεων στην υπάρχουσα συσκευή με στόχο την βελτίωση της απόδοσης της. Έτσι, διασφαλίστηκε ο πλήρης και ακριβής έλεγχος όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν τη διεργασία καθώς και η σταθερότητα του συστήματος.

Κατόπιν, έγινε σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας στοχεύοντας αφενός στην εύρεση των βέλτιστων συνθηκών της κατεργασίας και αφετέρου στην τυποποίηση μεθόδου ικανής να χρησιμοποιηθεί σε περίπτωση αλλαγών επί του συστήματος. Έγιναν ανάλυση της στιλβωτικής μεθόδου σε τρία μέρη και σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας για κάθε ένα από αυτά. Με την διεξαγωγή των πειραμάτων προέκυψαν οι βέλτιστες συνθήκες για κάθε στάδιο της διεργασίας καθώς και το ποσοστό επιρροής του κάθε παράγοντα στο αποτέλεσμα.

Για την επιβεβαίωση των τιμών που προέκυψαν από τα πειράματα και την απόδειξη της λειτουργικής ικανότητας του συστήματος έγινε πρακτικά δυνατή η εφαρμογή σε επίπεδη μεταλλική επιφάνεια. Η εφαρμογή στέφθηκε με επιτυχία, παράγοντας επιφάνεια 'καθρέπτη' με μικρή τιμή επιφανειακής τραχύτητας και καλή ομοιομορφία.

Τα αποτελέσματα της εργασίας δείχνουν ότι το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές εφαρμογές για τη στίλβωση επίπεδων μεταλλικών επιφανειών με ικανοποιητικά αποτελέσματα και ότι η πειραματική μέθοδος που αναπτύχθηκε κρίνεται ικανή να παράγει τις βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας κατά περίπτωση.

Abstract

Metal surface polishing is a scientific field of great interest, mostly due to its industrial applications, especially in the metal die industry, making up 15 to 70% of the total cost of a die or mould. Despite that, and due to their complexity, such processes are still mostly carried out manually by experienced technicians with many years of expertise. As a result, polishing is considered a time consuming, painstaking process that leaves no room for error. All the above accentuate the need and the advantages of the automation of such a process.

The aim of the current study is to optimize a polishing system that utilizes a cnc machining center and polishing-rings, to automatically polish metal surfaces and to prove its functionality.

To achieve the above, a series of modifications have been implemented to an existing device in order to improve its output. Via those modifications, full and accurate control over the factors that affect the polishing process as well as system stability where achieved.

Furthermore, an experimental method was designed aiming to determine the optimum conditions for the process and to be standardized and used when changes on the system are applicable. The polishing process was analyzed and divided in three separate stages and an experiment was designed for each. Carrying out the experiments resulted in the determination of the optimum conditions for each stage, along with the contribution of each factor.

To verify the results and to prove the system's functionality, a practical application was executed on a flat steel surface. The application was successful, producing a 'mirror-like' surface with low roughness and satisfactory uniformity.

The outcome of the study shows that the system can be utilized in realistic polishing applications for flat metal surfaces with good results and that the experimental method that was designed can produce reliable information about the optimum process conditions.

Στη Μαρία και στην Ελένη.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω της ευγνωμοσύνη μου στα άτομα που συνέβαλαν σημαντικά στην πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας. Αρχικά και κύρια στον κ. Γεώργιο Βοσνιάκο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάληψη του θέματος και για την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης του. Έπειτα, ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στον Παναγιώτη Αβράμπο στου οποίου την προηγούμενη εργασία βασίστηκε η παρούσα δουλειά, και ο οποίος συνέβαλλε ουσιαστικά στην εισαγωγή μου στο αντικείμενο τη στίλβωσης, καθώς και στην κατανόηση της λειτουργίας του εξοπλισμού και του τρόπου διεξαγωγής της διεργασίας.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών, και, πιο συγκεκριμένα, τον Νίκο Μελισσά και τον Κώστα Κερασιώτη για τις τεχνικές τους συμβουλές και την καθοδήγηση τους σε πληθώρα τεχνικών θεμάτων καθώς και τους κκ. Καθ. Ι. Αντωνιάδη και Δρα Χ. Γιακόπουλο του εργαστηρίου Δυναμικής και Κατασκευών του ΕΜΠ για την διάθεση του οπτικού στροφομέτρου που χρησιμοποιήθηκε. Τέλος, ευχαριστώ τους μεταπτυχιακούς-διδακτορικούς φοιτητές Φωτεινό Ρογάρη, Γιώργο Λειβαδιωτάκη, Γιώργο Παπαζέτη και Φοίβο Ψαρομμάτη για τη βοήθεια τους στην εκμάθηση της χρήσης των κέντρων κατεργασιών του Εργαστηρίου, καθώς και για τις συμβουλές τους σε θέματα που αφορούσαν την εργασία.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract.....	2
Ευχαριστίες	4
Περιεχόμενα	5
Κατάλογος Σχημάτων.....	7
Κατάλογος Πινάκων	9
1 Εισαγωγή.....	10
1.1 Σκοπός Εργασίας.....	10
1.2 Βιβλιογραφική έρευνα	10
1.3 Δομή εργασίας	12
2 Γενικά στοιχεία	14
2.1 Περί στίλβωσης.....	14
2.2 Σύστημα Ring-Finish της NOVAPAX.....	19
2.2.1 Περιγραφή εξοπλισμού	19
2.2.2 Περιγραφή μεθόδου στίλβωσης	20
3 Προϋπάρχον υπόβαθρο.....	24
4 Τροποποιήσεις στην συσκευή στίλβωσης	30
4.1 Εισαγωγή.....	30
4.2 Έλεγχος της ασκούμενης δύναμης.....	30
4.2.1 Στοιχεία θεωρίας	31
4.2.2 Περιγραφή του προβλήματος – Προδιαγραφές σχεδιασμού.....	43
4.2.3 Στρατηγική σχεδιασμού.....	44
4.2.4 Κατασκευή ελατηρίων - μετρήσεις.....	47
4.3 Λοιπές τροποποιήσεις στη συσκευή.....	49
4.4 Περιγραφή και τροποποιήσεις στην πειραματική διάταξη	50
5 Σχεδιασμός πειραμάτων στίλβωσης.....	55
5.1 Εισαγωγή.....	55
5.2 Θεωρία Σχεδιασμού Πειραμάτων (DoE)	55
5.2.1 Μέθοδος της καλύτερης πρόβλεψης (best guess approach)	56
5.2.2 Μέθοδος της μεταβολής του κάθε παράγοντα ξεχωριστά (one factor at a time)	56
5.2.3 Μέθοδος της πλήρους παραγοντοποίησης (full factorial experiments).....	57
5.2.4 Μέθοδος της κλασματικής παραγοντοποίησης (fractional factorial experiments).....	57
5.3 Μέθοδος Taguchi.....	58
5.4 Ανάλυση των αποτελεσμάτων.....	65

5.5	Τελικός σχεδιασμός των πειραμάτων	70
6	Διεξαγωγή πειραμάτων - αποτελέσματα.....	76
6.1	Εισαγωγή.....	76
6.2	Έκθεση αποτελεσμάτων	76
6.2.1	Πείραμα λείανσης.....	76
6.2.2	Πείραμα στίλβωσης με μπρούτζινο εργαλείο (Lapping)	79
6.2.3	Πείραμα στίλβωσης με πλαστικό εργαλείο (Fine lapping):	81
6.3	Παρατηρήσεις στα πειράματα	84
7	Πρακτική εφαρμογή.....	85
7.1	Εισαγωγή.....	85
7.2	Περιγραφή εφαρμογής	85
7.3	Αποτελέσματα.....	87
8	Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα.....	91
8.1	Συμπεράσματα.....	91
8.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	93
	Βιβλιογραφία	94
	Παράρτημα.....	96

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Απεικόνιση αναδιάταξης μορίων επιφανείας κατά τη στίλβωση	14
Σχήμα 2-2: Τύποι τραχύτητας.	15
Σχήμα 2-3: Λειτουργία τραχυμέτρου.	15
Σχήμα 2-4: Απεικόνιση της επιρροής του υλικού του εργαλείου στίλβωσης. Πηγή: NOVAPAX.....	18
Σχήμα 2-5: Εξοπλισμός συστήματος Ring-finish της NOVAPAX: (a) Diamond ring, (b)Brass ring, (c) Plastic ring, (d) Cloth disk, (e) Σύνδεσμος τύπου ‘mandrel’, (f) Σωληνάρια διαμανταλοιφών	20
Σχήμα 3-1: Απεικόνιση τροχοειδούς καμπύλης. ()	24
Σχήμα 3-2: Κρίσιμες αποστάσεις σε τροχοειδή καμπύλη.	25
Σχήμα 3-3: Παράδειγμα επικάλυψης τροχοειδών tool path για διαφορετικά στάδια στίλβωσης.....	26
Σχήμα 3-4: Η κατασκευασμένη ιδιοσυσκευή (a)σε πλήρη έκταση, (b)σε ενδιάμεση θέση.....	28
Σχήμα 3-5: Δοκίμιο τραχύτητας.....	28
Σχήμα 3-6: Η διάταξη κατά το πείραμα.	29
Σχήμα 4-1: Τρόπος φόρτισης ελατηρίου.	32
Σχήμα 4-2: Φόρτιση γάντζου.	33
Σχήμα 4-3: Ορισμός μηκών στο ελατήριο.	34
Σχήμα 4-4: Επιθυμητά όρια προέντασης ελατηρίων έλξης.	35
Σχήμα 4-5: Τιμές διορθωτικού συντελεστή επιφανειακής κατεργασίας.....	40
Σχήμα 4-6: Κρίσιμες θέσεις του ελατηρίου.	46
Σχήμα 4-7: Κατασκευασμένα ελατήρια.	48
Σχήμα 4-8: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης για το πρώτο σετ ελατηρίων.	49
Σχήμα 4-9: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης για το δεύτερο σετ ελατηρίων.	49
Σχήμα 4-10: Όψη συσκευής με απουσία κάτω ρουλεμάν.....	50
Σχήμα 4-11: Άποψη του κέντρου κατεργασιών Haas TM-1 με το σύστημα στίλβωσης.	51
Σχήμα 4-12: Τραχύμετρο Surftronic 3+.....	51
Σχήμα 4-13: Άποψη του κέντρου κατεργασιών OKUMA MX-45VAE με το σύστημα στίλβωσης.....	52
Σχήμα 4-14: Διαφορά στον μηχανισμό συγκράτησης για τις διαφορετικές επεκτατικές ντίζες.....	52
Σχήμα 4-15: Παράδειγμα αποτελέσματος στίλβωσης δοκιμίου (a) προ της αντικατάστασης και (b) μετά την αντικατάσταση της επεκτατικής ντίζας.....	52

Σχήμα 4-16: (a) Το οπτικό ταχύμετρο SKF TMRT, (b) η ανακλαστική ταινία όπως προσκολλάται στον διαμαντένιο δακτύλιο.....	53
Σχήμα 4-17: (a) Δοκίμιο κατά τη διαδικασία στίλβωσης, (b) Αποτέλεσμα επιβεβαιωτικής δοκιμής.....	54
Σχήμα 5-1: Παράδειγμα αλληλεπίδρασης μεταξύ παραγόντων.....	62
Σχήμα 5-2: Τριγωνικός πίνακας αλληλεπίδρασης και γραμμικά διαγράμματα του πίνακα L_8	63
Σχήμα 5-3: Παράδειγμα διαγράμματος μέσω αποδόσεων.	67
Σχήμα 6-1: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για το πείραμα λείανσης.	77
Σχήμα 6-2: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για το πείραμα στίλβωσης με μπρούτζινο δακτύλιο.	80
Σχήμα 6-3: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για το πείραμα στίλβωσης με πλαστικό δακτύλιο.	82
Σχήμα 6-4: (a) Διαμαντένιος δακτύλιος με βλάβη, (b) Ανακλαστική ταινία στο τσόκ της νίζας	84
Σχήμα 7-1: Μοτίβα κάλυψης επιφανειών (a)raster path, (b)contour offset, (c)Hilbert iterations 1 to 3, (d) Peano iterations 1 to 3.	85
Σχήμα 7-2: Απεικόνιση της τροχιάς του εργαλείου κατά την εφαρμογή.	86
Σχήμα 7-3: Απεικόνιση του αποτελέσματος της στίλβωσης για έλεγχο κενών ή υπερβολικών υπερκαλύψεων.	87
Σχήμα 7-4: Δοκίμιο μετά την κατεργασία με φρεζοκεφαλή.	87
Σχήμα 7-5: Δείγμα της επιφάνειας με το πέρας της λείανσης.....	88
Σχήμα 7-6: Κατεργασία με μπρούτζινο δακτύλιο.....	88
Σχήμα 7-7: Η επιφάνεια μετά τα πρώτα περάσματα με πλαστικό δακτύλιο.....	89
Σχήμα 7-8: (a) Αποτέλεσμα διεργασίας, (b) Άποψη ποιότητας παραγόμενων ειδώλων από την επιφάνεια.	89
Σχήμα 7-9: Αποτέλεσμα διεργασίας.....	90
Σχήμα 8-1: Άποψη ειδώλου από την κατεργασμένη επιφάνεια. Error! Bookmark not defined.	

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Σύγκριση τεχνικών μέτρησης τραχύτητας .	16
Πίνακας 2-2: Διάφορα στίλβωτικά υλικά και οι ιδιότητές τους.....	17
Πίνακας 2-3: Γεωμετρικά στοιχεία εξοπλισμού NOVAPAX.	20
Πίνακας 2-4: Επίπεδα τραχύτητας ανά κατεργασία. Πηγή: NOVAPAX.....	21
Πίνακας 2-5: Αναμενόμενη τραχύτητα ανά στάδιο στίλβωσης. Πηγή: NOVAPAX ...	23
Πίνακας 3-1: Κριτήρια επιλογής τροχοειδούς καμπύλης.	25
Πίνακας 4-1: Υλικά κατασκευής ελατηρίων.....	36
Πίνακας 4-2: Προσέγγιση ορίου διαρροής από όριο αντοχής σε εφελκυσμό.....	38
Πίνακας 4-3: Τιμές διορθωτικού συντελεστή επιφανειακής κατεργασίας.	40
Πίνακας 4-4: Τιμές διορθωτικού συντελεστή θεροκρασίας.....	41
Πίνακας 4-5: Τιμές διορθωτικού συντελεστή αξιοπιστίας.	41
Πίνακας 4-6: Σχεδιαστικοί περιορισμοί.	44
Πίνακας 5-1: Ορθογώνιος πίνακας L_8	60
Πίνακας 5-2: Παράδειγμα πειράματος.	66
Πίνακας 5-3: Παράδειγμα πίνακα ANOVA.	69
Πίνακας 5-4: Επίπεδα παραγόντων για το πείραμα λείανσης.	72
Πίνακας 5-5: Επίπεδα παραγόντων για το πείραμα στίλβωσης με μπρούτζινο εργαλείο.	72
Πίνακας 5-6: Επίπεδα παραγόντων για το πείραμα με πλαστικό εργαλείο.....	73
Πίνακας 5-7: Βοηθητικός πίνακας για επιλογή κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα.....	73
Πίνακας 5-8: Τοποθέτηση παραγόντων στον ορθογώνιο πίνακα.	74
Πίνακας 5-9: Τριγωνικός πίνακας αλληλεπιδράσεων για πίνακες 3 επιπέδων.	75
Πίνακας 6-1: Αποτελέσματα δοκιμών πειράματος λείανσης.	77
Πίνακας 6-2: Πίνακας ANOVA πειράματος λείανσης.	78
Πίνακας 6-3: Βέλιστα επίπεδα παραγόντων για το πείραμα λείανσης.....	78
Πίνακας 6-4: Αποτελέσματα δοκιμών πειράματος στίλβωσης με μπρούτζινο δακτύλιο.	79
Πίνακας 6-5: Πίνακας ANOVA πειράματος στίλβωσης με μπρούτζινο δακτύλιο.	80
Πίνακας 6-6: Βέλιστα επίπεδα παραγόντων για το πείραμα στίλβωσης με μπρούτζινο δακτύλιο.	80
Πίνακας 6-7: Αποτελέσματα δοκιμών πειράματος στίλβωσης με πλαστικό δακτύλιο.	82
Πίνακας 6-8: Πίνακας ANOVA πειράματος στίλβωσης με πλαστικό δακτύλιο.....	83
Πίνακας 6-9: Βέλιστα επίπεδα παραγόντων για το πείραμα στίλβωσης με πλαστικό δακτύλιο.	83
Πίνακας 7-1: Χαρακτηριστικά τροχοειδών καμπυλών ανά στάδιο της διεργασίας. ...	86

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελεί συνέχεια της διπλωματικής εργασίας του Π. Αβράμπου με τίτλο 'Σύστημα στίλβωσης καλουπιών σε κέντρα κατεργασιών CNC τριών αξόνων'(1) όπου ήδη έχει καταγραφεί μια γενική μεθοδολογία για την αυτόματη στίλβωση μεταλλικών καλουπιών, έχει μελετηθεί η κατασκευή τροχοειδούς τροχιάς εργαλείου στίλβωσης, έχει κατασκευασθεί ιδιοσυσκευή στίλβωσης για κέντρο κατεργασιών και έχουν γίνει ενδεικτικά πειράματα στίλβωσης επίπεδων επιφανειών.

Στόχος της μεταπτυχιακής εργασίας είναι να καλιμπραρισθεί πειραματικά το σύστημα στίλβωσης για επίπεδες επιφάνειες και να αποδειχθεί η πρακτική του χρησιμότητα με παράδειγμα εφαρμογής.

Το ζητούμενο σε τεχνικό επίπεδο είναι να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή τραχύτητα. Για τον προσδιορισμό της τραχύτητας βάσει των συνθηκών κατεργασίας προτείνεται να τυποποιηθεί μια διαδικασία που θα ακολουθείται σε κάθε περίπτωση νέων εργαλείων, υλικών κλπ. Η διαδικασία συνίσταται σε συστηματικό σχεδιασμό πειραμάτων και ανάλυση κατά Taguchi και Anova για επίπεδη επιφάνεια.

1.2 Βιβλιογραφική έρευνα

Με σκοπό την ανάπτυξη ενός ερευνητικού υποβάθρου για το θέμα που διερευνάται μελετήθηκαν αρκετές δημοσιεύσεις σχετικές με το αντικείμενο της εργασίας. Οι εργασίες που μελετήθηκαν αφορούσαν κυρίως την αυτοματοποίηση της στίλβωσης, την μοντελοποίηση των φαινομένων που την επηρεάζουν και τις διαδικασίες βελτιστοποίησης της.

Η στίλβωση μεταλλικών επιφανειών είναι ένα ερευνητικό πεδίο μεγάλου ενδιαφέροντος ειδικά για την βιομηχανία μεταλλικών καλουπιών όπου υπάρχουν απαιτήσεις για αυστηρές ανοχές και επιφάνειες μικρής τραχύτητας και υψηλής σκληρότητας. Η στίλβωση μεταλλικών καλουπιών είναι μια πολύ σύνθετη διαδικασία που αποτελείται από πολλά στάδια με χρήση διαφορετικών τεχνικών και εργαλείων και παρότι έχουν γίνει αρκετές απόπειρες αυτοματοποίησης, εκτελείται ως επί το πλείστον ακόμα χειροκίνητα από έμπειρους τεχνίτες με πολλά έτη εμπειρίας στο αντικείμενο. Η κατεργασία αυτή καταλαμβάνει μεγάλο μέρος τόσο του χρόνου κατασκευής ενός καλουπιού όσο και του συνολικού κόστους του, καθώς τέτοιας φύσης κατεργασίες αφήνουν μικρά περιθώρια λάθους και αφαίρεση παραπάνω υλικού μπορεί να

οδηγήσει σε ανάγκη για επισκευές ή ακόμα και απόρριψη και επανακατασκευή του τεμαχίου.

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, έχουν εκπονηθεί αρκετές ερευνητικές εργασίες στο παρελθόν που έχουν σαν αντικείμενο τον σχεδιασμό συστημάτων αυτόματης στίλβωσης. Μια αρχική κατηγοριοποίηση των εργασιών αυτών μπορεί να γίνει με βάση το εάν εκμεταλλεύονται CNC εργαλειομηχανές (2-7) ή βιομηχανικά ρομποτικά συστήματα (8-12). Ένα ακόμα κριτήριο κατηγοριοποίησης είναι το είδος της τεχνικής στίλβωσης ή των διαφορετικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται, όπως πέτρες (2,3,7,11), δακτύλιοι (4) στιλβωτικές αλοιφές (8-10) και (5,6).

Καθώς οι παραπάνω εφαρμογές αφορούν παραδείγματα μηχανικής στίλβωσης (στίλβωσης με εφαρμογής δύναμης σε κοπτικό μέσο), τονίζεται στις περισσότερες η σημασία που έχει στο αποτέλεσμα ο έλεγχος της δύναμης (ή πιο συγκεκριμένα της παραγόμενης πίεσης όπως αναλύεται στο (13)). Ο έλεγχος της δύναμης μπορεί να γίνει είτε παθητικά (8), δηλαδή με χρήση κατασκευαστικού στοιχείου που έχει ενδοτικότητα και η παραμόρφωση του μπορεί να αντιστοιχισθεί σε τιμή φορτίου (πχ ελατήρια), είτε ενεργητικά (3,9,12), δηλαδή με χρήση κατάλληλων διατάξεων αισθητηρίων, επενεργητών και ελεγκτών που αλληλοεπιδρούν σε σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου και ρυθμίζουν το φορτίο χωρίς εξωτερική παρέμβαση. Σε πολλές περιπτώσεις (4,7,10,11) γίνεται μεν χρήση παθητικού συστήματος ελέγχου της δύναμης το οποίο όμως συνδυάζεται με αισθητήριο όργανο μέτρησης της εφαρμοζόμενης δύναμης ή πίεσης. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται ως υβριδικά και επιτρέπουν τον on-the-spot έλεγχο της εφαρμοζόμενης δύναμης που οδηγεί σε ανάλογες διορθωτικές ρυθμίσεις από το χειριστή. Η μελέτη όλων των παραπάνω δημιούργησε ένα σημαντικό υπόβαθρο στους τρόπους υλοποίησης ενός αυτόματου συστήματος στίλβωσης και των επιμέρους τμημάτων του, γεγονός που διευκόλυνε την διαδικασία επιλογής και επιβολής των κατάλληλων τροποποιήσεων για την βελτιστοποίηση του παρόντος συστήματος.

Ενδιαφέρον έχουν επίσης για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού της στίλβωσης, μελέτες που κάνουν απόπειρες μοντελοποίησης της στίλβωσης με σκοπό να προβλέψουν την παραγόμενη τραχύτητα (14), το ρυθμό αφαίρεσης υλικού (15), ή την προκύπτουσα τάση επιφανείας που ασκεί το εργαλείο ανάλογα με τη δύναμη που του εφαρμόζεται (13).

Τονίζεται επίσης και μελετάται σε αρκετές περιπτώσεις στη βιβλιογραφία, η συνεισφορά που έχουν διαφορετικού τύπου τροχιές εργαλείου (7,16,18) ή διαφορετικά μοτίβα κάλυψης επιφάνειας (7,9,17) στην ομοιομορφία και στα σημάδια που προκύπτουν στην υπό κατεργασία επιφάνεια. Όσον αφορά στην τροχιά του εργαλείου

προτιμώνται καμπύλες με παραπάνω από μία κατευθύνσεις, όπου εξετάζονται ιδιαίτερα οι τροχοειδείς καμπύλες, καθώς καλύπτουν ομοιόμορφα την υπό στίλβωση επιφάνεια αφήνοντας λιγότερα σημάδια και προσομοιάζουν καλά την κίνηση που ακολουθούν οι τεχνίτες κατά την χειροκίνητη διαδικασία (7,19).

Στη συνέχεια ιδιαίτερη σημασία δόθηκε σε δημοσιεύσεις που αφορούσαν τη βελτιστοποίηση διεργασιών στίλβωσης, στην εύρεση δηλαδή των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας ενός αυτόματου συστήματος στίλβωσης κατά περίπτωση. Οι πλειοψηφία των μελετών αυτών υλοποιούν τη διαδικασία βελτιστοποίησης μέσω σχεδιασμού παραγοντικών πειραμάτων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Taguchi (3-6,20-24) σε κάποια παραδείγματα σε συνδυασμό με ANOVA (3,5,6,20,22,24). Οι παραπάνω μελέτες εμφάνιζαν κοινά στην επιλογή των παραγόντων που θεωρητικά επηρεάζουν τη διεργασία της στίλβωσης με τους πιο κοινούς παράγοντες που επιλέγονταν να είναι:

- Το φορτίο που ασκείται από το εκάστοτε εργαλείο σε μορφή μετρούμενης δύναμης ή πίεσης.
- Η ταχύτητα κίνησης του εργαλείου
- Η συγκέντρωση της στιλβωτικής πάστας (εάν χρησιμοποιούταν αλοιφή)
- Ο χρόνος κατεργασίας

Επίσης παρατηρήθηκε ότι στη συντριπτική πλειοψηφία τους οι παραπάνω εργασίες έλεγχαν τους προαναφερθέντες παράγοντες σε τρία επίπεδα καθώς τείνουν να εμφανίζουν μη-γραμμική συμπεριφορά. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των παραπάνω εργασιών αξιοποιήθηκαν κατά το σχεδιασμό των πειραμάτων και συνεισέφεραν σημαντικά στο αποτέλεσμα της εργασίας.

1.3 Δομή εργασίας

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αρχικά στα πλαίσια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, σχετικές μελέτες με αντικείμενο τόσο την αυτοματοποίηση της στίλβωσης όσο και τη βελτιστοποίηση της μέσω πειραματικών μεθόδων με σκοπό την ανάπτυξη ενός ερευνητικού υποβάθρου για το θέμα που μελετάται.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα βασικά θεωρητικά στοιχεία που αφορούν την κατεργασία της στίλβωσης καθώς και περιγραφή του εξοπλισμού και της μεθόδου που ακολουθείται.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο υπόβαθρο (διπλωματική εργασία του Π. Αβράμπου) όπου βασίζεται η συγκεκριμένη εργασία. Αναφέρονται όλα τα σημαντικά στοιχεία, αναλύσεις και αποτελέσματα-συμπεράσματα που επηρεάζουν την παρούσα εργασία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή των τροποποιήσεων που απαιτούνται και που πραγματοποιήθηκαν στην ιδιοσυσκευή και την πειραματική διάταξη με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης τους. Η αποδοτικότητα των τροποποιήσεων αυτών επιβεβαιώνεται με αυτόματες δοκιμές.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται ο σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας με σκοπό, αφενός την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών της κατεργασίας, και, αφετέρου, την τυποποίηση μεθόδου ικανής να χρησιμοποιηθεί σε πιθανές αλλαγές υλικού ή τύπου εργαλείου κτλ. Αρχικά γίνεται αναφορά σε βασικά θεωρητικά στοιχεία για το σχεδιασμό πειραμάτων με εκτενέστερη ανάλυση στις μεθόδους Taguchi και ANOVA. Έπειτα γίνεται ανάλυση της στιλβωτικής μεθόδου και περιγράφονται τα βήματα σχεδιασμού της πειραματικής διαδικασίας.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας.

Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφεται ο σχεδιασμός και η εκτέλεση πρακτικής αυτόματης εφαρμογής σε μεταλλική επιφάνεια ικανής έκτασης, που είχε ως σκοπό την επιβεβαίωση των τιμών που προέκυψαν από τα πειράματα και την απόδειξη της ικανότητας του συστήματος να εκτελέσει το σχεδιαστικό σκοπό του. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα παραγόμενα αποτελέσματα.

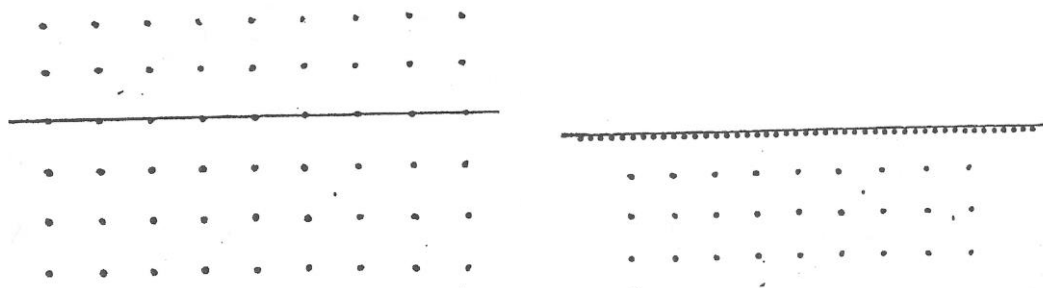
Κατόπιν, στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη της εργασίας, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν και προτείνονται ιδέες για μελλοντική έρευνα.

Ακολουθεί παράρτημα με τα data sheets συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν.

2 Γενικά στοιχεία

2.1 Περί στίλβωσης

Η στίλβωση είναι μια κατεργασία αφαίρεσης υλικού που έχει ως σκοπό την παραγωγή λείων επιφανειών, υψηλής διαστασιακής ακρίβειας. Μικροσκοπικά η στίλβωση μπορεί να οριστεί ως η επιφανειακή συμπύκνωση μορίων στην υπό κατεργασία επιφάνεια. Όπως φαίνεται στο σχήμα (Σχήμα 2-1) κατά τη στίλβωση δημιουργείται μια νέα επιφάνεια χαμηλότερα της αρχικής. Κατά τη δημιουργία της, ποσοστό των μορίων της αρχικής επιφάνειας προσκολλώνται πάνω στο στίλβωτικό μέσο, άλλο μέρος τους διασκορπίζεται στο περιβάλλον και τμήμα τους συγχωνεύεται στην νέα επιφάνεια οδηγώντας στην αύξηση της πυκνότητας των μορίων της. Η συμπύκνωση αυτή είναι μια μορφή επιφανειακής σκλήρυνσης και εμποδίζει τη διέλευση του φωτός, η ανάκλαση του οποίου δίνει την αίσθηση γυαλισματος. Όσο υψηλότερη είναι η συμπύκνωση τόσο πιο εμφανές είναι το παραπάνω φαινόμενο, με αποτέλεσμα σε μεγάλα ποσοστά συμπύκνωσης η επιφάνεια να ανακλά το μεγαλύτερο μέρος του προσπίπτοντος φωτός (επιφάνεια 'καθρέπτης').

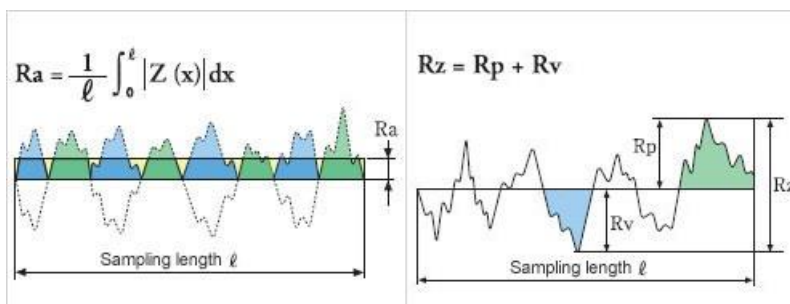


Σχήμα 2-1: Απεικόνιση αναδιάταξης μορίων επιφανείας κατά τη στίλβωση. Πηγή: NOVAPAX

Οι λόγοι για τους οποίους θα πρέπει μια επιφάνεια να υποστεί στίλβωση ποικίλουν, όπως ποικίλουν και τα επίπεδα στίλβωσης. Κάποιοι από τους βασικούς λόγους μπορεί να είναι: η εξωτερική εμφάνιση ενός αντικειμένου, η προστασία από τη διάβρωση, η επιφανειακή σκλήρυνση, η λειτουργική ανάγκη για υψηλή διαστασιακή ακρίβεια ή αυστηρές ανοχές και η ανάγκη για πλήρη διαφάνεια (πχ ζελατίνες για κράνη, φακοί).

Για να γίνει πιο κατανοητή η αναφορά σε επίπεδα στίλβωσης, κρίνεται σημαντικό να γίνει πρώτα αναφορά στο πως αυτή ποσοτικοποιείται. Το επίπεδο στίλβωσης μιας επιφάνειας συνήθως καθορίζεται από το μέτρο της τραχύτητας της. Η τραχύτητα μιας επιφανείας μετράται σε μm και μπορεί να οριστεί με διαφορετικούς

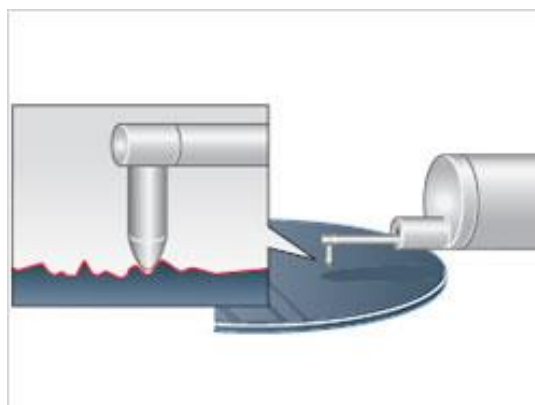
τρόπους. Συνήθως χρησιμοποιούνται η μέση τραχύτητα (average roughness, Ra), δηλαδή ο μέσος όρος της απόστασης των 'όρων' και των 'κοιλιάδων' που εμφανίζει μικροσκοπικά μια επιφάνεια από μια μέση απόσταση, ή το μέγιστο ύψος τραχύτητας (peak-to-valley roughness, Rt ή Rz) δηλαδή η απόσταση από το υψηλότερο 'όρος' στη χαμηλότερη 'κοιλιάδα'. Οι τύποι τραχύτητας απεικονίζονται καλύτερα στο σχήμα (Σχήμα 2-2).



Σχήμα 2-2: Τύποι τραχύτητας.

Για την μέτρηση της τραχύτητας έχουν αναπτυχθεί ειδικά όργανα και μέθοδοι. Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται μηχανικές μέθοδοι, όπως τραχύμετρα (Profilometers), ή οπτικές πχ σκεδασίμετρα και μικροσκόπια (συνεστιακά (Confocal microscopes), ηλεκτρονικά μικροσκόπια σάρωσης (Scanning Electron Microscopes, SEM) και μικροσκόπια ατομικής δύναμης (Atomic Force Microscopes, AFM)).

Τα τραχύμετρα, που ενδιαφέρουν κυρίως για την παρούσα εργασία, είναι συστήματα στα οποία μια διαμαντένια βελόνα κινείται κατά μήκος και σε επαφή με την επιφάνεια της οποίας η τραχύτητα μετράται (Σχήμα 2-3).



Σχήμα 2-3: Λειτουργία τραχυμέτρου.

Η μέτρηση γίνεται σε συγκεκριμένο μήκος και με συγκεκριμένη δύναμη επαφής. Οι μικροατέλειες τις επιφάνειας μεταφράζονται σε μετατόπιση της βελόνας σε συνάρτηση με τη θέση της. Η αλλαγές στο ύψος της βελόνας παράγουν ένα αναλογικό σήμα το οποίο μετατρέπεται σε ψηφιακό, αποθηκεύεται, αναλύεται και προβάλλεται στην οθόνη της συσκευής. Ένα τυπικό τραχύμετρο μπορεί να μετρήσει τραχύτητες από 10nm μέχρι 1mm.

Συνοπτικά, στοιχεία των διαφορετικών τεχνικών μέτρησης της τραχύτητας εμφανίζονται στον πίνακα (Πίνακας 2-1)

Πίνακας 2-1: Σύγκριση τεχνικών μέτρησης τραχύτητας (25).

SELECTION OF MEASUREMENT DEVICES AND GENERAL SPECIFICATIONS							
GENERAL SPEC./DEVICE	LIGHT OPTICAL MICROSCOPE	STYLUS	INTERFEROMETER	CONFOCAL	SEM/EDS	ATOMIC FORCE MICROSCOPE	GLOSSMETER
Resolution (m)	xy: 10^{-7} z: 10^{-6}	xy: 10^{-6} - 10^{-4} z: 10^{-9}	xy: 10^{-6} z: 10^{-10}	xy: 10^{-6} z: 10^{-7}	xy: 10^{-9} z: 10^{-9}	xy: 10^{-10} z: 10^{-12}	-
Measurement area	μm-mm	μm-cm	μm	μm-mm	μm-mm	μm	μm-mm
Height info	No	No	Yes	Yes	No	Yes	Possible
2D/3D	2D	2D	3D	3D	2D/3D	3D	-
Component analysis	No	No	No	No	Yes	No	No
Usability	Good	Good	Mid	Mid	Bad	Bad	Good
Measurement time	-	Long	Short	Mid	Long	Long	Short
Size of workpiece	Device dependent	Unlimited	Device dependent (often up to 2-10 kg)	Device dependent (often up to 2-10 kg)	mm-cm	Device dependent	Unlimited
Other	Standardised methods for cleanliness determination	Risk of surface damage, fragile stylus/pick-up	Sensitive to vibrations	Large depth of focus, problems with artefacts	Work in vacuum, needs solid and conducting samples, ability to image undercuts	Noise sensitive, fragile stylus/pick-up	Only average roughness data

Για την αφαίρεση υλικού κατά τη στίλβωση χρησιμοποιούνται σαν λειαντικά μέσα εργαλεία και κόκκοι από διάφορα, συνήθως ψαθυρά, υλικά. Το υλικό των εργαλείων ή των κόκκων επιλέγεται ανάλογα με το υλικό της υπό κατεργασία επιφάνειας, το επιθυμητό επίπεδο στίλβωσης, τον επιθυμητό ρυθμό αφαίρεσης υλικού και τη τεχνική στίλβωσης που χρησιμοποιείται. Σημαντικά στοιχεία για την επιλογή υλικού είναι η σκληρότητά του, το σχήμα και η αιχμηρότητα των κόκκων του και τα θερμικά του χαρακτηριστικά. Πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι οι κόκκοι των υλικών που προαναφέρθηκαν μπορεί να είναι κολλημένοι μεταξύ τους ή πάνω σε φορέα (πέτρες γυαλίσματος, λίμες, σμυριδόπανα, τροχοί) ή ελεύθεροι (αλοιφές). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως ως λειαντικά μέσα είναι το διαμάντι (Diamond), το οξειδίο αργιλίου (Aluminum Oxide, Al_2O_3), το καρβίδιο βορίου (Boron Carbide, B_4C) και το

καρβίδιο πυριτίου (Silicon Carbide, SiC). Μια μικρή αναφορά στις ιδιότητες του καθενός φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2-2).

Πίνακας 2-2: Διάφορα στίλβωτικά υλικά και οι ιδιότητές τους (25).

Υλικό	Σκληρότητα KNOOP	Πυκνότητα (g/cm ³)	Δομή κόκκων
Διαμάντι	7000	3.51	Αιχμηρή, γωνιώδης, στέρεη
Al ₂ O ₃	2100	3.97	Χονδρή, γωνιώδης, στέρεη
B ₄ C	2900	2.51	Αιχμηρή, χονδρή, στέρεη
SiC	2500	3.22	Αιχμηρή, χονδρή, στέρεη

Όσο αφορά στις τεχνικές στίλβωσης, υπάρχει μεγάλη ποικιλία μεθόδων και η επιλογή τους καθορίζεται κυρίως από το υλικό κατασκευής του προς στίλβωση αντικειμένου και το επιθυμητό επίπεδο στίλβωσης.

Για τα μέταλλα οι τεχνικές στίλβωσης που επιλέγονται συνηθέστερα μπορούν να χωριστούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: τη λείανση (grinding), το γυάλισμα (lapping/fine-lapping) και το φινίρισμα (polishing/buffing).

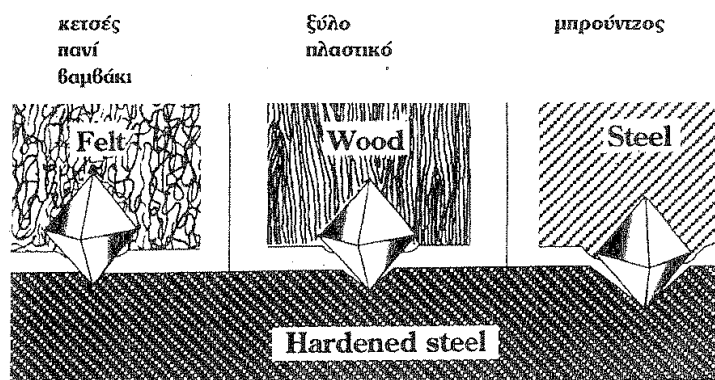
- Λείανση (Grinding)

Η λείανση χαρακτηρίζεται από γρήγορους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού για τη μείωση του μεγέθους ή για την αφαίρεση μεγάλων ατελειών από την επιφάνεια του εκάστοτε δοκιμίου. Συνήθως γίνεται χρήση λειαντικών μέσων όπως πέτρες, λίμες, σμυριδόπανα, ιμάντες και δίσκοι, με μεγάλο μέγεθος κόκκου (>40μm). Είναι γρήγορη και απλή διαδικασία, δεν είναι όμως ικανή να παράγει υψηλά επίπεδα στίλβωσης καθώς προκαλεί σημαντικές ατέλειες κάτω από την επιφάνεια. Τυπικά, η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε σκληρά μέταλλα όταν η γρήγορη αφαίρεση υλικού είναι επιθυμητή και η τραχύτητα δεν είναι τόσο σημαντικός παράγοντας. Η λείανση χρησιμοποιείται συχνά ως ένας τρόπος προετοιμασίας μιας επιφάνειας (αφαίρεση μεγάλων ατελειών) πριν την εφαρμογή άλλης μεθόδου στίλβωσης που θα οδηγήσει σε υψηλότερης ποιότητας επιφάνειες.

- Γυάλισμα (Lapping/Fine-lapping)

Το γυάλισμα είναι μια τεχνική αφαίρεσης υλικού που παράγει λείες και επίπεδες επιφάνειες. Κατά τη διεργασία αυτή, αφαιρούνται οι ατέλειες που παράχθηκαν στα προηγούμενα στάδια παραγωγής του υπό κατεργασία τεμαχίου (πχ, πριόνισμα, τórνευση κτλ) και παράγονται επιφάνειες υψηλής διαστασιακής ακρίβειας με μικρές τιμές τραχύτητας (τυπικά κάτω από 2,5μm). Τα λειαντικά μέσα που χρησιμοποιούνται κατά το γυάλισμα έχουν μικρό μέγεθος κόκκου (5-20μm) και μπορεί να είναι προσκολλημένα σε φορέα (συνήθως σμυριδόπανα) ή, όπως πιο συχνά συναντάται, ελεύθερα σε μορφή αλοιφών.

Στην δεύτερη περίπτωση η αλοιφή εφαρμόζεται απευθείας στην υπό στίλβωση επιφάνεια σε συνδυασμό με κάποιο επιπλέον διαλυτικό μέσο (οινόπνευμα, λάδι, πετρέλαιο, κηροζίνη κα) δημιουργώντας μια πάστα (slurry). Στη συνέχεια γίνεται χρήση στίλβωτικού εργαλείου, κινούμενου περιστροφικά ή παλινδρομικά, που λειτουργεί σαν φορέας της αλοιφής του λειαντικού μέσου και παρασύρει τους κόκκους της πάνω στην επιφάνεια προκαλώντας απόξεση του υλικού της και καταστρέφοντας μικρό-ατέλειες της. Για την παραγόμενη τραχύτητα, εκτός από το μέγεθος των κόκκων, σημαντικό ρόλο παίζει και το υλικό κατασκευής του φορέα. Διαφορετικά υλικά έχουν διαφορετική ελαστικότητα με αποτέλεσμα να υποχωρούν περισσότερο ή λιγότερο στους κόκκους προκαλώντας διαφορετικά βάθη κοπής (Σχήμα 2-4). Όσο πιο πολύ ενδίδει το υλικό ενός εργαλείου τόσο μεγαλύτερης ακρίβειας επιφάνεια μπορεί να παράγει σε συνδυασμό με το κατάλληλο μέγεθος κόκκων. Στο Lapping χρησιμοποιούνται αρχικά μεταλλικά εργαλεία (πχ μπρούτζινα), ενώ για μεγαλύτερη ακρίβεια γίνεται χρήση πλαστικών ή ξύλινων εργαλείων (σε αυτές τις περιπτώσεις η διεργασία μπορεί να αναφέρεται σαν fine-lapping (γυάλισμα ακριβείας)).



Σχήμα 2-4: Απεικόνιση της επιρροής του υλικού του εργαλείου στίλβωσης. Πηγή: NOVAPAX

- Φινίρισμα (Polishing/Buffing)

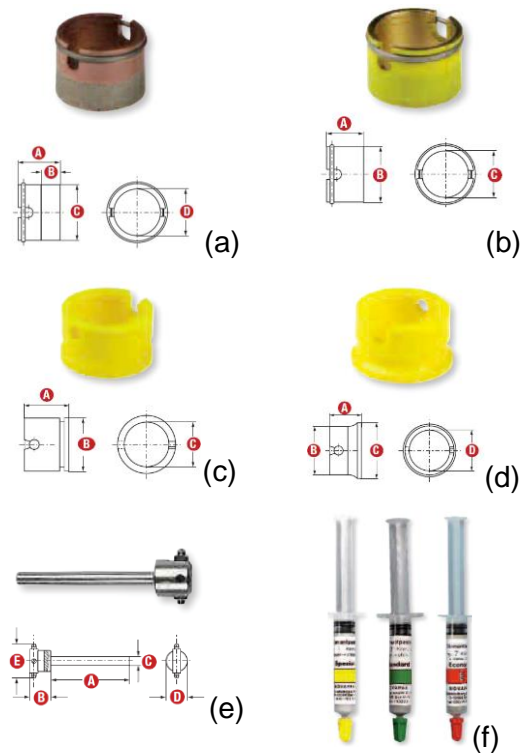
Το φινίρισμα αποτελεί ουσιαστικά την ολοκλήρωση μιας στιλβωτικής διαδικασίας. Μηχανικά είναι όμοιο με το γυάλισμα, όμως τα μεγέθη κόκκων που επιλέγονται είναι αρκετά μικρότερα (3μm και κάτω). Για την εκτέλεση του χρησιμοποιούνται πολύ μαλακοί φορείς (πχ πανί, κετσές, βαμβάκι) και η εργασία γίνεται συνήθως χειροκίνητα. Το φινίρισμα παράγει επιφάνειες 'καθρέπτη' με τιμές τραχύτητας που αγγίζουν τα εκατοστά του μm.

Αφού έχει γίνει αναφορά στους μηχανισμούς μιας διεργασίας στίλβωσης και έχουν δοθεί οι απαραίτητοι ορισμοί, μπορεί να περιγραφεί το σύστημα στίλβωσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

2.2 Σύστημα Ring-Finish της NOVAPAX

2.2.1 Περιγραφή εξοπλισμού

Το σύστημα Ring-Finish της NOVAPAX απευθύνεται στη χειροκίνητη στίλβωση μεταλλικών επιφανειών. Αποτελείται από σειρά διαμανταλοιφών, με διαφορετικά μεγέθη κόκκων τεχνητού διαμαντιού (28,15,10,7 και 3μm) (Σχήμα 2-5f) καθώς και από σειρά εργαλείων διαμορφωμένων σε σχήμα δακτυλίου, όπου το κάθε ένα αντιστοιχεί σε διαφορετικό στάδιο της διεργασίας. Στο τμήμα της λείανσης, για την προετοιμασία δηλαδή της προς στίλβωση επιφάνειας, αντιστοιχεί ο διαμαντένιος δακτύλιος (Diamond ring) (Σχήμα 2-5a). Για την εργασία γυαλίσματος με αλοιφές χρησιμοποιούνται δακτύλιοι από μπρούντζο (Brass ring) (Σχήμα 2-5b) και πλαστικό (Plastic ring) (Σχήμα 2-5c) και για το φινίρισμα υπάρχουν ειδικοί δακτύλιοι στους οποίους μπορούν να προσαρμοστούν τμήματα κετσέ (Cloth disk) (Σχήμα 2-5d). Οι δακτύλιοι περιστρέφονται μέσω περιστροφικού εργαλείου τύπου 'μικρομοτορ' στο οποίο συνδέονται με σύνδεσμο τύπου mandrel (Σχήμα 2-5e). Ο σύνδεσμος αυτός δίνει στους δακτυλίους την ελευθερία να περιστραφούν σε 2 άξονες, διασφαλίζοντας έτσι καλύτερη επαφή με την υπό στίλβωση επιφάνεια. Τα εργαλεία του συστήματος απεικονίζονται στο σχήμα (Σχήμα 2-5) και τα γεωμετρικά τους στοιχεία φαίνονται στον πίνακα 2-3. Σημειώνεται ότι το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για στίλβωση επίπεδων επιφανειών ή επιφανειών που μπορούν να θεωρηθούν τομές σφαίρας.



Σχήμα 2-5: Εξοπλισμός συστήματος Ring-finish της NOVAPAX: (a) Diamond ring (b) Brass ring (c) Plastic ring, (d) Cloth disk (e) Σύνδεσμος τύπου 'mandrel' (f) Σωληνάρια διαμανταλοιφών

Πίνακας 2-3: Γεωμετρικά στοιχεία εξοπλισμού NOVAPAX.

Εξάρτημα	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)
Diamond ring	8.8	3.5	12	10	-
Brass ring	8	12	10	-	-
Plastic ring	8	13	10	-	-
Cloth disc ring	8	13	14	10	-
Mandrel	30	7.5	3	8	12

2.2.2 Περιγραφή μεθόδου στίλβωσης

Μια διαδικασία στίλβωσης ξεκινά πάντα με τη μέτρηση της αρχικής τραχύτητας της προς στίλβωσης επιφανείας. Ανάλογα με την κατεργασία που έχει υποστεί σε προηγούμενο στάδιο, η επιφάνεια αναμένεται να έχει διαφορετικό επίπεδο τραχύτητας. Συγκεντρωτικά εμφανίζονται τα αναμενόμενα επίπεδα τραχύτητας ανά κατεργασία στον Πίνακα 2-4.

Πίνακας 2-4: Επίπεδα τραχύτητας ανά κατεργασία. Πηγή: NOVAPAX

Procedure	Peak-to-Valley Range in μm DIN 4768																							
	0,04	0,06	0,1	0,16	0,25	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	
1 longitudinal machining on lathe																								
2 face machine on lathe																								
3 drilling																								
4 boring																								
5 abrasion																								
6 circumferential milling																								
7 face milling																								
8 filing																								
9 circular-long grinding																								
10 circular-level grinding																								
11 surface grinding																								
12 polish grinding																								
13 short stroke honing																								
14 circular lapping																								
15 plain lapping																								
16 fine lapping																								
17 polishing																								
18 buffing																								
19 spark erosion																								

Σε επόμενο στάδιο γίνεται επεξεργασία της επιφάνειας με τον διαμαντένιο δακτύλιο (Grinding) με τις κατάλληλες συνθήκες δύναμης-ταχύτητας περιστροφής ανάλογα με το υλικό κατασκευής της και σε σχέση με την αρχική τραχύτητα. Οι συνθήκες αυτές δεν είναι τυποποιημένες και προκύπτουν από την εμπειρία του εκάστοτε τεχνίτη. Η διεργασία με τον διαμαντένιο δακτύλιο δεν απαιτεί παράλληλη χρήση λιπαντικού υγρού και ολοκληρώνεται όταν η επιφάνεια καθαριστεί επαρκώς από προϋπάρχουσες ορατές ατέλειες (πχ αυλάκια από κονδύλι, σημάδια από ηλεκτροδιάβρωση κα) και αποκτήσει κατάλληλη τραχύτητα (τυπικά τραχύτητα κοντά ή μικρότερη από το μέγεθος κόκκου της διαμανταλοιφής που θα χρησιμοποιηθεί έπειτα).

Μόλις το στάδιο της λείανσης ολοκληρωθεί, καθαρίζονται σχολαστικά η επιφάνεια, τα χέρια του τεχνίτη και το εργαλείο. Στη συνέχεια ο διαμαντένιος δακτύλιος αντικαθίσταται με τον μπρούτζινο και γίνεται εφαρμογή της διαμανταλοιφής. Ο κατασκευαστής προτείνει τοποθέτηση μικρής ποσότητας αλοιφής σε συνδυασμό με 2-3 σταγόνες ειδικού λιπαντικού διαλύματος (50% νερό, 25% γλυκερίνη, 25% οινόπνευμα) ανά 1,5 cm της επιφάνειας. Μόλις ετοιμαστεί η επιφάνεια επιλέγεται το κατάλληλο επίπεδο στροφών και με άσκηση της απαιτούμενης δύναμης από τον τεχνίτη ξεκινά η επεξεργασία της επιφάνειας με το μπρούτζινο εργαλείο (Lapping). Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι όταν γίνεται χρήση του μπρούτζινου δακτυλίου απαιτούνται συνήθως χαμηλές στροφές με λίγη δύναμη και ότι το μπρούτζινο εργαλείο συνδυάζεται με τις διαμανταλοιφές μεγέθους κόκκων 28,15 και 10 μm . Ανά τακτά χρονικά διαστήματα η επιφάνεια καθαρίζεται και ελέγχεται η τραχύτητα της. Αν αυτή είναι σε επιθυμητά επίπεδα το στάδιο της διεργασίας ολοκληρώνεται, αν όχι,

επανατοποθετείται διαμανταλοιφή επί της επιφάνειας και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Απαραίτητος είναι και ο καθαρισμός της επιφάνειας και η ανανέωση της διαμανταλοιφής όταν το μίγμα αλοιφής-λιπαντικού εξαντληθεί ή όταν υπάρχει κορεσμός από γρέζια (το μίγμα έχει αποκτήσει έντονα μαύρο χρώμα). Όταν η τραχύτητα της επιφάνειας φτάσει σε επιθυμητά επίπεδα ακολουθεί εκ νέου καθαρισμός της επιφάνειας, των χεριών του χρήστη και του εργαλείου. Ο μπρούτζινος δακτύλιος αντικαθίσταται με διαφορετικό μπρούτζινο δακτύλιο και γίνεται εφαρμογή διαμανταλοιφής του αμέσως μικρότερου μεγέθους κόκκου.

Πρέπει να τονιστεί ότι για κάθε αλοιφή με διαφορετικό μέγεθος κόκκου πρέπει να χρησιμοποιείται διαφορετικό εργαλείο, δηλαδή να μην χρησιμοποιείται ο ίδιος δακτύλιος με πάνω από ένα μέγεθος κόκκων αλοιφής. Αυτό συμβαίνει γιατί, όταν ένας δακτύλιος χρησιμοποιείται με αλοιφή ενός συγκεκριμένου μεγέθους κόκκου, οι κόκκοι δημιουργούν σε αυτόν οπές και χαραγές αντίστοιχες με το μέγεθός τους. Όταν ο ίδιος δακτύλιος χρησιμοποιηθεί με αλοιφή μικρότερου μεγέθους κόκκων, οι μικρότεροι κόκκοι θα 'φωλιάζουν' στις οπές αυτές μειώνοντας αισθητά την απόδοση του εργαλείου. Συνεπώς ο κάθε δακτύλιος συνδυάζεται με μια συγκεκριμένη αλοιφή και χρήσιμο είναι να αποθηκεύονται μαζί για αποφυγή λαθών.

Η διαδικασία με τον μπρούτζινο δακτύλιο που περιγράφηκε επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί και η χρήση του δακτυλίου με τη διαμανταλοιφή κόκκων μεγέθους 10μm. Στη συνέχεια και μετά από σχολαστικό καθαρισμό όπως προηγουμένως, ο μπρούτζινος δακτύλιος αντικαθίσταται από πλαστικό και η διεργασία επαναλαμβάνεται κάνοντας χρήση των αλοιφών με μεγέθη κόκκων 10,7 και 3 μm (Fine-lapping). Ο πλαστικός δακτύλιος χρησιμοποιείται τυπικά με μεγάλη περιστροφική ταχύτητα και δύναμη. Σε αυτό το στάδιο η επιφάνεια θα αποκτήσει και ορατά εμφανή αποτελέσματα πλησιάζοντας το επίπεδο 'καθρέπτη'. Το αναμενόμενο αποτέλεσμα κάθε σταδίου αποτυπώνεται στον Πίνακα 2-5.

Όταν ολοκληρωθεί και το στάδιο στίλβωσης με πλαστικό δακτύλιο ακολουθεί το φινίρισμα (polishing). Η παραπάνω διεργασία γίνεται με εφαρμογή αλοιφής μεγέθους 3μm και με ταυτόχρονη χρήση είτε πανιού χειροκίνητα, είτε του ειδικού εργαλείου (cloth disc) προσαρτημένου σε περιστροφικό εργαλείο. Η αλοιφή τρίβεται πάνω στην επιφάνεια χωρίς χρήση λιπαντικού και με αρκετή δύναμη μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Πίνακας 2-5: Αναμενόμενη τραχύτητα ανά στάδιο στίλβωσης. Πηγή: NOVAPAX

Diagram of the peak-to-valley heights ranges obtainable with the NOVAPAX system.

Handle	Finishing method	Range of peak-to-valley heights in μm (Rt)																Tool									
		1000	630	400	250	160	100	63	40	25	16	10	6.3	4	2.5	1.6	1		0.63	0.4	0.25	0.16	0.1	0.063	0.04		
ring-finish (rotating)	Grinding:																										Diamond ring
	Lapping	for plane and																									Metal ring
	Fine lapping	spheric faces																									Plastic ring
	Polishing																										Cloth discs
flex-polit (short-stroke)	Filing																										Diamond files
	Stoning	for plane and																									Abrasive stones
	Lapping	curved faces																									Lapping rings Lapping elements
	Fine lapping																										Fine lapping rings Fine lapping elements
poli-rotor (rotating)	Grinding																										Mounted point
	Fine lapping	for plane and																									Radius bonnets
	Polishing	curved faces																									Felt

3 Προϋπάρχον υπόβαθρο

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να γίνει αναφορά στην προηγούμενη δουλειά, πάνω στην οποία βασίζεται η παρούσα εργασία. Πιο συγκεκριμένα θα περιγραφούν τα στοιχεία (υπολογισμοί, κατασκευές, παραδοχές, συλλογιστική πορεία) της διπλωματικής εργασίας του Π. Αβράμπου με τίτλο 'Σύστημα στίλβωσης καλουπιών σε κέντρα κατεργασιών CNC 3 αξόνων' (1) τα οποία αποτελούν βάση για την παρούσα δουλειά και θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.

Η προαναφερθείσα εργασία είχε ως σκοπό την μελέτη και την κατασκευή αυτόματου συστήματος στίλβωσης, ικανού να προσαρτηθεί σε κέντρα κατεργασίας CNC 3-αξόνων, με απώτερο σκοπό την αυτοματοποίηση της στίλβωσης καλουπιών.

Αρχικά έγινε προσπάθεια ανάλυσης της χειροκίνητης εργασίας που εκτελεί ο τεχνίτης κατά τη στίλβωση, με τελικό σκοπό την όσο καλύτερη μίμηση της από την αυτόματη διάταξη. Ως σημαντικά στοιχεία κρίθηκαν η μαθηματική προσέγγιση της τροχιάς του εργαλείου που τυπικά ακολουθείται κατά την διεργασία, ο προσδιορισμός της δύναμης που ασκεί ο τεχνίτης καθώς και η επιλογή επιπέδου στροφών για κάθε στάδιο της διαδικασίας.

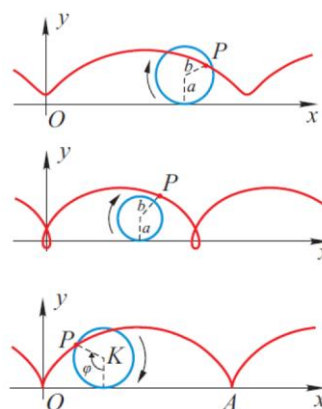
Όσον αφορά στην τροχιά κίνησης, διαπιστώθηκε ότι προτιμάται από τους τεχνίτες εφαρμογή κυκλικής κίνησης με ταυτόχρονη πρόωση. Μια τέτοια τροχιά μπορεί να μοντελοποιηθεί μαθηματικά με την τροχοειδή καμπύλη. Η τροχοειδής καμπύλη με καμπύλη οδηγό ευθεία γραμμή ορίζεται όπως παρακάτω:

Έστω κύκλος ακτίνας a που κυλιέται χωρίς να ολισθαίνει επί οριζοντίου άξονα. Έστω σημείο P , που είναι σταθερό ως προς τον κύκλο και απέχει απόσταση b από το κέντρο του. Η τροχιά που διαγράφει το σημείο P κατά την κύλιση του κύκλου ορίζεται ως τροχοειδής καμπύλη (Σχήμα 3-1) και οι σχέσεις που δίνουν τα x και y της προκύπτουν ως εξής:

$$x = a\theta - b \sin(\theta)$$

$$y = a - b \cos(\theta)$$

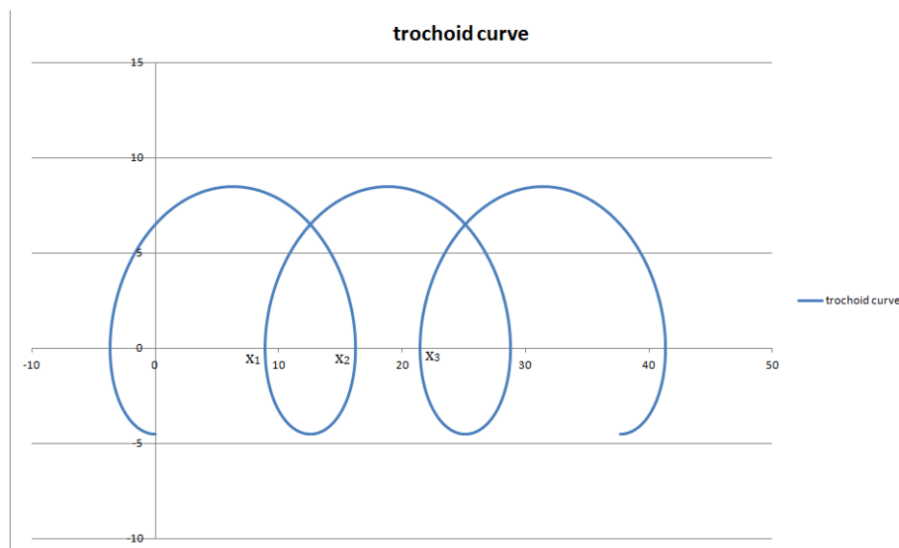
όπου θ η γωνία στροφής του κύκλου κατά την κύλιση του.



Σχήμα 3-1: Απεικόνιση τροχοειδούς καμπύλης. (1)

Η παραπάνω παρατήρηση οδήγησε στην δημιουργία προγραμματιστικού κώδικα που παράγει τα σημεία τροχοειδούς καμπύλης με καμπύλη-οδηγό οποιαδήποτε συνάρτηση, με σκοπό να χρησιμοποιηθούν μελλοντικά σαν tool path για το στιλβωτικό εργαλείο. Τονίστηκε σε αυτό το σημείο το ενδιαφέρον για δημιουργία tool path με χρήση καμπύλων Peano ή Hilbert ως οδηγούς, καθώς χρησιμοποιούνται κατά κόρον ως μοτίβα κάλυψης επιφανειών.

Στη συνέχεια έγινε μελέτη για την επιλογή της κατάλληλης τροχοειδούς καμπύλης με γνώμονα την πλήρη και ομοιόμορφη κάλυψη της υπό στίλβωσης επιφανείας. Ορίστηκαν οι κατάλληλοι μαθηματικοί περιορισμοί και θεσπίστηκαν κριτήρια επιλογής καμπύλης λαμβάνοντας υπ' όψη και τη διάμετρο του στιλβωτικού δακτυλίου (D_{tool}), όπως συνοπτικά εμφανίζονται παρακάτω (Σχήμα 3-2).



Σχήμα 3-2: Κρίσιμες αποστάσεις σε τροχειδή καμπύλη. (1)

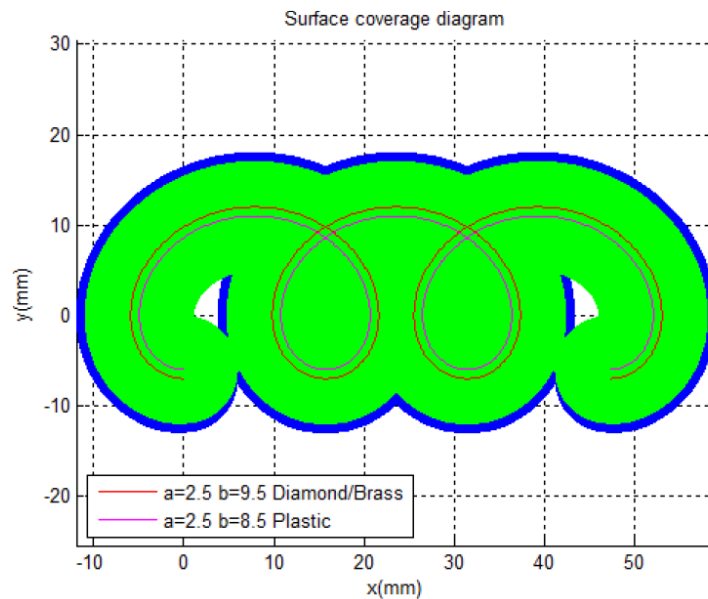
Πίνακας 3-1: Κριτήρια επιλογής τροχειδούς καμπύλης.

Συνθήκη	Μαθηματικός προσδιορισμός μεγεθών
$x_2 - x_1 \leq D_{tool}$	$(x_2 - x_1) = -2a \cdot \arccos\left(\frac{a}{b}\right) + 2b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2}$
$x_3 - x_2 \leq D_{tool}$	$(x_3 - x_2) = 2\pi a + 2a \cdot \arccos\left(\frac{a}{b}\right) - 2b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2}$
$x_3 - x_1 \leq D_{tool}$	$(x_3 - x_1) = 2\pi a$

Ένα από τα σετ καμπυλών που πληρούν τα παραπάνω κριτήρια για χρήση με το σύστημα ring-finish της NOVAPAX, είναι:

- Εκχόνδριση με διαμαντένιο δακτύλιο/ Γυάλισμα με μπρούτζινο δακτύλιο ($D_{tool}=12\text{mm}$): $a=2,5 / b=9.5$
- Γυάλισμα με πλαστικό δακτύλιο ($D_{tool}=13\text{mm}$): $a=2,5 / b=8.5$

Σημειώνεται ότι επιλέγονται διαφορετικές τροχοειδείς καμπύλες για κάθε εργαλείο λόγω της διαφοράς των διαμέτρων τους, με απώτερο σκοπό το κάθε εργαλείο να 'πατάει' σίγουρα σε επιφάνεια που έχει καλυφθεί πλήρως από το εργαλείο που εκτέλεσε την προηγούμενη σε σειρά διεργασία (Σχήμα 3-3).



Σχήμα 3-3: Παράδειγμα επικάλυψης τροχοειδών για διαφορετικά στάδια στίλβωσης. (1)

Όσον αφορά στα επίπεδα δύναμης και περιστροφικής ταχύτητας του εργαλείου μετά από παρατήρηση, μετρήσεις και επιβεβαίωση μέσω χειροκίνητων δοκιμών, αυτά εκτιμήθηκαν όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3-2).

Πίνακας 3-2: Προτεινόμενες συνθήκες κατεργασίας ανά στάδιο στίλβωσης.

	Grinding	Lapping - Fine Lapping		Polishing/Buffering	
Ring Type	Diamond	Bronze	Plastic	Plastic	Cloth
Diamond paste grit size (μm)	-	28-15-10-7	10-7	3	3
Lubricant	×	✓	✓	×	×
Force Range (N)	6-8	1.2-1.8	5.5-7	6-8	30
Speed (RPM)	~15000	~7500	~15000	~15000	*Manual

Ακολούθησε ο σχεδιασμός και η κατασκευή συστήματος με στόχο την αυτόματη επίτευξη της στιλβωτικής διεργασίας με χρήση CNC φρέζας. Λόγω μη ικανότητας της ατράκτου της φρέζας να επιτύχει τον απαιτούμενο αριθμό στροφών ανά λεπτό αποφασίστηκε η χρήση εξωτερικού περιστροφικού εργαλείου για την κίνηση των στιλβωτικών εργαλείων σε συνδυασμό με επεκτατική ντίζα. Για την οδήγηση του περιστροφικού εργαλείου μέσω της εργαλειομηχανής σχεδιάστηκε κατάλληλη ιδιοσυσκευή.

Η συσκευή (Σχήμα 3-4) αποτελείται από ένα σταθερό μέλος και ένα κινούμενο. Το σταθερό μέλος δένεται στην άτρακτο της φρέζας σαν εργαλείο. Το κινούμενο μέλος μπορεί να κινείται κατακόρυφα ως προς το σταθερό, μέσω κατάλληλων ράβδων-οδηγών που εξασφαλίζουν αφενός τη σύνδεση των δύο μελών και αφετέρου τη σταθερότητα της σχετικής τους κίνησης. Η κίνηση των ράβδων αυτών διευκολύνεται με χρήση τεσσάρων γραμμικών ρουλεμάν που είναι προσαρτημένα στο σταθερό μέλος.

Στο χαμηλότερο τμήμα του κινητού μέλους προσδένεται μέσω σφιγκτικού δακτυλίου η επεκτατική ντίζα του περιστροφικού εργαλείου στο οποίο προσαρμόζονται με σύνδεσμο τύπου 'mandrel' οι στιλβωτικοί δακτύλιοι του συστήματος Ring-finish της NOVAPAX. Για να διασφαλιστεί ότι το κέντρο του εργαλείου στην συσκευή ταυτίζεται με αυτό της εργαλειομηχανής έγιναν οι απαραίτητες εργασίες (καλιμπράρισμα, κεντράρισμα).

Για τον έλεγχο της δύναμης που ασκείται στην υπό στίλβωση επιφάνεια χρησιμοποιήθηκαν αρχικά ελαστικοί σύνδεσμοι, τα άκρα των οποίων συνδέθηκαν στα δυο μέλη της συσκευής. Έτσι, όταν η συσκευή αφεθεί ελεύθερη οι σύνδεσμοι επιμηκύνονται συγκρατώντας το πλήρες φορτίο του κινούμενου μέλους. Συνεπώς, εάν το εργαλείο έρθει σε επαφή με την υπό στίλβωση επιφάνεια σε αυτή την κατάσταση, το φορτίο που μεταφέρει σε αυτή είναι μηδενικό. Εάν όμως η συσκευή πλησιάσει κι άλλο στην επιφάνεια οι σύνδεσμοι συσπειρώνονται συγκρατώντας μικρότερο μερίδιο του βάρους του κινούμενου μέλους με αποτέλεσμα το ποσοστό του βάρους που περισσεύει να ασκείται από το εργαλείο σαν φορτίο, η τιμή του οποίου μπορεί να ελεγχθεί έμμεσα από την εργαλειομηχανή, μέσω της τιμής της μετατόπισης της συσκευής στον κατακόρυφο άξονα (άξονας Z).



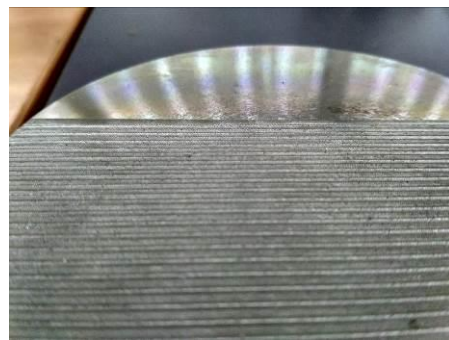
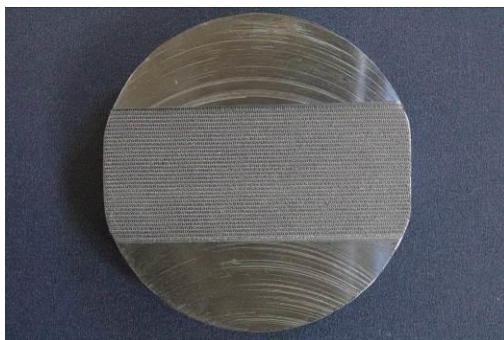
(a)



(b)

Σχήμα 3-4: Η κατασκευασμένη ιδιοσυσκευή (a)σε πλήρη έκταση, (b)σε ενδιάμεση θέση.

Σε επόμενο στάδιο και σε προετοιμασία για την χρήση της συσκευής για εκτέλεση δοκιμαστικών πειραμάτων, κρίθηκε αναγκαίο να αναπτυχθεί μια μέθοδος δημιουργίας δοκιμίων συγκεκριμένης τραχύτητας. Είναι σημαντικό να υπάρχει έλεγχος και ικανότητα πρόβλεψης της προκύπτουσας τραχύτητας των δοκιμίων για την εξασφάλιση απολύτως ελεγχόμενων πειραμάτων. Η μέθοδος δημιουργίας αρχικής τραχύτητας στο δοκίμιο που ακολουθήθηκε, βασίζεται στη δημιουργία αυλακώσεων με σφαιρικό κονδύλι συγκεκριμένης ακτίνας (Σχήμα 3-5). Για την πρόβλεψη της προκύπτουσας τραχύτητας, η διαδικασία περιγράφηκε μαθηματικά, ενώ λήφθηκαν υπόψη και τα στοιχεία του κατασκευαστή των κονδυλίων. Η μέθοδος διαπιστώθηκε να έχει ικανοποιητική ακρίβεια με κάποιες αποκλίσεις που οφείλονται σε 'θόρυβο' που προκαλείται από τις δονήσεις της εργαλειομηχανής.



Σχήμα 3-5: Δοκίμιο τραχύτητας.

Τέλος, με την ολοκληρωμένη πλέον μέθοδο και πειραματική διάταξη εκτελέστηκαν δοκιμαστικά πειράματα τόσο χειροκίνητα όσο και στο κέντρο κατεργασιών Haas TM-1 του εργαστηρίου (Σχήμα 3-6).



Σχήμα 3-6: Η διάταξη κατά το πείραμα. (1)

Από τις δοκιμές επιβεβαιώθηκε η ικανότητα του αυτόματου συστήματος να οδηγεί σωστά το εργαλείο στην επιθυμητή τροχιά και να δίνει ομοιόμορφο αποτέλεσμα. Τονίστηκε η ανάγκη εισαγωγής μεθόδου ακριβούς μέτρησης και ελέγχου της δύναμης, καθώς και η ανάγκη διεξαγωγής πειραμάτων Taguchi για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών στίλβωσης.

4 Τροποποιήσεις στην συσκευή στίλβωσης

4.1 Εισαγωγή

Για την βελτιστοποίηση του συστήματος στίλβωσης και μετά από προσωπικές παρατηρήσεις τόσο μέσω χειροκίνητων όσο και μέσω αυτόματων δοκιμών κρίθηκε αναγκαία μια σειρά τροποποιήσεων. Οι τροποποιήσεις αυτές αφορούν βασικά χαρακτηριστικά της συσκευής ή της πειραματικής διάταξης και θα αναφερθούν εκτενέστερα παρακάτω.

4.2 Έλεγχος της ασκούμενης δύναμης.

Όπως αναφέρθηκε και στα συμπεράσματα της διπλωματικής του Π. Αβράμπου, η χρήση των ελαστικών φορέων (δακτυλίων) κρίνεται μη επαρκής για το σωστό έλεγχο της δύναμης που εφαρμόζεται στην υπό στίλβωση επιφάνεια. Είναι, συνεπώς, αναγκαία η αντικατάστασή τους με διαφορετικό σύστημα ελέγχου της δύναμης.

Ιδανική επιλογή θα ήταν ένα ενεργητικό σύστημα ελέγχου το οποίο θα μπορούσε να προγραμματιστεί ώστε να αντιδρά αυτόματα σε σήματα που θα καταγράφονταν από αντίστοιχα αισθητήρια όργανα κατά τη διάρκεια της διεργασίας, αλλάζοντας την τιμή της εφαρμοζόμενης δύναμης κατά περίπτωση. Υπάρχουν αρκετά παραδείγματα στην βιβλιογραφία με εφαρμογή τέτοιων συστημάτων στα οποία συνήθως γίνεται χρήση πνευματικών ενεργοποιητών. Η ανάπτυξη και η μελέτη ενός τέτοιου συστήματος, εκτός του ότι θα άλλαζε ριζικά τη μορφή του συστήματος, αποτελεί από μόνη της αντικείμενο ερευνητικής εργασίας και θα ξέφευγε από τους στόχους της παρούσας δουλειάς.

Συνεπώς, για την βελτιστοποίηση του συστήματος ως έχει και την επιβεβαίωση της λειτουργικότητας και αποτελεσματικότητας του στην στίλβωση επιφανειών, επιλέγεται η αντικατάσταση των ελαστικών φορέων με ένα πιο εύρωστο σύστημα παθητικού ελέγχου που κάνει χρήση ελατηρίων.

Στα πλεονεκτήματα των ελατηρίων είναι το χαμηλό κόστος και η ευκολία κατασκευής, η λειτουργική τους σταθερότητα, ο μεγάλος χρόνος ζωής και η ευχέρεια που δίνουν στον σχεδιαστή, μέσω της μεγάλης ποικιλίας σε χρησιμοποιούμενα υλικά και τύπους ελατηρίων, να τα χρησιμοποιεί για πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών. Στη συνέχεια, περιγράφονται κάποια βασικά στοιχεία θεωρίας για το σχεδιασμό ελατηρίων, οι στόχοι, οι προδιαγραφές και η στρατηγική της σχεδιαστικής διαδικασίας και παρουσιάζονται τα αποτελέσματά της.

4.2.1 Στοιχεία θεωρίας

4.2.1.1 Τάσεις σε ελατήρια

Έστω ελικοειδές ελατήριο με ακτίνα ελίκωσης $R=D/2$ και διάμετρο σύρματος d , καταπονούμενο με δύναμη F . Τότε η διατομή του ελατηρίου καταπονείται με ροπή στρέψης $T=PR$ λόγω της εκκεντρότητας του φορτίου F και σε διάτμηση λόγω F , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4-1). Η διατμητική τάση που εμφανίζεται στο ελατήριο, ως αποτέλεσμα των παραπάνω φαινομένων ορίζεται ως εξής:

$$\tau = \pm \frac{Td}{2J} + \frac{F}{A} \quad (4-1)$$

Όπου $J = \frac{\pi d^4}{32}$ η πολική ροπή αδράνειας της διατομής του ελατηρίου

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \text{ το εμβαδόν της}$$

και $T = F \frac{D}{2}$ η ροπή στρέψης.

Αντικαθιστώντας παίρνουμε:

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \quad \text{ή} \quad \tau = \frac{2C+1}{2C} \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (4-2)$$

Όπου C ο δείκτης του ελατηρίου (spring index) όπου αποτελεί μέτρο της κυρτότητας του πηνίου με $C = \frac{D}{d}$. Κατά τον σχεδιασμό των ελατηρίων προτιμώνται τιμές του δείκτη C μεταξύ του 4 και 12.

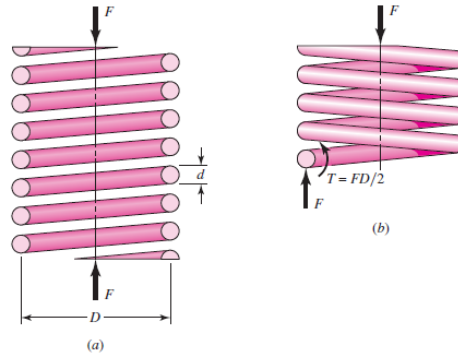
Θέτοντας $K_s = \frac{2C+1}{2C}$ έχω από τη σχέση (4-2): $\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (4-3)$

Η παραπάνω σχέση ορίζεται για ίσιο σύρμα κάτι το οποίο δεν ισχύει στην περίπτωση των ελατηρίων. Η κυρτότητα του σύρματος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης στο εσωτερικό του ελατηρίου και στην αντίστοιχη μείωση της στο εξωτερικό του. Λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο αυτό, ο συντελεστής K_s αντικαθίσταται στην παραπάνω εξίσωση με έναν εκ των παρακάτω συντελεστών διόρθωσης της στρεπτικής τάσης λόγω διάτμησης και καμπυλότητας.

Συντελεστής Wahl: $K_w = \frac{4C-1}{4C-4} - \frac{0.615}{C} \quad (4-4)$

Συντελεστής Bergsträsser:
$$K_B = \frac{4C+2}{4C-3} \quad (4-5)$$

Στον συγκεκριμένο υπολογισμό θα γίνει χρήση του συντελεστή Bergsträsser.



Σχήμα 4-2: Τρόπος φόρτισης ελατηρίου. (26)

4.2.1.2 Παραμόρφωση Ελατηρίων

Η ενέργεια παραμόρφωσης του ελατηρίου (ως αποτέλεσμα της στρέψης και της διάτμησης) δίνεται ως εξής:

$$U = \frac{T^2 l}{2G} + \frac{F^2 l}{d^2 G} \quad (4-6)$$

Όπου G το μέτρο διάτμησης, N ο αριθμός των ενεργών σπειρών και l το μήκος του σύρματος.

Αντικαθιστώντας $T = \frac{FD}{2}$, $J = \frac{\pi d^4}{32}$, $A = \frac{\pi d^2}{4}$, $l = \pi DN$, προκύπτει:

$$U = \frac{4F^2 D^3 N}{d^4 G} + \frac{2F^2 DN}{d^2 G} \quad (4-7)$$

Από θεώρημα Castigliano έχω:

$$y = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{8FD^3 N}{d^4 G} + \frac{4FDN}{d^2 G} = \frac{8FD^3 N}{d^4 G} \left(1 + \frac{1}{2C^2} \right) \cong \frac{8FD^3 N}{d^4 G} \quad (4-8)$$

Και αφού $K = F/y$ έχω:

$$K \cong \frac{d^4 G}{8D^3 N} \quad (4-9)$$

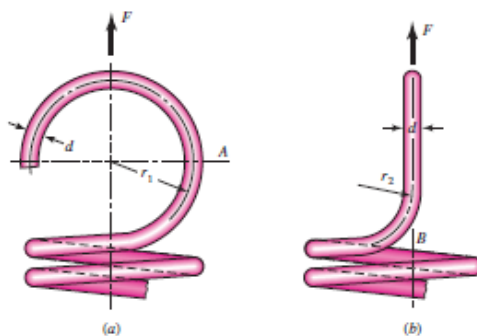
Όπου K η σταθερά του ελατηρίου.

4.2.1.3 Ελατήρια έλξεως

Τα ελατήρια έλξεως φορτίζονται με εφελκυστικά φορτία, απαιτούν ένα μέσο μεταφοράς του φορτίου από την έδραση τους στο σώμα του ελατηρίου και κατασκευάζονται με προένταση.

- Υπολογισμοί στον γάντζο:

Σε περίπτωση που επιλεγεί ελατήριο έλξεως με γάντζο είναι σημαντικό να ευρεθούν οι επικίνδυνες διατομές του και να υπολογιστεί το μέγεθος της καταπόνησής τους. Υπάρχουν διάφοροι τύποι γάντζων ανάλογα με τους περιορισμούς της κάθε εφαρμογής. Έστω ότι επιλέγεται γάντζος τύπου όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4-3):



Σχήμα 4-4: Φόρτιση γάντζου. (26)

Τα σημεία ενδιαφέροντος σχεδιαστικά έχουν σημειωθεί ως A και B.

Η μέγιστη τάση λόγω κάμψης και εφελκυσμού εμφανίζεται στο σημείο A του γάντζου και δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_A = F \left[(K)_A \frac{16D}{\pi d^3} + \frac{4}{\pi d^2} \right] \quad (4-10)$$

Όπου $(K)_A$ διορθωτικός συντελεστής λόγω καμπυλότητας με:

$$(K)_A = \frac{4c_1^2 - c_1 - 1}{4c_1(c_1 - 1)} \quad \text{με} \quad c_1 = \frac{2r_1}{d}$$

Η μέγιστη διατμητική τάση λόγω στρέψης και διάτμησης, εμφανίζεται στο σημείο B και δίνεται από τον τύπο:

$$\tau_B = (K)_B \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (4-11)$$

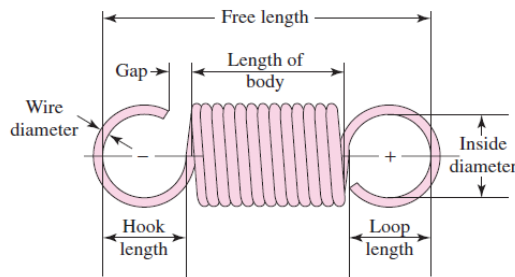
Όπου $(K)_B$ διορθωτικός συντελεστής λόγω καμπυλότητας με:

$$(K)_B = \frac{4C_2 - 1}{4C_2 - 4} \quad C_2 = \frac{2r_2}{d}$$

- Συνολικό μήκος ελατηρίου έκτασης

Το συνολικό μήκος του ελατηρίου L_0 , συνυπολογίζοντας το μήκος των γάντζων, δίνεται από τον τύπο:

$$L_0 = (2C - 1 + N)d \quad (4-12)$$



Σχήμα 4-5: Ορισμός μηκών στο ελατήριο. (26)

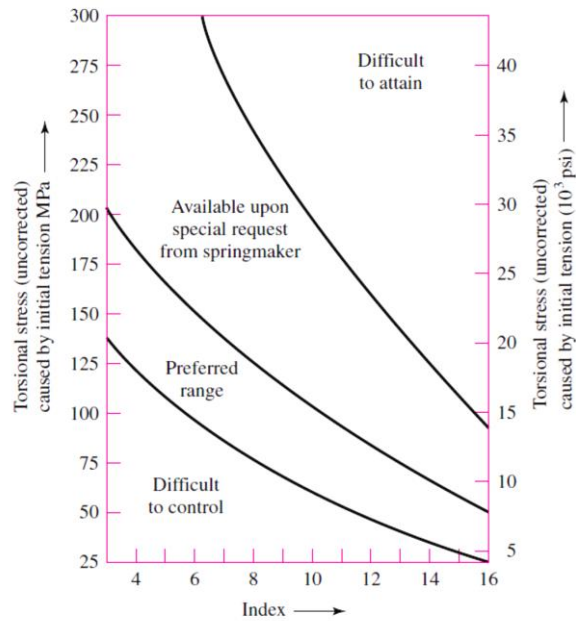
- Προένταση

Κατά τη διαδικασία περιελίξεως ενός ελατηρίου έλξεως, το σύρμα τυλίγεται με μικρότερο βήμα από αυτό που θα απαιτούταν ώστε οι σπείρες του να εφάπτονται. Αυτό συμβαίνει ώστε να επιτυγχάνεται με ακρίβεια το επιθυμητό ελεύθερο μήκος του. Ως αποτέλεσμα όλα τα ελατήρια έλξεως έρχονται με μια αρχική τάση η οποία πρέπει να ξεπεραστεί ώστε το ελατήριο να αρχίσει να παραμορφώνεται.

Τα επιθυμητά όρια για την αρχική τάση σε συνάρτηση με τον δείκτη C του ελατηρίου δίνονται από τη σχέση:

$$\tau_i = \frac{33500}{e^{0.105C}} \pm 1000 \left(4 - \frac{C-3}{6.5} \right) \text{ psi} \quad (4-13)$$

Όπως φαίνονται και στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 4-4):



Σχήμα 4-6: Επιθυμητά όρια προέντασης ελατηρίων έλξης. (26)

Μια εκτίμηση της προκύπτουσας αρχικής τάσης μπορεί να γίνει με τον εμπειρικό τύπο:

$$\tau_i = \frac{G}{100C} \quad (4-14)$$

Και συνεπώς μια εκτίμηση της αρχικής δύναμης προκύπτει:

$$P_i = \frac{\pi d^3}{8D} \tau_i \quad (4-15)$$

Στην περίπτωση σύρματος ανοξειδωτου χάλυβα η παραπάνω τιμή μειώνεται κατά 15% και σε περίπτωση θερμικής κατεργασίας κατά 25-35%.

4.2.1.4 Στοιχεία υλικών ελατηρίων

Τα σύρματα των ελατηρίων μπορούν να παραχθούν από μεγάλη ποικιλία υλικών, όπως απλοί χάλυβες, κράματα χαλύβων, μπρούντζο, χαλκό και κράματα νικελίου.

Τα υλικά των ελατηρίων μπορούν να συγκριθούν με βάση το όριο αντοχής τους σε εφελκυσμό. Η τιμή αυτή όμως διαφέρει αρκετά με διαφορετικές τιμές διαμέτρου σύρματος με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ορισθεί χωρίς να ορισθεί πρώτα το μέγεθος του σύρματος. Έχει παρατηρηθεί όμως ότι το διάγραμμα του ορίου αντοχής μερικών υλικών προς τη διάμετρο του παραγόμενου σύρματος τείνει να είναι γραμμικό, όταν αποτυπωθεί σε λογαριθμική κλίμακα. Η εξίσωση της γραμμής γράφεται:

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad (4-16)$$

Όπου S_{ut} το όριο αντοχής σε εφελκυσμό σε MPa

d η διάμετρος του σύρματος σε mm

και A , m σταθερές του υλικού μετρούμενες σε MPa mm^m και mm αντίστοιχα.

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί μια ικανοποιητική εκτίμηση του ορίου αντοχής σε εφελκυσμό ενός υλικού, ενώ οι σταθερές A και m για τα πιο κοινά υλικά παραγωγής ελατηρίων φαίνονται στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1: Υλικά κατασκευής ελατηρίων

Υλικό	ASTM-EN No.	Διάμετρος d (mm)	m	A (MPa mm ^m)	Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)
Music wire	A228				
	EN1270-1	0.1-6.5	0.145	2211	200
Oil tempered wire	SH				
	A229				
Hard-drawn wire	EN1270-1	0.5-12.7	0.187	1855	196.5
	SH				
Chrome-Vanadium	A227				
	EN1270-1	0.7-12.7	0.19	1783	198
Chrome-Silicon	SM				
	A232				
FDSiCr	EN1270-2	0.8-11.1	0.168	2005	203.4
	TDC				
Music Wire (Μουσικό σύρμα):	A401				
	EN1270-2	1.6- 9.5	0.108	1974	203.4

Πιο αναλυτικά, αναφέρονται παρακάτω τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα υλικά για σύρματα ελατηρίων και τα βασικά χαρακτηριστικά τους:

Music Wire (Μουσικό σύρμα):

Είναι το καλύτερο, ανθεκτικότερο και ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό για μικρά ελατήρια. Σε εναλλασσόμενη φόρτιση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής απ' όλα τα άλλα υλικά. Διαθέσιμο σε διαμέτρους από 0.12 έως 3 mm. Δεν χρησιμοποιείται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 120°C και κάτω του μηδενός.

Oil tempered wire (Σύρμα βαμμένο σε λάδι):

Είναι χάλυβας ελατηρίων γενικής χρήσης. Χρησιμοποιείται για μεγαλύτερες διαμέτρους σύρματος. Διαθέσιμος σε διαμέτρους από 3 έως 12 mm. Ακατάλληλος για κρουστικά φορτία και για θερμοκρασίες κάτω του μηδενός ή πάνω από 180°C.

Hard drawn wire (Σύρμα ψυχρής εξέλασης):

Αυτός είναι ο φθηνότερος γενικής χρήσης χάλυβας ελατηρίων και πρέπει να χρησιμοποιείται όπου η διάρκεια ζωής, ακρίβεια και παραμόρφωση δεν παίζουν σημαντικό ρόλο. Διαθέσιμος σε διαμέτρους από 0.8 έως 12 mm. Ακατάλληλος για θερμοκρασίες κάτω του μηδενός και πάνω από 120°C.

Chrome-Vanadium (Χρωμιοβαναδιούχος χάλυβας):

Είναι το πιο κοινό κράμα ελατηρίων και για συνθήκες υψηλής τάσης, κατάλληλο και για κρούσεις. Χρησιμοποιείται για ελατήρια βαλβίδων μηχανών αεροπλάνων και για θερμοκρασίες μέχρι 220°C. Διαθέσιμος σε ανοπτημένη ή προβαμμένη μορφή και σε διαμέτρους από 0.8 έως 12 mm.

Chrome-Silicon (Χρωμιοσιλυριτιούχος χάλυβας):

Έξοχο υλικό για ελατήρια που καταπονούνται σε μεγάλες τάσεις, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και φορτίζονται σε κρούση. Διαθέσιμο σε διαμέτρους από 0.8 έως 12 mm και χρησιμοποιείται σε θερμοκρασίες μέχρι και 250°C.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα ελατήρια καταπονούνται κυρίως σε διατμητικά φορτία λόγω στρέψης, ενώ σημαντική καταπόνηση ειδικότερα για τα ελατήρια έλξης είναι η φόρτιση των γάντζων τόσο σε κάμψη όσο και σε διάτμηση. Συνεπώς για τον σχεδιασμό τους απαιτείται η γνώση του ορίου διαρροής και του ορίου διαρροής σε διάτμηση του εκάστοτε υλικού. Είναι σύνηθες όμως για τα υλικά των ελατηρίων να εξετάζονται μόνο ως προς το όριο αντοχής τους σε εφελκυσμό. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του μικρού κόστους και της απλότητας που έχουν τέτοιου είδους πειράματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις μια προσεγγιστική σχέση για τον υπολογισμό του ορίου διαρροής μέσω του ορίου αντοχής σε εφελκυσμό έχει ως εξής:

$$S_y = 0.75S_{ut} \quad (4-17)$$

όπου S_y το όριο διαρροής,

και για το όριο διαρροής σε διάτμηση, μέσω της θεωρίας ισοδύναμου έργου παραμόρφωσης:

$$S_{sy} = 0.577S_y \quad (4-18)$$

Όπου S_{sy} το όριο διαρροής σε διάτμηση.

Πιο αναλυτικά, για διαφορετικά υλικά και διαφορετικά τμήματα του ελατηρίου, οι προσεγγιστικές σχέσεις των ορίων διαρροής ως προς το όριο αντοχής σε εφελκυσμό φαίνονται στον Πίνακα 4-2. Οι τιμές είναι για ελατήρια έλξης σε στατική λειτουργία.

Πίνακας 4-2: Προσέγγιση ορίου διαρροής από όριο αντοχής σε εφελκυσμό.

Τύπος υλικού	Ποσοστό ορίου αντοχής σε εφελκυσμό (%)		
	Σε στρέψη		Σε κάμψη
	Σώμα	Άκρα	Άκρα
Πατενταρισμένοι χάλυβες, ψυχρής έλασης ή σκληρυμένοι και βαμμένοι.	45 - 50	40	75
Ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες ή μη σιδηρούχα κράματα	35	30	55

4.2.1.5 Κριτήρια αστοχίας στατικού υπολογισμού

Για τον έλεγχο της αντοχής ενός ελατηρίου έλξης σε στατική λειτουργία αρκεί η εκπλήρωση των παρακάτω συνθηκών:

Συντελεστής ασφαλείας στο σώμα του ελατηρίου n_s (στρέψη):

$$n_s = \frac{S_{sy}}{\tau_{max}} > 1 \quad (4-19)$$

Συντελεστής ασφαλείας στον γάντζο n_{hb} (κάμψη – σημείο A (Σχήμα 4-7)):

$$n_{hb} = \frac{S_y}{\sigma_{Amax}} > 1 \quad (4-20)$$

Συντελεστής ασφαλείας στον γάντζο n_{hs} (διάτμηση – σημείο B (Σχήμα 4-8)):

$$n_{hs} = \frac{S_{sy}}{\tau_{Bmax}} > 1 \quad (4-21)$$

4.2.1.6 Δυναμικοί υπολογισμοί σε ελατήρια

4.2.1.6.1 Καταπόνησή σε κόπωση

Πολύ συχνά τα ελατήρια καλούνται να λειτουργήσουν κάτω από φορτία μεταβαλλόμενου μεγέθους ή/και διεύθυνσης, με αποτέλεσμα να καταπονούνται σε κόπωση λόγω στρέψης. Αν και η χρήση της συσκευής σε πρώτο στάδιο (γυάλισμα επίπεδης επιφάνειας) δεν περιλαμβάνει μεταβολές στο φορτίο, καθώς γίνεται εφαρμογή σταθερής δύναμης καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας, θεωρείται σημαντικό να γίνει ανάλυση της αντοχής των ελατηρίων σε δυναμικές καταπονήσεις καθώς και της δυναμικής συμπεριφοράς τους. Αυτό είναι θεμιτό αφενός διότι τα ελατήρια θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και σε επόμενα στάδια όπου θα απαιτείται εφαρμογή μεταβλητού φορτίου (γυάλισμα καμπύλης επιφάνειας) και αφετέρου για να αποκλειστεί η περίπτωση του συντονισμού της ιδιοσυχνότητας τους με τις συχνότητες που παράγονται κατά τη διεργασία από την εργαλειομηχανή και το Dremel.

Παρακάτω θα γίνει αναφορά στα βασικά στοιχεία θεωρίας που αφορούν στον δυναμικό υπολογισμό των ελατηρίων, που έχει ως σκοπό την εξασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας του ελατηρίου σε μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης.

Αρχικά είναι σημαντικό να οριστεί το όριο διαρκούς αντοχής (S_e) και το όριο διαρκούς αντοχής σε διάτμηση (S_{se}). Το όριο διαρκούς αντοχής ορίζεται ως η τιμή του εύρους τάσης (σ_a) κάτω από την οποία το υλικό μπορεί να εκτελέσει πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης. Για χάλυβες το πειραματικό όριο διαρκούς αντοχής (S'_e) προσεγγίζεται ως εξής:

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut}, & S_{ut} \leq 1400MPa \\ 700MPa, & S_{ut} > 1400MPa \end{cases}$$

Και για την εύρεση του πραγματικού ορίου αντοχής ορίζεται η σχέση:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e \quad (4-22)$$

Όπου k_a ο διορθωτικός συντελεστής επιφανειακής κατεργασίας με:

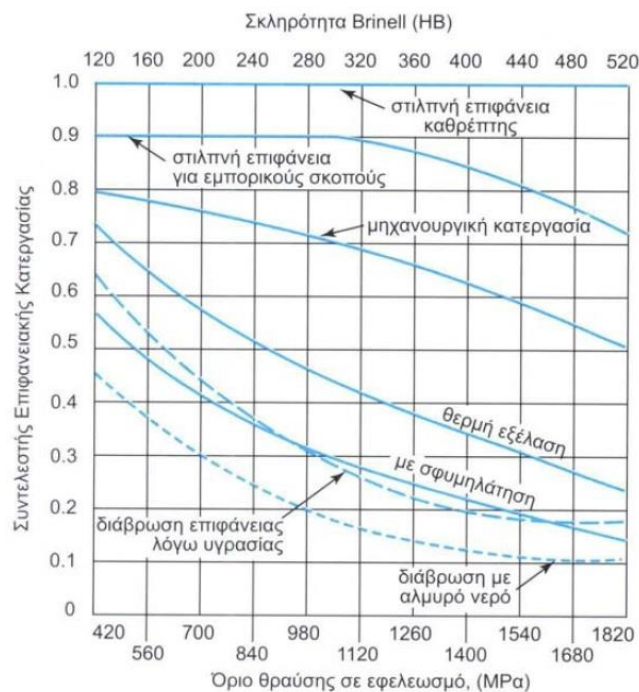
$$k_a = S_{ut}^b$$

Με a, b συντελεστές όπως προκύπτουν από τον Πίνακα 4-3:

Πίνακας 4-3: Τιμές διορθωτικού συντελεστή επιφανειακής κατεργασίας.

Τύπος κατεργασίας	a	b
Λείανση	1.58	-0.085
Μηχανουργική κατεργασία ή ψυχρή εξέλαση	4.51	-0.265
Θερμή εξέλαση	57.7	-0.718
Χωρίς κατεργασία	272	-0.995

Ή εναλλακτικά όπως προκύπτει από το διάγραμμα 4-5:



Σχήμα 4-9: Τιμές διορθωτικού συντελεστή επιφανειακής κατεργασίας.

k_b ο διορθωτικός συντελεστής μεγέθους που για κάμψη ή στρέψη δίνεται από τον τύπο:

$$k_b = \begin{cases} 1.24d^{-0.107}, & 2.79 \text{ mm} \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51^{-0.157}, & 51 \text{ mm} \leq d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Και για αξονική φόρτιση $k_b = 1$.

k_c ο διορθωτικός συντελεστής είδους φόρτισης με:

$$k_c = \begin{cases} 1, & \text{για κάμψη} \\ 0,85, & \text{για αξονική φόρτιση} \\ 0,59, & \text{για στέψη} \end{cases}$$

kd ο διορθωτικός συντελεστής θερμοκρασίας όπως φαίνεται στον πίνακα 4-4:

Πίνακας 4-4: Τιμές διορθωτικού συντελεστή θερμοκρασίας.

Θερμοκρασία (°C)	kd
20	1
50	1.01
100	1.02
150	1.025
200	1.02

ke ο διορθωτικός συντελεστής αξιοπιστίας όπως φαίνεται στον πίνακα 4-5:

Πίνακας 4-5: Τιμές διορθωτικού συντελεστή αξιοπιστίας.

Αξιοπιστία (%)	ke
50	1
90	0.897
95	0.868
99	0.814

Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν στοιχεία για τον χάλυβα του ελατηρίου, σύμφωνα με τον Zimmerli για χάλυβες ελατηρίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω τιμές ορίων διαρκούς αντοχής σε διάτμηση:

$$S_{se} = 310 \text{ MPa}, \text{ για ελατήρια χωρίς σφυρηλασία}$$

$$S_{se} = 465 \text{ MPa}, \text{ για ελατήρια με σφυρηλασία.}$$

Για ένα ελατήριο έλξης που λειτουργεί μεταξύ δύο τιμών δύναμης F_{max} και F_{min} το εύρος της δύναμης δίνεται από τη σχέση:

$$F_a = \frac{F_{max} - F_{min}}{2}$$

Και η μέση δύναμη:

$$F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2}$$

Με τις αντίστοιχες διατμητικές τάσεις τους (στο σώμα του ελατηρίου):

$$\tau_a = \frac{K_B(8F_a D)}{\pi d^3}$$

$$\tau_m = \frac{K_B(8F_m D)}{\pi d^3} = \frac{F_m}{F_a} \tau_a$$

Όπου D διάμετρος του ελατηρίου,

d η διάμετρος του σύρματος

και K_B ο διορθωτικός συντελεστής Bergsträsser (4-5).

Ως κριτήριο αστοχίας στην κόπωση επιλέγεται ο κανόνας του Soderberg:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n_f} \quad (4-23)$$

Ή για διάτμηση:

$$\frac{\tau_a}{S_{se}} + \frac{\tau_m}{S_{sy}} = \frac{1}{n_f} \quad (4-24)$$

Όπου n_f ο συντελεστής ασφαλείας σε κόπωση.

Στην περίπτωση των ελατηρίων έλξης πρέπει να ελεγχθεί τόσο το σώμα του ελατηρίου όσο και ο γάντζος του στα σημεία που περιεγράφηκαν και παραπάνω.

4.2.1.7 Κρίσιμη συχνότητα ελατηρίου:

Η κρίσιμη συχνότητα ελατηρίου με μέση διάμετρο D, διάμετρο σύρματος d, αριθμό ενεργών σπειρών N_a και σταθεράς k υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{kg}{W}} \quad (4-25)$$

όπου W το βάρος του ενεργού μέρους του ελατηρίου με:

$$W = \frac{\pi^2 d^2 D N_a \gamma}{4}$$

όπου γ το ειδικό βάρος.

Η συχνότητα λειτουργίας του ελατηρίου πρέπει να είναι 15 με 20 φορές μικρότερη από την κρίσιμη συχνότητα ώστε να αποφευχθεί ο συντονισμός.

4.2.2 Περιγραφή του προβλήματος – Προδιαγραφές σχεδιασμού.

Κύριος στόχος της σχεδιαστικής διαδικασίας είναι η κατασκευή ελατηρίων έλξης με σκοπό τον παθητικό έλεγχο του φορτίου που ασκείται από τον στιλβωτικό δακτύλιο στην επιφάνεια του δοκιμίου. Η έδραση των ελατηρίων γίνεται στο σταθερό μέρος της συσκευής (στο μέρος που συγκρατείται από τη φρέζα) και συγκρατούν, με την σειρά τους, τη μάζα του κινητού μέρους συμπεριλαμβανομένης και της απόληξης του περιστροφικού εργαλείου που άπτεται της επιφανείας του δοκιμίου. Ο έλεγχος του φορτίου θα γίνεται μέσω του ελέγχου του μήκους των ελατηρίων. Πιο συγκεκριμένα η δύναμη των ελατηρίων, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από τη επιμήκυνση τους και την αρχική τους τάση, αφαιρείται από το βάρος του κινητού μέρους δίνοντας το φορτίο που καταλήγει να καταπονεί την επιφάνεια του δοκιμίου. Για την απλοποίηση του μοντέλου τα τέσσερα ελατήρια σταθεράς K της συσκευής μοντελοποιούνται ως ένα ελατήριο σταθεράς $K_T=4*K$ καθώς τα ελατήρια είναι συνδεδεμένα παράλληλα. Εάν P το φορτίο που τελικά εφαρμόζεται, έχω:

$$P = W - (K_T \delta + F_i)$$

Όπου W το βάρος του κινητού μέρους με $W = mg = 17.66 \text{ N}$,

δ η απόκλιση του ελατηρίου από τη θέση ισορροπίας του

και F_i το άθροισμα των αρχικών δυνάμεων των ελατηρίων.

Σημαντικό συνεπώς είναι να μετρηθεί η μάζα του κινούμενου μέλους της συσκευής καθώς παίζει σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό της προκύπτουσας δύναμης. Με χρήση ζυγαριάς ακριβείας 0.01g η παραπάνω μετρήθηκε ίση με 1800 gr που αντιστοιχεί σε βάρος 17.66 Newton. Από αυτό το βάρος αυτό, είναι επιθυμητό η συσκευή να είναι ικανή να ασκήσει στην υπό στίλβωση επιφάνεια φορτίο από μηδενικό μέχρι 10 Newton.

Έπειτα πρέπει να οριστούν οι περιορισμοί που υπάρχουν στον σχεδιασμό των ελατηρίων. Οι περιορισμοί αυτοί προκύπτουν από τη γεωμετρία της συσκευής.

Η διαδρομή των ελατηρίων και το μήκος τους περιορίζονται από τις μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις των κοχλιών στους οποίους θα εδραστούν πάνω στη συσκευή. Υπάρχουν δύο δυνατές θέσεις για τους κοχλίες στήριξης των ελατηρίων στο κινητό μέρος της συσκευής, που στο εξής θα αναφέρονται ως θέσεις 1 και 2. Οι μετρήσεις έγιναν λαμβάνοντας υπόψη και την προσθήκη της επεκτατικής ντίζας του Dremel.

Κοχλίες στη θέση 1:

Μέγιστη Απόσταση: 235 mm

Ελάχιστη Απόσταση χωρίς το Dremel: 105 mm

Ελάχιστη Απόσταση με το Dremel: 178 mm

Κοχλίες στη θέση 2:

Μέγιστη Απόσταση: 170 mm

Ελάχιστη Απόσταση χωρίς το Dremel: 42 mm

Ελάχιστη Απόσταση με το Dremel: 115 mm

Η μέγιστη διαδρομή ελατηρίου συνεπώς, αφήνοντας μια απόσταση ασφαλείας από τις ασφάλειες στο άνω μέρος των αξόνων, επιλέγεται $\delta=50$ mm.

Άλλοι περιορισμοί που προκύπτουν από τη γεωμετρία της συσκευής είναι:

- Μέγιστη εξωτερική διάμετρος ελατηρίου: 15mm
- Ελάχιστη διάμετρος γάντζου: 9mm

Οι τελευταίοι περιορισμοί δεν είναι αυστηροί καθώς αναφέρονται στους ήδη υπάρχοντες κοχλίες έδρασης των ελατηρίων οι οποίοι μπορούν να αντικατασταθούν. Παρακάτω παρουσιάζονται συνολικά οι περιορισμοί που αναφέρθηκαν παραπάνω (Πίνακας 4-6).

Πίνακας 4-6: Σχεδιαστικοί περιορισμοί.

Μέγεθος	Συμβολισμός	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Φορτίο	P	0 N	10 N
Απόσταση άκρων ελατηρίου	$\delta_{\theta 1}$	178 mm	235 mm
	$\delta_{\theta 2}$	115 mm	170 mm
Εξωτερική διάμετρος ελατηρίων	Do	-	15 mm
Διάμετρος γάντζου	Dh	9 mm	-

4.2.3 Στρατηγική σχεδιασμού

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά τα βήματα που ακολουθούνται για το σχεδιασμό των ελατηρίων.

1. Επιλογή υλικού

Αρχικά πρέπει να επιλεγεί το υλικό κατασκευής των ελατηρίων. Τα ελατήρια που θα κατασκευαστούν θα καταπονούνται σε μικρά (έως 10N) και κατά κύριο λόγο στατικά φορτία και κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας. Αυτό μας οδηγεί στην αρχική επιλογή του συνηθέστερα χρησιμοποιούμενου υλικού για μεταλλικά ελατήρια δηλαδή

του χάλυβα EN1270-1 SM (Hard drawn wire). Την επιλογή αυτή ενισχύει και το χαμηλό κόστος του συγκεκριμένου υλικού. Σημειώνεται ότι η επιλογή αυτή θα ελεγχθεί στα επόμενα στάδια του σχεδιασμού και αν κριθεί σκόπιμο θα αντικατασταθεί από χάλυβα υψηλότερης αντοχής (Music wire - EN1270-1 SH).

2. Υπολογισμός επιθυμητής σταθεράς ελατηρίου

Όπως προκύπτει από προηγούμενη ενότητα τα ελατήρια που θα τοποθετηθούν στην συσκευή θα κληθούν να μεταβάλουν το φορτίο κατά $P_{max} = 10N$ σε μια μέγιστη διαδρομή $\delta=50$ mm. Συνεπώς η επιθυμητή σταθερά τους υπολογίζεται ως εξής:

$$K_T = \frac{P_{max}}{\delta_s} = \frac{10 \text{ N}}{50 \text{ mm}} = 0.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Και αφού τα ελατήρια είναι συνδεδεμένα παράλληλα και το πλήθος τους είναι ίσο με $N_s = 4$ προκύπτει:

$$K = \frac{K_T}{N_s} = \frac{0.2 \text{ N}}{4 \text{ mm}} = 0.05 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Με υπολογισμένη την επιθυμητή σταθερά των ελατηρίων μένει ο υπολογισμός των υπολοίπων χαρακτηριστικών τους. Πιο συγκριμένα πρέπει να υπολογιστούν:

- Η διάμετρος του σύρματος d
- Η μέση διάμετρος του πηνίου D
- Ο αριθμός των ενεργών σπειρών N
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των γάντζων

Τα παραπάνω βασικά στοιχεία ορίζουν και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των ελατηρίων όπως η αντοχή τους σε διάφορες καταπονήσεις, το συνολικό τους μήκος, τη δυναμική τους συμπεριφορά κα.

3. Επιλογή διαμέτρων ελατηρίου και σύρματος

Στη συνέχεια επιλέγεται διάμετρος ελατηρίου και σύρματος με σεβασμό στους περιορισμούς του πίνακα (4-6). Οι τιμές που επιλέγονται χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του δείκτη C ο οποίος πρέπει να προκύψει μεταξύ των τιμών 4 και 12.

4. Υπολογισμός ενεργών σπειρών ελατηρίου και συνολικού μήκους

Μέσω της σχέσης (4-9) υπολογίζεται ο αριθμός ενεργών σπειρών του ελατηρίου και στη συνέχεια μέσω της σχέσης (4-12) προκύπτει το συνολικό μήκος του ελατηρίου.

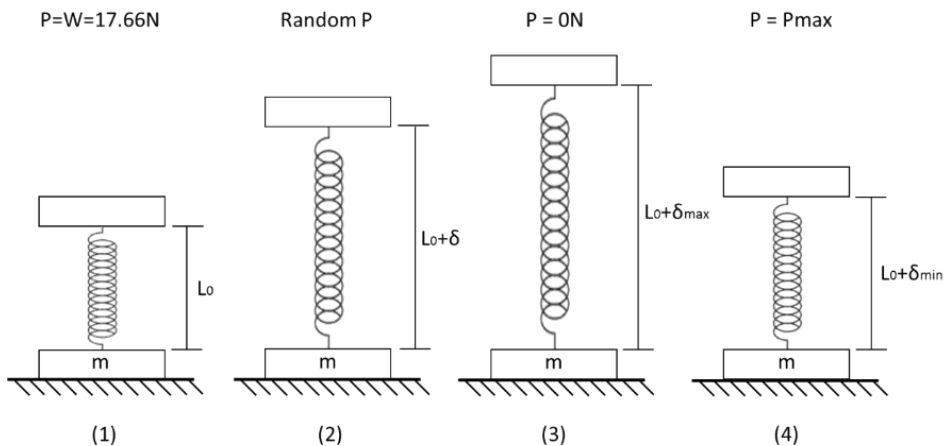
5. Εκτίμηση αρχικής τάσης ελατηρίου

Από τους εμπειρικούς τύπους (4-14), (4-15) γίνεται μία πρώτη εκτίμηση της προέντασης που θα έχουν τα ελατήρια.

4.2.3.1

6. Έλεγχος κρίσιμων μηκών του ελατηρίου

Λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό μήκος του ελατηρίου και την αρχική τάση όπως υπολογίστηκαν προηγουμένως μπορούν να υπολογιστούν οι κρίσιμες τιμές μήκους του ελατηρίου. Πιο συγκεκριμένα ενδιαφέρον έχουν το μέγιστο μήκος του ελατηρίου (Σχήμα 4-6 (3)) (δηλαδή όταν το ελατήριο συγκρατεί όλη τη μάζα του κινητού μέλους) καθώς και το μήκος του όταν το φορτίο στην υπό κατεργασία επιφάνεια είναι στην μέγιστη επιθυμητή τιμή του (Σχήμα 4-6 (4)).



Σχήμα 4-10: Κρίσιμες θέσεις του ελατηρίου.

7. Στατικός έλεγχος αντοχής

Ο έλεγχος αντοχής σε στατική λειτουργία γίνεται θεωρώντας ότι το ελατήριο λειτουργεί με τη δυσμενέστερη δυνατή φόρτιση ($\delta = \delta_{\max}$) και ελέγχονται 2 μέρη του:

- Το σώμα του ελατηρίου

Υπολογίζεται η μέγιστη διατμητική τάσης στο σώμα του ελατηρίου και ελέγχεται ο συντελεστής ασφαλείας (4-19).

- Οι γάντζοι

Υπολογίζεται η μέγιστη ορθή τάση λόγω κάμψης στο σημείο A του γάντζου (σχέση 4-10) καθώς και η μέγιστη διατμητική τάση του γάντζου στο σημείο B (σχέση 4-11) και ελέγχονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας (σχέσεις 4-20, 4-21).

8. Δυναμικός έλεγχος αντοχής

Ο έλεγχος αντοχής σε δυναμική λειτουργία γίνεται θεωρώντας ότι το ελατήριο λειτουργεί μεταξύ των δύο ακραίων επιθυμητών φορτίων, όπως αυτά μεταφράζονται σε καταπόνηση στο ελατήριο, με σκοπό την επίτευξη λειτουργίας σε θεωρητικά άπειρους κύκλους. Ακολουθείται η υπολογιστική πορεία που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο του δυναμικού υπολογισμού και ελέγχονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας όπως στον στατικό υπολογισμό με χρήση του κριτηρίου Soderberg (σχέσεις 4-23, 4-24)

Σε αυτό το σημείο ο σχεδιασμός θεωρείται ολοκληρωμένος και ακολουθεί η κατασκευή και οι διακριβωτικές μετρήσεις πάνω στα ελατήρια όπως περιγράφονται σε επόμενο κεφάλαιο. Οι υπολογισμοί έγιναν με χρήση φύλλου στο Excel.

4.2.4 Κατασκευή ελατηρίων - μετρήσεις

Από τους υπολογισμούς προέκυψαν μια σειρά από διαφορετικά σετ ελατηρίων που μπορούν να πληρούν σχεδιαστικά τις προδιαγραφές που τέθηκαν.

Αρχικά κατασκευάστηκε σετ ελατηρίων με τα εξής χαρακτηριστικά:

$D=12\text{mm}$ $d=1\text{mm}$ $N_a=144$ σπείρες $L_o=168\text{mm}$ $K=0.045$ N/mm

Παρότι οι περισσότερες ιδιότητες των ελατηρίων αυτών (σταθερά, μήκος κα) μετρήθηκαν όπως προέβλεπαν οι υπολογισμοί, τα συγκεκριμένα ελατήρια εμφάνισαν πολύ αυξημένη αρχική τάση (προένταση) καθιστώντας τα μη-χρησιμοποιήσιμα. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος και τη μείωση των παραμενουσών τάσεων στα ελατήρια, αποφασίστηκε, μετά από συμβουλή και του τεχνίτη-κατασκευαστή, να υποβληθούν σε επιπλέον θερμική κατεργασία (ανόπτηση). Αν και η κατεργασία είχε το επιθυμητό αποτέλεσμα και η προένταση των ελατηρίων μειώθηκε, είχε επίσης μη θεμιτά αποτέλεσμα σε άλλες ιδιότητες των ελατηρίων τα οποία έπαψαν να εμφανίζουν σταθερή συμπεριφορά.

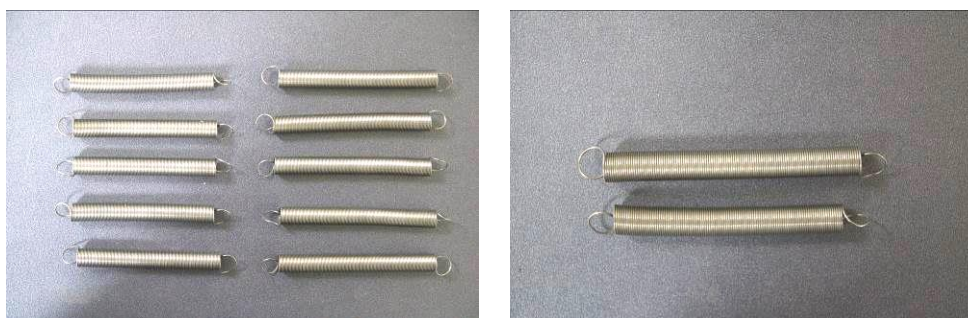
Με την εμπειρία από την πρώτη κατασκευαστική προσπάθεια και την καλύτερη συνεννόηση με τον τεχνίτη έγινε κατασκευή δύο ακόμα σετ ελατηρίων με τα εξής χαρακτηριστικά:

Σετ 1:

$D=10\text{mm}$ $d=0.8\text{mm}$ $N_a=116$ σπείρες $L_o=115\text{mm}$ $K=0.033\text{ N/mm}$

Σετ 2:

$D=10\text{mm}$ $d=0.8\text{mm}$ $N_a=105$ σπείρες $L_o=105\text{mm}$ $K=0.035\text{ N/mm}$

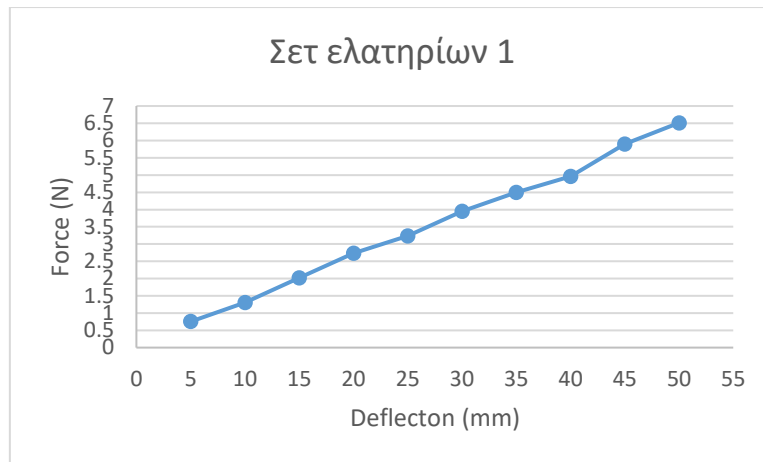


Σχήμα 4-11: Κατασκευασμένα ελατήρια.

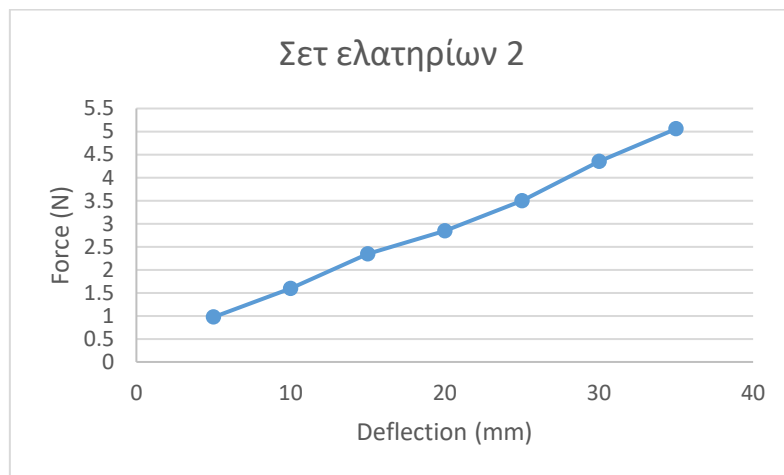
Τα νέα ελατήρια εμφάνισαν όλα τα προβλεπόμενα χαρακτηριστικά, με σωστές σταθερές και αρχική τάση μέσα στα επιτρεπτά όρια.

Στη συνέχεια έγιναν μετρήσεις με τα ελατήρια προσαρτημένα στη συσκευή, κάνοντας χρήση ζυγαριάς ακριβείας, όπου μετρήθηκε το παραγόμενο φορτίο κατά την μετατόπιση της συσκευής στον κατακόρυφο άξονα (άξονας Z). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:

Σημειώνεται ότι για επίτευξη μεγαλύτερων τιμών φορτίου τα ελατήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε ζεύγη, αντί για τετράδες, τοποθετημένα συμμετρικά μεταξύ τους (διαγώνια).



Σχήμα 4-12: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης για το πρώτο σετ ελατηρίων.



Σχήμα 4-13: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης για το δεύτερο σετ ελατηρίων.

4.3 Λοιπές τροποποιήσεις στη συσκευή

Κατά τη διάρκεια των αυτόματων δοκιμών που εκτελέστηκαν, παρατηρήθηκε δυσκολία στην κίνηση μεταξύ των δύο μελών της συσκευής. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε πέδηση και κολλήματα σε συγκεκριμένα σημεία της διαδρομής του κινητού μέλους, γεγονός που προδίδει αυξημένη τριβή που μπορεί να οφείλεται σε μη-επαρκής ή λάθος λίπανση των αξόνων και των ρουλεμάν ή ακόμα και σε εσωτερική βλάβη των γραμμικών ρουλεμάν. Το φαινόμενο αυτό προκαλούσε σημαντικά προβλήματα στην σταθερή επιβολή του φορτίου από τη συσκευή και έπρεπε να αντιμετωπιστεί.

Για την αντιμετώπιση του αρχικά έγινε καθαρισμός και λίπανση του συστήματος με κατάλληλο λιπαντικό λάδι τεφλόν. Όταν τα συμπτώματα επέμειναν, αποφασιστική η αντικατάσταση των ρουλεμάν καθώς και η αφαίρεση των δυο εκ των τεσσάρων ρουλεμάν (ενός από κάθε πλευρά, Σχήμα 4-14) για μείωση της τριβής, καθώς κρίθηκε

ότι η πράξη αυτή δεν θα επηρέαζε την σταθερότητα της συσκευής. Με τις παραπάνω αποφάσεις διασφαλίστηκε η ομαλή κίνηση μεταξύ των δύο μελών της συσκευής και κατά συνέπεια η ομαλή εφαρμογή του φορτίου από τη συσκευή στην υπό στίλβωση επιφάνεια.



Σχήμα 4-15: Όψη συσκευής με απουσία κάτω ρουλεμάν.

4.4 Περιγραφή και τροποποιήσεις στην πειραματική διάταξη

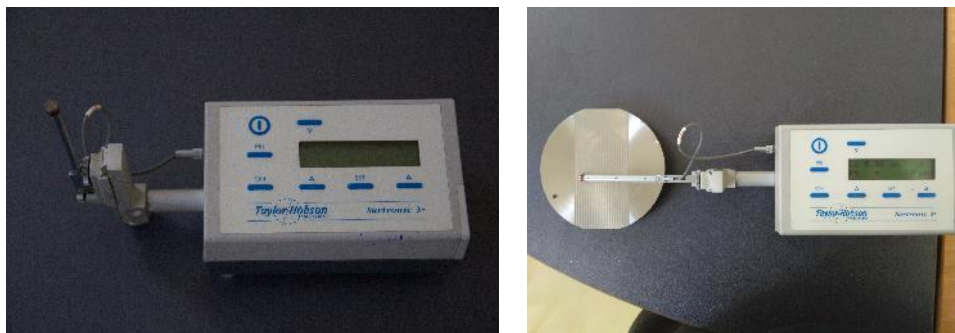
Στα προηγούμενα υποκεφάλαια έγινε αναφορά στις τροποποιήσεις που έγιναν στην συσκευή, όμως παρατηρήθηκε ανάγκη τροποποιήσεων και στο σύνολο της πειραματικής διάταξης. Πριν γίνει αναφορά στις τροποποιήσεις που έλαβαν χώρα, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια συνοπτική περιγραφή της διάταξης αυτής.

Η ιδιοσυσκευή, όπως περιγράφηκε εκτενέστερα προηγουμένως, προσαρτάται σε κέντρο κατεργασιών σαν εργαλείο. Για τις ανάγκες των πειραμάτων και των εφαρμογών χρησιμοποιήθηκε κυρίως το κέντρο κατεργασιών τριών αξόνων Haas TM-1 του Εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών (Σχήμα 4-16).

Πάνω στην συσκευή προσδένεται το τελικό επεκτατικής ντίζας για το περιστροφικό εργαλείο Einhell Bavaria BSG-135 (Παράρτημα) το οποίο με τη σειρά του στηρίζεται από σταθερό τμήμα της εργαλειομηχανής. Τα υπό κατεργασία δοκίμια δένονται σε μέγγενη τοποθετημένη επί της τράπεζας του κέντρου κατεργασιών και για τη μέτρηση της τραχύτητας τους χρησιμοποιείται το φορητό τραχύμετρο Surftronic 3+ (Σχήμα 4-17). Η προετοιμασία των δοκιμίων έγινε στην ίδια εργαλειομηχανή με χρήση των κατάλληλων εργαλείων (φρεζοκεφαλή, σφαιρικό κονδύλι, probe κα.)



Σχήμα 4-18: Άποψη του κέντρου κατεργασιών Haas TM-1 με το σύστημα στίλβωσης.



Σχήμα 4-19: Τραχύμετρο Surftronic 3+.

Σημειώνεται ότι κάποιες αυτόματες δοκιμές έγιναν και στο κέντρο κατεργασιών OKUMA MX-45VAE (Σχήμα 4-20), όμως η εργαλειομηχανή της Haas κρίθηκε καταλληλότερη για την εκτέλεση των πειραμάτων κυρίως λόγω της ευκολίας στη χρήση της και της αδυναμίας της πρώτης να λειτουργήσει με ανοικτή την πόρτα. Εάν η κατεργασία που εκτελέστηκε ήταν πιο σύνθετη και απαιτούσε μεγάλο αριθμό εργαλείων και διεργασιών η φρέζα της OKUMA θα υπερτερούσε καθώς έχει μύλο εργαλείων γεγονός που θα διευκόλυνε την εργασία κατά κόρον.



Σχήμα 4-21: Άποψη του κέντρου κατεργασιών OKUMA MX-45VAE με το σύστημα στίλβωσης.

Κατά τις αυτόματες δοκιμές, παρατηρήθηκε αστάθεια στο εργαλείο στίλβωσης που προκαλείτο από τον μηχανισμό σύνδεσης του συνδέσμου τύπου 'mandrel' με την επεκτατική ντίζα του περιστροφικού εργαλείου. Κρίθηκε, συνεπώς, σκόπιμο να αντικατασταθεί η επεκτατική ντίζα με διαφορετική που φέρει αλλού τύπου μηχανισμού πρόσδεσης. Η αντικατάσταση της ντίζας οδήγησε σε σημαντική βελτίωση του αποτελέσματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-22.



Σχήμα 4-23: Διαφορά στον μηχανισμό συγκράτησης για τις διαφορετικές επεκτατικές ντίζες.



(a)



(b)

Σχήμα 4-24: Παράδειγμα αποτελέσματος στίλβωσης δοκιμίου (a) προ της αντικατάστασης και (b) μετά την αντικατάσταση της επεκτατικής ντίζας.

Σε αυτό το σημείο, μετά από τις προαναφερθείσες τροποποιήσεις, η διάταξη είναι ικανή να εκτελέσει τη στιλβωτική κατεργασία με καλό έλεγχο της δύναμης, ομαλή εφαρμογή του φορτίου και χωρίς αστάθεια στο τελικό εργαλείο. Για την εκτέλεση των πειραμάτων όμως είναι αναγκαίο να υπάρχει ένας τρόπος ακριβούς μέτρησης ή πρόβλεψης της ταχύτητας περιστροφής του περιστροφικού εργαλείου.

Το περιστροφικό εργαλείο της Eihhell που χρησιμοποιείται έχει εύρος στροφών από 8000 έως 30000 rpm. Η ταχύτητα ελέγχεται από τον χρήστη μέσω περιστροφικού διακόπτη με έξι συνολικά επίπεδα. Όμως δεν είναι δυνατόν να γίνει απευθείας αντιστοίχιση των αναγραφόμενων επιπέδων ταχύτητας του περιστροφικού εργαλείου με την περιστροφική ταχύτητα του στιλβωτικού εργαλείου, αφενός διότι η αύξηση της ταχύτητας με τα επίπεδα δεν γίνεται αναλογικά, και, αφετέρου, λόγω της μικρής ισχύος του περιστροφικού μηχανήματος, ο συνδυασμός χρήσης επεκτατικής ντίζας και η άσκηση δύναμης στο εργαλείο προκαλεί σημαντική και απρόβλεπτη πείδηση.

Για αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος αποφασίστηκε η χρήση οπτικού, laser ταχυμέτρου. Πιο συγκεκριμένα έγινε χρήση του laser ταχυμέτρου TMRT-1 της SKF (Παράρτημα) το οποίο παραχωρήθηκε για χρήση από το εργαστήριο Δυναμικής και Κατασκευών του ΕΜΠ.

Η χρήση του γίνεται ως εξής:

Κολλάται μικρό κομμάτι ανακλαστικής αυτοκόλλητης ταινίας πάνω στο περιστρεφόμενο σώμα του οποίου η περιστροφική ταχύτητα ενδιαφέρει (στην συγκεκριμένη περίπτωση ο στιλβωτικός δακτύλιος) και κατά την κίνηση του στοχεύεται με τη δέσμη laser του ταχυμέτρου. Το όργανο από τον αριθμό των ανακλάσεων σε μονάδα του χρόνου υπολογίζει και προβάλλει την περιστροφική του ταχύτητα σε στροφές ανά λεπτό (RPM).



(a)



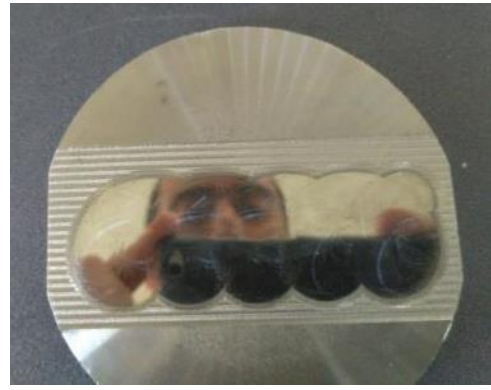
(b)

Σχήμα 4-25: (a) Το οπτικό ταχύμετρο SKF TMRT, (b) η ανακλαστική ταινία όπως προσκολλάται στον διαμαντένιο δακτύλιο.

Για την ολοκλήρωση των τροποποιήσεων, έγινε δοκιμαστική εφαρμογή σε δοκίμιο από χάλυβα ck45 αρχικής τραχύτητας 80 μ m για τον έλεγχο των αλλαγών που έγιναν και για την επιβεβαίωση της λειτουργικότητας του συστήματος. Με την ολοκλήρωση της σπινθωτικής κατεργασίας προέκυψε καλής ποιότητας επιφάνεια με μετρούμενη τραχύτητα 0,9 μ m (Σχήμα 4-26b), πλησιάζοντας τα επίπεδα επιφανείας 'καθρέπτη', ενώ δεν έφερε σημαντικές οπτικές ατέλειες (χαρακιές, παραμόρφωση ειδώλου, ανομοιογένειες κτλ.).



(a)



(b)

Σχήμα 4-27: (a) Δοκίμιο κατά τη διαδικασία στίλβωσης, (b) Αποτέλεσμα επιβεβαιωτικής δοκιμής.

5 Σχεδιασμός πειραμάτων στίλβωσης

5.1 Εισαγωγή

Με την υλοποίηση των τροποποιήσεων όπως περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ιδιοσυσκευή αλλά και η πειραματική διάταξη γενικότερα, είναι πλέον ικανή να εκτελέσει δοκιμές στίλβωσης με ικανοποιητικά αποτελέσματα και με πλήρη έλεγχο όλων των σημαντικών παραμέτρων που επηρεάζουν την διαδικασία (δύναμη, ταχύτητα περιστροφής κτλ). Σε επόμενο στάδιο πρέπει να σχεδιαστεί σειρά πειραματικών δοκιμών ώστε να προσδιοριστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο την διαδικασία της στίλβωσης καθώς και οι βέλτιστες τιμές τους. Η πειραματική διαδικασία θα σχεδιαστεί με στόχο να ακολουθείται σε κάθε περίπτωση αλλαγής πάνω στη στιλβωτική μέθοδο (πχ στίλβωση διαφορετικών υλικών, χρήση διαφορετικών εργαλείων κτλ). Για τον σχεδιασμό της πειραματικής διαδικασίας κρίνεται σκόπιμο να γίνει αρχικά μικρή αναφορά σε βασικούς ορισμούς και μεθόδους που αφορούν τον σχεδιασμό πειραμάτων (Design of Experiments, DoE) με εκτενέστερες αναφορές στις μεθόδους που θα επιλεγούν.

5.2 Θεωρία Σχεδιασμού Πειραμάτων (DoE)

Ως πείραμα ορίζεται η τεχνητή αναπαραγωγή ενός φαινομένου σε ένα εργαστήριο κάτω από συνθήκες που ευνοούν την παρατήρηση, προκειμένου να διερευνηθούν οι αιτιώδεις σχέσεις που υπάρχουν στο φαινόμενο και τελικά να εξαχθούν ορθά συμπεράσματα για το φαινόμενο αυτό.

Ο σχεδιασμός των πειραμάτων είναι μία διαδικασία συστηματικής συλλογής, οργάνωσης και επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων, με σκοπό τη βελτίωση διεργασιών με τον πιο αποδοτικό τρόπο. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων είναι μία σύνθετη διαδικασία και έτσι ο παραπάνω ορισμός δίνεται απλώς για να σχηματιστεί μία γενική εικόνα πριν τη λεπτομερέστερη ανάλυσή του.

Σε οποιοδήποτε πείραμα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν εξαρτώνται σε ένα πολύ μεγάλο βαθμό από τον τρόπο με τον οποίο συλλέχθηκαν τα δεδομένα. Αρκετές φορές, οι ακολουθούμενες μεθοδολογίες διεξαγωγής πειραμάτων δεν στηρίζονται σε επιστημονικά τεκμηριωμένες βάσεις, αλλά είναι αποτέλεσμα διαίσθησης ή σκέψεων που βασίζονται σε λάθος λογική. Τέτοια πειράματα δεν καταφέρνουν ούτε να παράγουν αξιόπιστα δεδομένα και συνεπώς και συμπεράσματα, ούτε να αξιοποιήσουν σωστά πολύτιμους πόρους, όπως το διαθέσιμο χρόνο, χρήμα, εξοπλισμό και ανθρώπινο δυναμικό.

Υπάρχουν τέσσερις γενικές μεθοδολογίες διεξαγωγής πειραμάτων:

5.2.1 Μέθοδος της καλύτερης πρόβλεψης (best guess approach)

Μία από τις πρώτες προσεγγίσεις ενός πειράματος είναι η προσέγγιση της 'καλύτερης υπόθεσης' (best guess approach). Η διαδικασία μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Επιλέγεται ένας συνδυασμός παραγόντων που πιστεύεται ότι επηρεάζουν το αποτέλεσμα και μπορούν να ελεγχθούν απολυτά από τον πειραματιστή. Διεξάγεται ένα αρχικό πείραμα με κάποιες αρχικές τιμές των παραγόντων αυτών, που μπορεί να βασίζονται στην εμπειρία του πειραματιστή ή να είναι τυχαίες, και κατόπιν εξάγονται τα αρχικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια μεταβάλλεται η τιμή ενός από τους παράγοντες υποθέτοντας ότι η μεταβολή αυτή θα επιδράσει θετικά στο μετρούμενο μέγεθος και το πείραμα επαναλαμβάνεται. Αν τα αποτελέσματα του πειράματος είναι καλύτερα από αυτά του αρχικού, η διαδικασία επαναλαμβάνεται με αλλαγή του ίδιου ή κάποιου άλλου παράγοντα. Σε αντίθετη περίπτωση ο παράγοντας μεταβάλλεται προς την αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με την αρχική τιμή του. Με αυτό τον τρόπο ο πειραματιστής μπορεί να συνεχίσει σχεδόν απεριόριστες φορές έως ότου κρίνει ότι τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά.

Το βασικό μειονέκτημα της απλής αυτής μεθόδου έχει να κάνει με το πόσο σωστή (δηλ. κοντά στο επιθυμητό βέλτιστο) είναι η αρχική υπόθεση. Επίσης, αν κάποια επόμενη υπόθεση δώσει όντως μία επιθυμητή τιμή – κοντά στο βέλτιστο – δεν είναι γνωστό αν αυτή τιμή είναι η τελικώς βέλτιστη και συνεπώς αν πρέπει να συνεχίσει ή σταματήσει τα πειράματά του ο πειραματιστής. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων του πειράματος καθώς και πολύ καλή γνώση του μηχανισμού λειτουργίας του φαινομένου από τον επιβλέποντα, έτσι ώστε να μπορεί να κάνει σωστές προβλέψεις για το ποιον παράγοντα θα μεταβάλει και πόσο αλλά και για το ποιοι παράγοντες θα συμπεριληφθούν στο πείραμα.

5.2.2 Μέθοδος της μεταβολής του κάθε παράγοντα ξεχωριστά (one factor at a time)

Ελαφρώς διαφορετική από την παραπάνω στρατηγική είναι η στρατηγική της αλλαγής ενός παράγοντα κάθε φορά. Είναι κοινά χρησιμοποιούμενη στρατηγική μεταξύ επιστημόνων και μηχανικών. Βασίζεται στην επιλογή μίας βάσης συνδυασμών παραγόντων (baseline) και στη συνέχεια στη μεταβολή ενός παράγοντα σε διαφορετικές τιμές διατηρώντας τους υπολοίπους στην τιμή βάσης τους.

Το βασικό μειονέκτημα της στρατηγικής αυτής είναι ότι δεν μελετάει αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων. Ως αλληλεπίδραση ορίζεται η αποτυχία

ενός παράγοντα να παράξει την ίδια επίπτωση (effect) στην απόκριση σε διαφορετικά επίπεδα ενός άλλου παράγοντα.

5.2.3 Μέθοδος της πλήρους παραγοντοποίησης (full factorial experiments)

Η μέθοδος της πλήρους παραγοντοποίησης απαιτεί την εκτέλεση όλων των δυνατών συνδυασμών σε ένα πείραμα. Δηλαδή, στη γενική περίπτωση που εξετάζονται m αριθμός παράγοντων, ο καθένας από τους οποίους παίρνει L διαφορετικές τιμές (έχει L επίπεδα), θα πρέπει να γίνουν συνολικά $N = L^m$ επαναλήψεις.

Είναι προφανές ότι η μέθοδος αυτή είναι η καλύτερη, από την άποψη του όγκου των δεδομένων και των πληροφοριών που συλλέγονται. Αφού εξετάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων λαμβάνονται υπόψη. Όμως και στην περίπτωση αυτή, υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα. Η διεξαγωγή ενός πειράματος, στο οποίο θα εξετάζονται αρκετοί παράγοντες σε αρκετά διαφορετικά επίπεδα, θα απαιτούσε ένα πάρα πολύ μεγάλο αριθμό επαναλήψεων, κάτι που θα ήταν και δαπανηρό αλλά και υπερβολικά χρονοβόρο, καθιστώντας έτσι τη χρήση της μεθόδου ανέφικτη. Επίσης, μπορεί να γίνει κατανοητό ότι σε αρκετές περιπτώσεις δεν είναι απαραίτητη η εξέταση όλων των δυνατών συνδυασμών. Γενικά, η μέθοδος χρησιμοποιείται μόνο στις περιπτώσεις που ερευνάται η επίδραση λίγων παραγόντων.

5.2.4 Μέθοδος της κλασματικής παραγοντοποίησης (fractional factorial experiments).

Η μέθοδος της κλασματικής παραγοντοποίησης είναι η πιο αποτελεσματική από όλες τις προηγούμενες. Ονομάζεται έτσι γιατί εξετάζεται μόνο ένα τμήμα/κλάσμα από όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, με αποτέλεσμα ο αναγκαίος αριθμός επαναλήψεων να είναι μικρός, χωρίς όμως να χάνονται σημαντικές πληροφορίες. Το τμήμα/κλάσμα των συνδυασμών επιλέγεται όχι τυχαία, αλλά με τη βοήθεια κανόνων και στατιστικών πινάκων που έχουν αναπτυχθεί ακριβώς για αυτό το σκοπό.

Το μοναδικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η δυσκολότερη εφαρμογή της σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά της είναι ότι επιτρέπει τη συγκέντρωση όλων των στατιστικά σημαντικών δεδομένων με πολύ λίγες επαναλήψεις.

Μια από τις δημοφιλέστερες μεθόδους κλασματικής παραγοντοποίησης είναι η λεγόμενη μέθοδος Taguchi που θα αναλυθεί εκτενέστερα στη συνέχεια.

5.3 Μέθοδος Taguchi

Μετά τον Β΄ Παγκόσμιο πόλεμο οι συμμαχικές δυνάμεις ανακάλυψαν πως η ποιότητα των Ιαπωνικού συστήματος τηλεπικοινωνιών ήταν πολύ φτωχή και μη επαρκής για πολύχρονη χρήση. Για την ανάπτυξη ένα σύγχρονου συστήματος τηλεπικοινωνιών, το αρχηγείο των συμμαχικών δυνάμεων πρότεινε στην Ιαπωνία την ίδρυση ερευνητικών εγκαταστάσεων στα πρότυπα των εργαστηρίων Bell των Ηνωμένων Πολιτειών. Η Ιαπωνία τότε ίδρυσε τα Electrical Communication Laboratories (ECL) και έθεσε τον Δρ. Genichi Taguchi υπεύθυνο για το τμήμα έρευνας και ανάπτυξης και για την βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων. Από τη θέση αυτή ο Δρ. Taguchi ξεκίνησε να αναπτύσσει νέες μεθόδους για τη βελτιστοποίηση των διεργασιών πειραματικών δοκιμών από τους μηχανικούς. Οι τεχνικές που ανέπτυξε είναι πλέον γνωστές ως 'Μέθοδοι Taguchi'. Η μεγαλύτερη συνεισφορά του όμως δεν είναι στην μαθηματική διατύπωση κανόνων για τον σχεδιασμό πειραμάτων αλλά η φιλοσοφία που τους συνοδεύει. Η προσέγγιση του είναι παραπάνω από μια μέθοδος για σχεδιασμό πειραμάτων, είναι ένας νέος, μοναδικός και αποδοτικός τρόπος σκέψης για την βελτίωση της ποιότητας που διαφέρει από τις παραδοσιακές πρακτικές και είναι ο λόγος που ο Taguchi θεωρείται από τους κύριους συντελεστές της επιτυχία της ιαπωνικής βιομηχανίας.

Η φιλοσοφία του Taguchi βασίζεται σε τρεις απλές αρχές:

1. Η ποιότητα πρέπει να σχεδιάζεται από πριν στο προϊόν και όχι να ελέγχεται με την κατασκευή του.
2. Η ποιότητα επιτυγχάνεται ελαχιστοποιώντας την απόκλιση από μια τιμή στόχο και το προϊόν πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να μην επηρεάζεται από μη-ελεγχόμενους εξωτερικούς παράγοντες.
3. Το κόστος της ποιότητας πρέπει να μετράται σαν συνάρτηση της απόκλισης από το στόχο και οι ζημίες πρέπει να υπολογίζονται σε όλο το σύστημα.

Η πρώτη αρχή βασίζεται στην παρατήρηση ότι ο ποιοτικός έλεγχος σε μορφή επιθεωρήσεων των παραγόμενων προϊόντων δεν μπορεί να βελτιώσει την κακή ποιότητα ενός προϊόντος, δεν μπορεί με άλλα λόγια να προσθέσει ποιότητα σε ένα προϊόν αλλά απλά θεραπεύει ένα σύμπτωμα της ασθένειας. Γι' αυτό το λόγο ο Taguchi δίνει μεγάλο βάρος στην εισαγωγή ποιότητας στο προϊόν από τα στάδια του σχεδιασμού του με την ανταλλαγή ιδεών (Brainstorming) να θεωρείται ως ένα από τα πιο σημαντικά στάδια στην διαδικασία βελτίωσης της ποιότητας του.

Η δεύτερη αρχή αναφέρεται σε ουσιαστικές μεθόδους βελτίωσης της ποιότητας. Ο Taguchi υποστήριξε ότι η ποιότητα πρέπει να συσχετίζεται με την απόκλιση μιας σχεδιαστικής παραμέτρου από την τιμή στόχο της παραμέτρου αυτής και όχι να απλοποιείται σαν ένα εύρος προδιαγεγραμμένων αποδεκτών τιμών. Η απόκλιση ενός προϊόντος από τον επιθυμητό στόχο οφείλεται σε δύο είδη παραγόντων, τους ελεγχόμενους και τους μη ελεγχόμενους. Ελεγχόμενοι παράγοντες είναι αυτοί των οποίων τις τιμές μπορεί να θέσει ή να ρυθμίσει εύκολα ο μηχανικός-πειραματιστής. Οι μη ελεγχόμενοι παράγοντες ή παράγοντες θορύβου (Noise factors) είναι πηγές διασποράς που συνδέονται συνήθως με το περιβάλλον της παραγωγής ή της λειτουργίας. Οι παράγοντες αυτοί διακρίνονται στους εξωτερικούς παράγοντες θορύβου, όπως η υγρασία, η σκόνη, η θερμοκρασία περιβάλλοντος κ.α. και στους εσωτερικούς παράγοντες θορύβου, όπως οι αποκλίσεις των μηχανημάτων από τις προδιαγραφές της παραγωγικής διαδικασίας.

Ο Taguchi ορίζει την ποιότητα ενός προϊόντος με αρνητικό τρόπο, δηλαδή ως την απώλεια που μεταβιβάζεται στην κοινωνία από τη στιγμή που της αποστέλλεται το προϊόν. Η απώλεια αυτή συμπεριλαμβάνει εν γένει και το κόστος, το οποίο προέρχεται από την απόρριψη των προϊόντων που δεν ικανοποιούν τις προδιαγραφές, από τα έξοδα του ποιοτικού ελέγχου, από τη συντήρηση ή αντικατάσταση επιστρεφόμενης παραγωγής που πωλήθηκε με εγγύηση και από το χάσιμο πελατών που προέρχεται από την κακή ποιότητα του προϊόντος. Το σημαντικότερο όμως, είναι ότι σύμφωνα με τον Taguchi, ένα προϊόν προξενεί απώλεια όχι μόνο όταν βρίσκεται εκτός προδιαγραφών, αλλά και όταν παρεκκλίνει του στόχου του. Κάθε πρόγραμμα ποιοτικής βελτίωσης θα πρέπει να έχει βασικό του στόχο την ελαχιστοποίηση της διασποράς της απόδοσης του προϊόντος σε σχέση με το στόχο του. Όσο μικρότερη είναι η διασπορά της απόδοσης, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση από το στόχο, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απώλειά του. Η απώλεια αυτή μετριέται από τη συνάρτηση απώλειας (Loss function) του Taguchi, η οποία ενοποιεί την απώλεια με τις προδιαγραφές λειτουργίας μέσω μιας τετραγωνικής σχέσης.

Για να επιτύχει ελάττωση της διασποράς και κατά συνέπεια βελτίωση της ποιότητας, ο Taguchi ανέπτυξε μια μέθοδο κλασματικού σχεδιασμού πειραμάτων στόχος της οποίας είναι να μειωθεί η διασπορά με την τροποποίηση των τιμών των ελεγχόμενων παραγόντων. Θέτοντας τους ελεγχόμενους παράγοντες στα βέλτιστα επίπεδά τους το προϊόν και η διεργασία θα γίνουν στιβαρά έναντι των παραγόντων θορύβου.

Η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιεί ειδικούς ορθογώνιους πίνακες (Orthogonal Arrays, OAs) με παράγοντες σε δύο ή τρεις στάθμες. Οι ορθογώνιοι πίνακες αυτοί

τυποποιήθηκαν από τον ίδιο τον Taguchi για διαφορετικές περιπτώσεις πειραμάτων, μέσω συνδυασμών λατινικών τετραγώνων (Latin squares). Ένας τυπικός ορθογώνιος πίνακας για πείραμα με παράγοντες δύο επιπέδων παρουσιάζεται παρακάτω (Πίνακας 5-1):

Πίνακας 5-1: Ορθογώνιος πίνακας L_8 .

Trial No.	Factors						
	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Κάθε γραμμή του παραπάνω πίνακα αντιστοιχεί σε μια πειραματική δοκιμή, ενώ τα νούμερα στο εσωτερικό του αντιστοιχούν στα διαφορετικά επίπεδα του εκάστοτε παράγοντα. Οι διαφορετικοί παράγοντες σημειώνονται με γράμματα (A-G) στο πάνω μέρος του πίνακα. Κάθε στήλη περιέχει τέσσερις συνθήκες επιπέδου 1 και τέσσερις επιπέδου 2. Δύο παράγοντες δύο επιπέδων μπορούν να συνδυαστούν με τέσσερις τρόπους (1,1), (1,2), (2,1) και (2,2). Ο πίνακας είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε οποιεσδήποτε δύο στήλες του πίνακα να σχηματίζουν μεταξύ τους τον ίδιο αριθμό από κάθε είδος συνδυασμού, είναι δηλαδή μεταξύ τους ορθογώνιες.

Η πειραματική διαδικασία που περιγράφεται από τον παραπάνω πίνακα περιγράφει έλεγχο επτά παραγόντων δύο επιπέδων σε οκτώ πειραματικές δοκιμές. Η εκτέλεση του αντίστοιχου πλήρους παραγοντικού πειράματος θα απαιτούσε 2^7 ή 128 δοκιμές χωρίς απαραίτητα να δώσει σημαντικά μεγαλύτερο όγκο πληροφοριών.

Ο πίνακας που παρουσιάστηκε παραπάνω συμβολίζεται ως L_8 . Υπάρχουν γενικά, τρεις τύποι ορθογώνιων πινάκων οι ονομασίες των οποίων αναφέρονται στον αριθμό των επιπέδων των παραγόντων που εξετάζονται. Έτσι, σχηματίζονται οι πίνακες δύο επιπέδων, οι πίνακες τριών επιπέδων και οι πίνακες μικτών επιπέδων. Οι τελευταίοι προκύπτουν με κατάλληλο μετασχηματισμό των πρώτων. Επίσης, κάθε πίνακας συμβολίζεται με το λατινικό γράμμα L, ακολουθούμενο από έναν αριθμό, ο οποίος καθορίζει το πλήθος των γραμμών του ορθογώνιου πίνακα και ισούται με τον

αριθμό των διαφορετικών επαναλήψεων που γίνονται κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.

Τα κριτήρια επιλογής του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα για ένα σχεδιασμένο πείραμα είναι τα εξής, καταταγμένα από το περισσότερο στο λιγότερο σημαντικό :

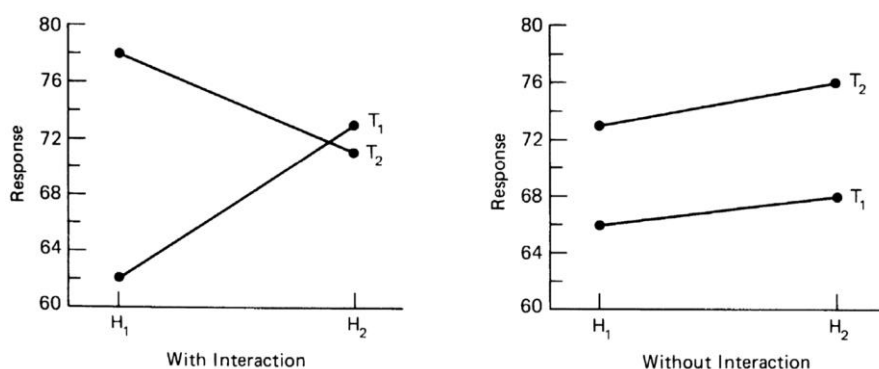
- Ο αριθμός των παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων που λαμβάνονται υπόψη.
- Ο αριθμός των επιπέδων για τους υπόψη παράγοντες.
- Η επιθυμητή ανάλυση του πειράματος ή η ύπαρξη περιορισμών χρόνου και κόστους.

Με βάση τα δύο πρώτα κριτήρια καθορίζεται ο μικρότερος ορθογώνιος πίνακας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, κάτι που σημαίνει ότι το πείραμα που θα προκύψει θα έχει τη μικρότερη ανάλυση αλλά και το χαμηλότερο κόστος (αφού θα γίνουν οι ελάχιστες επαναλήψεις). Ανάλογα με το τρίτο κριτήριο είναι δυνατό να επιλεγεί ένας μεγαλύτερος ορθογώνιος πίνακας έτσι ώστε να αυξηθεί η ανάλυση του πειράματος. Η ανάλυση ενός πειράματος είναι αυτό που υποδηλώνει την βεβαιότητα με την οποία μπορεί να εκτιμηθεί η επιρροή κάθε παράγοντα και αλληλεπίδρασης σε ένα πείραμα ξεχωριστά. Υπάρχουν τέσσερα επίπεδα ανάλυσης, με το πρώτο να είναι η ελάχιστη και το τέταρτο η μέγιστη που μπορεί να επιτευχθεί. Ο καθορισμός της ανάλυσης σε ένα πείραμα γίνεται ανάλογα με τον ορθογώνιο πίνακα που χρησιμοποιείται και με τις ακόλουθες συμβάσεις :

- Αν κάθε κύριος παράγοντας και κάθε αλληλεπίδραση βρίσκονται σε ξεχωριστές στήλες, τότε το πείραμα έχει ανάλυση 4 και ισοδυναμεί με ένα πλήρως παραγοντοποιημένο πείραμα.
- Αν ένας κύριος παράγοντας βρίσκεται στην ίδια στήλη με μία αλληλεπίδραση τέταρτης τάξης ή αν μία αλληλεπίδραση δεύτερης τάξης βρίσκεται στην ίδια στήλη με μία αλληλεπίδραση τρίτης τάξης, τότε το πείραμα έχει ανάλυση 3.
- Αν ένας κύριος παράγοντας βρίσκεται στην ίδια στήλη με μία αλληλεπίδραση τρίτης τάξης ή αν δύο αλληλεπιδράσεις δεύτερης τάξης βρίσκονται στην ίδια στήλη, τότε το πείραμα έχει ανάλυση 2.
- Τέλος, αν ένας κύριος παράγοντας βρίσκεται στην ίδια στήλη με μία αλληλεπίδραση δεύτερης τάξης, τότε το πείραμα έχει ανάλυση 1.

Ως αλληλεπίδραση ορίστηκε προηγουμένως, η αποτυχία ενός παράγοντα να παράγει την ίδια επίπτωση (Effect) στην απόκριση (Response) σε διαφορετικά επίπεδα ενός άλλου παράγοντα. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ παραγόντων είναι

καθοριστικής σημασίας για τα αποτελέσματα του πειράματος. Ένα παράδειγμα αλληλεπίδρασης εμφανίζεται παρακάτω (Σχήμα 5-1) όπου παρουσιάζεται σε δύο περιπτώσεις η επίδραση που έχουν οι παράγοντες δύο επιπέδων H και T στην απόκριση ενός πειράματος. Απεικονίζοντας την επίδραση των παραγόντων με αυτό τον τρόπο μπορεί κανείς εύκολα να διαπιστώσει εάν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Εάν οι ευθείες που προκύπτουν από την απεικόνιση είναι παράλληλες σημαίνει ότι οι παράγοντες δεν αλληλοεπιδρούν, ενώ στην περίπτωση που τέμνονται (ή δεν είναι παράλληλες) είναι σημάδι αλληλεπίδρασης.



Σχήμα 5-2: Παράδειγμα αλληλεπίδρασης μεταξύ παραγόντων. (27)

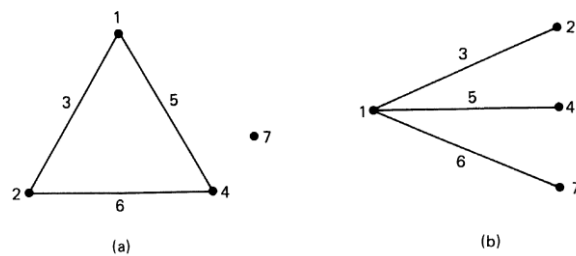
Σε ένα πείραμα στο οποίο εξετάζονται δύο παράγοντες, υπάρχουν τρία στοιχεία που μπορούν να εκτιμηθούν από στατιστική άποψη. Η επιρροή του παράγοντα A στο αποτέλεσμα, η επιρροή του παράγοντα B στο αποτέλεσμα και η επιρροή της αλληλεπίδρασης των παραγόντων A και B στο αποτέλεσμα. Αν πράγματι η αλληλεπίδραση υπάρχει, η επιρροή της θα είναι μεγάλη ενώ στην αντίθετη περίπτωση θα είναι αμελητέα. Είναι πολύ σημαντικό να συμπεριληφθούν όλες οι αλληλεπιδράσεις που είναι πιθανό να εμφανιστούν μεταξύ των παραγόντων γιατί η επιρροή τους θα υπάρχει στα αποτελέσματα, ασχέτως με το αν αυτές συμπεριλήφθηκαν στο σχεδιασμό του πειράματος.

Σημαντικό είναι σε αυτό το σημείο να γίνει αναφορά στο σωστό τρόπο τοποθέτησης των παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων σε κάθε ορθογώνιο πίνακα. Οι ορθογώνιοι πίνακες είναι στημένοι έτσι ώστε εάν ένας οποιοσδήποτε παράγοντας τοποθετηθεί σε μία συγκεκριμένη στήλη και ένας δεύτερος παράγοντας σε μία άλλη, τότε μία συγκεκριμένη τρίτη στήλη θα περιέχει αυτόματα την αλληλεπίδραση των παραγόντων αυτών. Η επιρροή του πρώτου παράγοντα θα υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη πρώτη στήλη, η επιρροή του δεύτερου παράγοντα χρησιμοποιώντας τη δεύτερη στήλη και η επιρροή της αλληλεπίδρασης χρησιμοποιώντας την τρίτη.

Το ποιες στήλες θα είναι στήλες αλληλεπίδρασης είναι γνωστό για όλους τους ορθογώνιους πίνακες. Για τη διευκόλυνση του προσδιορισμού τους, χρησιμοποιούνται δύο εργαλεία, οι τριγωνικοί πίνακες αλληλεπίδρασης και τα γραμμικά διαγράμματα. Κάθε ορθογώνιος πίνακας έχει έναν πίνακα αλληλεπίδρασης και μία ομάδα γραμμικών διαγραμμάτων αντιστοιχισμένα σε αυτόν. Ο πίνακας αλληλεπίδρασης περιλαμβάνει όλες τις δυνατές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στηλών του ορθογώνιου πίνακα. Τα γραμμικά διαγράμματα υποδεικνύουν διάφορες στήλες στις οποίες μπορούν να τοποθετηθούν παράγοντες και τις προκύπτουσες στήλες που θα περιέχουν τις αλληλεπιδράσεις αυτών, αποτελούν δηλαδή, μία οπτική απεικόνιση ενός τμήματος του πίνακα αλληλεπίδρασης. Για παράδειγμα παρουσιάζονται παρακάτω ο τριγωνικός πίνακας αλληλεπιδράσεων για όλους τους πίνακες με παράγοντες δύο επιπέδων και τα γραμμικά διαγράμματα του πίνακα L_8 που παρουσιάστηκε σαν παράδειγμα παραπάνω (Σχήμα 5-3). Στο γραμμικό διάγραμμα οι στήλες που τοποθετούνται οι παράγοντες σημειώνονται με τελείες, ενώ οι αριθμοί που εμφανίζονται στις γραμμές αναφέρονται στη στήλη που περιέχεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων των στηλών-τελειών που ενώνει.

Table A-6 Triangular Table for 2 Level Orthogonal Arrays

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
(1)	3	2	5	4	7	6	9	8	11	10	13	12	15	14	17	16	19	18	21	20	23	22	25	24	27	26	29	28	31	30			
(2)	1	6	7	4	5	10	11	8	9	14	15	12	13	18	19	16	17	22	23	20	21	26	27	24	25	30	31	28	29				
(3)	7	6	5	4	11	10	9	8	15	14	13	12	19	18	17	16	23	22	21	20	27	26	25	24	31	30	29	28					
(4)	1	2	3	12	13	14	15	8	9	10	11	20	21	22	23	16	17	18	19	28	29	30	31	24	25	26	27						
(5)	3	2	13	12	15	14	9	8	11	10	21	20	23	22	17	16	19	18	29	28	31	30	25	24	27	26							
(6)	1	14	15	12	13	10	11	8	9	22	23	20	21	18	19	16	17	30	31	28	29	26	27	24	25								
(7)	15	14	13	12	11	10	9	8	23	22	21	20	19	18	17	16	31	30	29	28	27	26	25	24									
(8)	1	2	3	4	5	6	7	24	25	26	27	28	29	30	31	16	17	18	19	20	21	22	23										
(9)	3	2	5	4	7	6	25	24	27	26	29	28	31	30	17	16	19	18	21	20	23	22											
(10)	1	8	7	4	5	26	27	24	25	30	31	28	29	18	19	16	17	22	23	20	21												
(11)	7	6	5	4	27	26	25	24	31	30	29	28	19	18	17	16	23	22	21	20													
(12)	1	2	3	28	29	30	31	24	25	26	27	20	21	22	23	16	17	18	19														
(13)	3	2	29	28	31	30	25	24	27	26	21	20	23	22	17	16	19	18															



Σχήμα 5-4: Τριγωνικός πίνακας αλληλεπίδρασης και γραμμικά διαγράμματα του πίνακα L_8 . (27)

Έτσι εάν κάποιος θέλει να βρει σε ποια στήλη περιέχεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των στηλών 1 και 4 στον πίνακα L_8 υπάρχουν δύο τρόποι:

1. Να ανατρέξει στον τριγωνικό πίνακα αλληλεπίδρασης και να ανιχνεύσει το στοιχείο της πρώτης γραμμής στην τέταρτη στήλη. Όπως φαίνεται από τον πίνακα παραπάνω είναι το νούμερο 5, δηλαδή η αλληλεπίδραση περιέχεται στην στήλη 5.
2. Να ελέγξει τον αριθμό της γραμμής που ενώνει τα σημεία 1 και 4 στο γραμμικό διάγραμμα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι πάλι το νούμερο 5.

Η ιδανική περίπτωση κατά την τοποθέτηση των παραγόντων στον ορθογώνιο πίνακα και τον εντοπισμό των αλληλεπιδράσεων θα ήταν κάθε στήλη να περιέχει μόνο ένα παράγοντα ή μία αλληλεπίδραση. Όμως, αυτό δεν είναι πάντα δυνατό να γίνει λόγω περιορισμών χρόνου και κόστους όπως αναφέρεται και στο τρίτο κριτήριο επιλογής του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα. Σαν αποτέλεσμα, πολλές φορές σε μία στήλη γίνεται ανάμειξη αλληλεπίδρασης με κύριους παράγοντες κάτι που σημαίνει ότι δεν είναι πλέον δυνατή η εκτίμηση της επιρροής του καθένα από αυτούς. Το γεγονός αυτό, αποτελεί ένα συμβιβασμό ανάμεσα στην υψηλή ανάλυση του πειράματος και στο μειωμένο αριθμό επαναλήψεων.

Ο σχεδιασμός των πειραμάτων αποτελείται από τρεις φάσεις, τη φάση του σχεδιασμού, τη φάση της διεξαγωγής και τη φάση της ανάλυσης. Από αυτές, η πιο σημαντική είναι η φάση του σχεδιασμού, γιατί από αυτή εξαρτάται το αν το πείραμα θα δώσει ή όχι τα επιθυμητά αποτελέσματα. Στη φάση του σχεδιασμού επιλέγονται οι παράγοντες που θα εξεταστούν, καθώς και τα επίπεδα αυτών. Στη φάση διεξαγωγής, τα πειράματα εκτελούνται και τα δεδομένα συλλέγονται, ενώ η φάση της ανάλυσης ασχολείται με τη στατιστική επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων. Αν το πείραμα σχεδιαστεί καλά κατά την πρώτη φάση, ο απαιτούμενος όγκος εργασίας για τις επόμενες δύο είναι σημαντικά μειωμένος.

Αναλυτικά, τα βήματα που πρέπει να εκτελεστούν κατά τη σχεδίαση ενός πειράματος είναι :

1. Σαφής καθορισμός και διατύπωση του προβλήματος ή του πεδίου ενδιαφέροντος.
2. Σαφής καθορισμός και διατύπωση του σκοπού του πειράματος.
3. Επιλογή των μετρούμενων μεγεθών και των μετρητικών διατάξεων.
4. Επιλογή των παραγόντων που πιστεύεται ότι επηρεάζουν το μετρούμενο μέγεθος.
5. Επιλογή των επιπέδων των παραγόντων.
6. Επιλογή του κατάλληλου ή των κατάλληλων ορθογώνιων πινάκων.

7. Επιλογή των αλληλεπιδράσεων που πιστεύεται ότι μπορεί να υπάρχουν μεταξύ των παραγόντων.
8. Τοποθέτηση των παραγόντων στον ορθογώνιο πίνακα και εντοπισμός των αλληλεπιδράσεων.
9. Διεξαγωγή του πειράματος με βάση τους συνδυασμούς που προκύπτουν από τον ορθογώνιο πίνακα.
10. Ανάλυση και ερμηνεία των πειραματικών δεδομένων.
11. Διεξαγωγή πειράματος επιβεβαίωσης.

Η μέθοδος πειραματικού σχεδιασμού που περιγράφηκε βρίσκει σήμερα πληθώρα εφαρμογών σε διάφορους τομείς από την βελτίωση του σχεδιασμού προϊόντων στην βελτιστοποίηση κατασκευαστικών - και όχι μόνο - διεργασιών. Φέρει πολλά πλεονεκτήματα με το κυριότερο να είναι ότι επιτρέπει στον ερευνητή να πάρει το μεγαλύτερο κομμάτι της πληροφορίας με μικρό αριθμό δοκιμών, γλιτώνοντας χρόνο και μειώνοντας το κόστος μιας πειραματικής διαδικασίας καθώς και το γεγονός ότι η τυποποίηση των πινάκων οδηγεί όσους ερευνητές ακολουθήσουν τη μέθοδο να σχεδιάζουν και να εκτελούν όμοια πειράματα, παράγοντας έτσι συγκρίσιμα αποτελέσματα.

5.4 Ανάλυση των αποτελεσμάτων

Στη μέθοδο Taguchi τα αποτελέσματα των πειραμάτων αναλύονται για να επιτευχθούν ένας ή περισσότεροι από τους παρακάτω σκοπούς:

1. Να βρεθεί η βέλτιστη κατάσταση ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας (δηλαδή οι τιμές (επίπεδα) των παραγόντων που οδηγούν στην βέλτιστη απόκριση).
2. Να εκτιμηθεί η συνεισφορά του κάθε παράγοντα στο αποτέλεσμα.
3. Να προβλεφθεί η απόκριση του συστήματος κάτω από τις βέλτιστες συνθήκες.

Ως απόκριση ορίζεται η προκύπτουσα τιμή του μετρούμενου μεγέθους με τη λήξη του πειράματος. Το μετρούμενο μέγεθος ή τα μετρούμενα μεγέθη (συχνά αναφερόμενα και ως ποιοτικά χαρακτηριστικά, quality characteristics) έχουν καθοριστεί κατά το σχεδιασμό του πειράματος και εκφράζουν πόσο καλά ένα προϊόν ή μια διεργασία ανταποκρίνεται στους σχεδιαστικούς της στόχους. Ανάλογα με τη φύση του κάθε ποιοτικού χαρακτηριστικού ο πειραματιστής μπορεί να επιθυμεί την μεγιστοποίηση

του, την ελαχιστοποίηση του ή όσο γίνεται την μικρότερη απόκλιση του από μια συγκεκριμένη τιμή.

Η βέλτιστη κατάσταση ανιχνεύεται μελετώντας την κύρια επίδραση (Main effect) του κάθε παράγοντα, η οποία ισούται με τη διαφορά της μέσης απόδοσης των επιπέδων του. Ως μέση απόδοση του επιπέδου ενός παράγοντα ορίζεται ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων για το μετρήσιμο μέγεθος στις δοκιμές που ο συγκεκριμένος παράγοντας εμφανίστηκε στο συγκεκριμένο επίπεδο.

Για παράδειγμα εάν σε ένα πείραμα τριών παραγόντων (A,B,C) δύο επιπέδων (1,2) τα αποτελέσματα για το μετρήσιμο μέγεθος στις τέσσερις δοκιμές που προβλέπονται, προέκυψαν ίσα με Y_1 , Y_2 , Y_3 και Y_4 όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα,

Πίνακας 5-2: Παράδειγμα πειράματος.

#Δοκιμή	A	B	C	Αποτέλεσμα (Y)
1	1	1	1	Y1
2	1	2	2	Y2
3	2	1	2	Y3
4	2	2	1	Y4

η μέση απόδοση του παράγοντα A στο επίπεδο 1 ισούται με:

$$\bar{A}_1 = \frac{Y_1 + Y_2}{2}$$

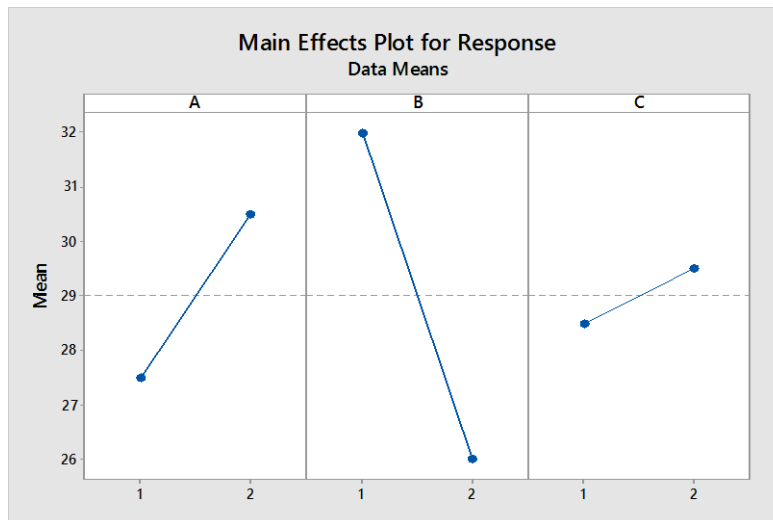
Αντίστοιχα για τον ίδιο παράγοντα στο επίπεδο 2:

$$\bar{A}_2 = \frac{Y_3 + Y_4}{2}$$

Και η μέση επίδραση του παράγοντα A ισούται με:

$$\bar{A} = \bar{A}_1 - \bar{A}_2$$

Συνήθως οι μέσες αποδόσεις απεικονίζονται σε διαγράμματα όπως το παρακάτω (Σχήμα 5-5) για τη διευκόλυνση της εξαγωγής συμπερασμάτων. Στο παραπάνω παράδειγμα και με την προϋπόθεση ότι ζητείται η ελαχιστοποίηση του μετρούμενου μεγέθους, η βέλτιστη κατάσταση φαίνεται να προκύπτει όταν ο παράγοντας A είναι στο επίπεδο 1, ο παράγοντας B στο επίπεδο 2 και ο παράγοντας C στο επίπεδο 1. Σημειώνεται ότι η βέλτιστη κατάσταση δεν ταυτίζεται απαραίτητα με μια από τις δοκιμές που έχουν γίνει, καθώς ο ορθογώνιος πίνακας δείχνει μόνο ένα κλάσμα των πιθανών συνδυασμών των παραγόντων.



Σχήμα 5-6: Παράδειγμα διαγράμματος μέσων αποδόσεων.

Για να καθοριστεί η επί τοις εκατό συνεισφορά του κάθε παράγοντα στο αποτέλεσμα συνήθως χρησιμοποιείται η στατιστική μέθοδος ανάλυσης της διακύμανσης (analysis of variance, ANOVA). Τα βήματα της μεθόδου περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

Αρχικά γίνεται υπολογισμός των βαθμών ελευθερίας του πειράματος, των παραγόντων και του σφάλματος. Ο βαθμός ελευθερίας του πειράματος (f_T) ισούται με τον αριθμό των δοκιμών μείον ένα. Αντίστοιχα ο βαθμός ελευθερίας του κάθε παράγοντα (f_{factor}) ισούται με τον αριθμό των επιπέδων του μείον ένα. Τέλος βαθμός ελευθερίας του σφάλματος (f_e) ισούται με τον βαθμό ελευθερίας του πειράματος μείον το άθροισμα των βαθμών ελευθερίας των παραγόντων:

$$f_T = \text{αριθμος δοκιμων} - 1$$

$$f_{factor} = \text{αριθμος επιπέδων} - 1$$

$$f_e = f_T - \sum f_{factor}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το άθροισμα των αποτελεσμάτων του πειράματος (T) καθώς και τα αθροίσματα των αποτελεσμάτων για κάθε επίπεδο των παραγόντων ξεχωριστά (πχ αν ο παράγοντας A εμφανίζεται στο επίπεδο 1 στις δοκιμές 1 και 4, το άθροισμα του επιπέδου A1 ισούται με $Y_1 + Y_4$).

Έπειτα υπολογίζεται ο διορθωτικός συντελεστής (correction factor, C.F.) μέσω της σχέσης:

$$C.F. = \frac{T^2}{N}$$

Όπου N το πλήθος των δοκιμών.

και η ολική διασπορά (S_T) αφαιρώντας το διορθωτικό συντελεστή από το άθροισμα των τετραγώνων των αποτελεσμάτων του πειράματος

$$S_T = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - C.F.$$

Κατόπιν, υπολογίζονται τα αθροίσματα τετραγώνων για τους παράγοντες ως εξής (παράδειγμα για παράγοντα A με n επίπεδα):

$$S_A = \frac{A_1^2}{NA_1} + \frac{A_2^2}{NA_2} + \dots + \frac{A_n^2}{NA_n}$$

Όπου NA_1, NA_2, \dots το πλήθος των πειραμάτων που εμφανίζεται ο εκάστοτε παράγοντας.

Και για το σφάλμα:

$$S_e = S_T - (S_A + S_B + \dots + S_n)$$

Σε επόμενο στάδιο υπολογίζεται η διασπορά (variance) του κάθε παράγοντα διαιρώντας το άθροισμα τετραγώνων του με τον βαθμό ελευθερίας του:

$$V_A = \frac{S_A}{f_A}$$

Και για το σφάλμα:

$$V_e = \frac{S_e}{f_e}$$

Σε αυτό το σημείο μπορεί να υπολογιστεί η επί τοις εκατό συνεισφορά του κάθε παράγοντα σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_A = \frac{100S_A}{S_T}$$

Και για το σφάλμα:

$$P_e = \frac{100S_e}{S_T}$$

Καθώς και ο λόγος διασποράς (variance ratio, F statistic) για κάθε παράγοντα ως εξής:

$$F_A = \frac{V_A}{V_e}$$

Για το σφάλμα πάντα $F_e=1$.

Τα αποτελέσματα της ANOVA παρουσιάζονται συνήθως σε συνοπτικό πίνακα όπως παρακάτω(Πίνακας 5-3).

Πίνακας 5-4: Παράδειγμα πίνακα ANOVA.

Παράγοντες	f	S	V	F	P
A					
B					
...					
Σφάλμα					
Σύνολο					

Μετά την εύρεση της βέλτιστης κατάστασης συνηθίζεται να εκτελείται ένα επιβεβαιωτικό πείραμα, είναι όμως δυνατό να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της απόκρισης κατά τη βέλτιστη κατάσταση κάνοντας χρήση των δεδομένων του πειράματος. Για τον σκοπό αυτό υπολογίζεται αρχικά η μέση απόδοση του πειράματος, δηλαδή το πηλίκο του αθροίσματος όλων των αποτελεσμάτων προς το πλήθος των δοκιμών. Έπειτα υπολογίζεται η συνεισφορά του κάθε παράγοντα στην τελική απόκριση αφαιρώντας από τη μέση απόδοση του βέλτιστου επιπέδου του τη μέση απόδοση του πειράματος. Αθροίζοντας όλα τα παραπάνω προκύπτει η εκτιμώμενη απόκριση του βέλτιστου συνδυασμού των παραγόντων. Επιστρέφοντας σε προηγούμενο παράδειγμα (Πίνακας 5-2) όπου η βέλτιστη κατάσταση προκύπτει όταν ο παράγοντας A είναι στο επίπεδο 1, ο παράγοντας B στο επίπεδο 2 και ο παράγοντας C στο επίπεδο 1 η παραπάνω έκφραση μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$Y_{opt} = \frac{T}{N} + \left(\overline{A_1} - \frac{T}{N}\right) + \left(\overline{B_2} - \frac{T}{N}\right) + \left(\overline{C_1} - \frac{T}{N}\right)$$

Όπου Y_{opt} η εκτιμώμενη απόκριση

T το άθροισμα των αποτελεσμάτων

N το πλήθος των δοκιμών

$\overline{A_1}, \overline{B_2}, \overline{C_1}$ οι μέσες αποδόσεις των παραγόντων στα βέλτιστα επίπεδα τους.

Ο Taguchi προτείνει δυο διαφορετικές προσεγγίσεις για την εκτέλεση της ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Η τυπική διαδικασία περιλαμβάνει εκτίμηση των κυρίων επιδράσεων των παραγόντων και ANOVA. Η δεύτερη προσέγγιση, που συστήνεται για πειράματα με πολλές δοκιμές, περιλαμβάνει ανάλυση S/N (signal to noise, σήματος προς θόρυβο) και για τα δύο βήματα της ανάλυσης, μέθοδος που δεν θα αναλυθεί στην παρούσα εργασία καθώς δεν θα χρησιμοποιηθεί.

5.5 Τελικός σχεδιασμός των πειραμάτων

Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά τα βήματα σχεδιασμού των πειραμάτων που αφορούν στην παρούσα εργασία βάσει της θεωρίας που αναλύθηκε εκτενώς παραπάνω.

1. Σαφής καθορισμός και διατύπωση του προβλήματος ή του πεδίου ενδιαφέροντος.

Το πρόβλημα αναφέρεται στην βελτιστοποίηση συστήματος αυτόματης στίλβωσης μεταλλικών επιφανειών καλουπιών ικανού να προσαρτηθεί σε κέντρο κατεργασιών και εκμεταλλεόμενου το σύστημα στίλβωσης Ring-finish της NOVAPAX.

Για την καλύτερη οργάνωση των πειραμάτων και για την παραγωγή χρήσιμων και ουσιαστικών αποτελεσμάτων κρίνεται σκόπιμο να αποδομηθεί αρχικά η διαδικασία στίλβωσης που ακολουθείται κατά τη χρήση του συστήματος Ring-finish, όπως αυτή περιγράφεται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 2.2.2.

Η διαδικασία αυτή μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια:

- Το στάδιο της λείανσης (Grinding)
- Το στάδιο της στίλβωσης με μπρούτζινο εργαλείο (Lapping)
- Το στάδιο της στίλβωσης με πλαστικό εργαλείο (Fine lapping)

Ο διαχωρισμός αυτός είναι κομβικός καθώς σε κάθε ένα από τα παραπάνω στάδια χρησιμοποιούνται διαφορετικά εργαλεία, διαφορετικά μεγέθη διαμανταλοιφών και προτείνονται εμφανώς διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας (όπως εμφανίζονται στον Πίνακα 3-2).

Μια πειραματική διαδικασία που θα περιελάμβανε και τα τρία στάδια, εμπιρεύοντας δυνητικά, στοιχεία όπως ο τύπος του εργαλείου σαν μεταβλητούς παράγοντες θα παρήγαγε δύσκολα, αξιοποιήσιμα δεδομένα. Προτείνεται συνεπώς ο σχεδιασμός τριών διαφορετικών πειραμάτων, ξεχωριστά για κάθε ένα από τα παραπάνω στάδια.

2. Σαφής καθορισμός και διατύπωση του σκοπού του πειράματος.

Στο παρόν πείραμα εξετάζεται η περίπτωση της αυτόματης στίλβωσης μεταλλικών δοκιμίων χάλυβα ck45 κάνοντας χρήση ειδικής ιδιοσυσκευής προσαρτώμενης στο κέντρο κατεργασιών Haas TM-1 του Εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών του ΕΜΠ.

Σκοπός του πειράματος είναι η εύρεση των βέλτιστων συνθηκών της κατεργασίας με κριτήριο την επίτευξη όσο το δυνατόν μικρότερων τιμών τραχύτητας επιφανείας. Δευτερεύον σκοπός του πειράματος είναι η τυποποίηση πειραματικής μεθόδου που

θα μπορεί να χρησιμοποιείται σε περίπτωση αλλαγής των παραμέτρων της διεργασίας (υλικό προς στίλβωση, τύπος εργαλείων κτλ.).

3. Επιλογή των μετρούμενων μεγεθών και των μετρητικών διατάξεων.

Σαν μετρούμενο μέγεθος επιλέγεται η επιφανειακή τραχύτητα και σαν μέσο μέτρησης της θα χρησιμοποιηθεί το φορητό τραχύμετρο Surftronic 3+ όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι ειδικότερα για το πείραμα της λείανσης θα μπορούσε να μετρηθεί και ποσότητα του αφαιρούμενου υλικού με τη μορφή μεταβολής του βάρους του εκάστοτε δοκιμίου καθώς θα μπορούσε να μεταφραστεί σε διαστασιακή ακρίβεια σε σχέση με μία τιμή στόχο. Η συγκεκριμένη μέτρηση θα αφορούσε αποκλειστικά το πείραμα της λείανσης καθώς εκεί αφαιρείται το μεγαλύτερο ποσοστό υλικού από όλη τη διεργασία (αβρ).

4. Επιλογή των παραγόντων που πιστεύεται ότι επηρεάζουν το μετρούμενο μέγεθος.

Βασιζόμενοι στη σχετική βιβλιογραφία, στην εργασία του Π. Αβραμπου και σε προσωπική εμπειρία επιλέχθηκαν να εξεταστούν οι παρακάτω παράγοντες:

- Η δύναμη που ασκείται στην επιφάνεια
Ελέγχεται παθητικά μέσω της μετατόπισης της ιδιοσυσκευής στον κατακόρυφο άξονα.
- Η περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου
Μετράται σε πραγματικό χρόνο με χρήση οπτικού ταχυμέτρου, όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και ρυθμίζεται επί τόπου.
- Η πρόωση του εργαλείου πάνω στην τροχοειδή καμπύλη
Ελέγχεται από το κέντρο κατεργασιών.

Άλλοι παράγοντες που συζητήθηκαν αλλά τελικά απορρίφθηκαν είναι:

- Οι παράμετροι a, b της τροχοειδούς καμπύλης
Απορρίφθηκε καθώς αφορούν κυρίως στην πλήρη κάλυψη της επιφάνειας και στην αποφυγή υπερκαλύψεων, περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί εκτενώς στην εργασία του Π. Αβράμπου.
- Το μέγεθος των κόκκων της διαμανταλοιφής

Κρίθηκε περιπτώ καθώς ακολουθήθηκε η προτεινόμενη από την κατασκευάστρια εταιρεία διαδικασία που επιτάσσει χρήση διαφορετικών αλοιφών σε συγκεκριμένη σειρά.

- Η αναλογία διαμανταλοιφής/λιπαντικού στην σιλιβωτική πάστα

Μέγεθος που εξετάζεται σε αρκετές περιπτώσεις στη σχετική βιβλιογραφία, κυρίως σε περιπτώσεις βιομηχανικών μηχανών στίλβωσης στις οποίες η διεργασία γίνεται σε κλειστό περιβάλλον. Στην τρέχουσα εργασία ακολουθήθηκε η προτεινόμενη από την κατασκευάστρια εταιρεία αναλογία.

5. Επιλογή των επιπέδων των παραγόντων.

Οι παράγοντες που επιλέχθηκαν τείνουν σε πολλές περιπτώσεις στη βιβλιογραφία να εμφανίζουν μη γραμμική συμπεριφορά, γι' αυτό θα εξεταστούν σε τρία επίπεδα. Η επιλογή των επιπέδων έγινε μέσα από προσωπική εμπειρία με χειροκίνητες και αυτόματες δοκιμές και επηρεάστηκε από τις προτεινόμενες συνθήκες όπως παρουσιάστηκαν στην εργασία του Π. Αβράμπου (πίνακας ()). Τα επίπεδα που επιλέχθηκαν για κάθε παράγοντα παρουσιάζονται, ξεχωριστά για κάθε πείραμα παρακάτω:

- Πείραμα λείανσης:

Πίνακας 5-5: Επίπεδα παραγόντων για το πείραμα λείανσης.

	Δύναμη (N)	Περιστροφική ταχύτητα (RPMx1000)	Πρόωση (mm/min)
Επίπεδο 1	3	10	200
Επίπεδο 2	5	15	300
Επίπεδο 3	7	18	400

- Πείραμα στίλβωσης με μπρούτζινο εργαλείο (Lapping):

Πίνακας 5-6: Επίπεδα παραγόντων για το πείραμα στίλβωσης με μπρούτζινο εργαλείο.

	Δύναμη (N)	Περιστροφική ταχύτητα (RPMx1000)	Πρόωση (mm/min)
Επίπεδο 1	0.5	8	200
Επίπεδο 2	1	10	300
Επίπεδο 3	2	15	400

- Πείραμα στίλβωσης με πλαστικό εργαλείο (Fine lapping):

Πίνακας 5-7: Επίπεδα παραγόντων για το πείραμα με πλαστικό εργαλείο

	Δύναμη (N)	Περιστροφική ταχύτητα (RPMx1000)	Πρόωση (mm/min)
Επίπεδο 1	5	10	200
Επίπεδο 2	6	15	300
Επίπεδο 3	7	18	400

6. Επιλογή του κατάλληλου ή των κατάλληλων ορθογώνιων πινάκων.

Για την επιλογή του κατάλληλου πίνακα τέθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο τα εξής κριτήρια:

- Ο αριθμός των παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων.

Στα πειράματα όπως σχεδιάστηκαν εξετάζονται τρεις παράγοντες οπότε απαιτείται πίνακας με τουλάχιστον 3 στήλες.

- Ο αριθμός των επιπέδων των παραγόντων

Κάθε παράγοντας εξετάζεται σε τρία επίπεδα οπότε θα χρησιμοποιηθεί πίνακας τριών επιπέδων. Υποψήφιοι είναι οι πίνακες L_9 , L_{18} και L_{27} .

- Η επιθυμητή ανάλυση του πειράματος

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή και επειδή είναι επιθυμητό η πειραματική διαδικασία που σχεδιάζεται να μπορεί να επαναληφθεί σχετικά εύκολα σε τυχόν αλλαγές του υλικού προς στίλβωση ή κάποιου εργαλείου κρίνεται ορθότερο να επιλεγεί ο πίνακας L_9 σε σχέση με τον L_{18} ή τον L_{27} . Αυτό συμβαίνει διότι ο αριθμός των δοκιμών που περιλαμβάνουν οι τελευταίοι θα καθιστούσε τη διαδικασία ασύμφορα χρονοβόρα και με αρκετά υψηλότερο κόστος. Επίσης όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5-8) οι πίνακες L_9 και L_{18} έχουν την ίδια ανάλυση για τρεις παράγοντες (ανάλυση 1) συνεπώς η μόνη επιλογή για αύξηση της ανάλυσης θα ήταν ο πίνακας L_{27} (ανάλυση 4).

Πίνακας 5-9: Βοηθητικός πίνακας για επιλογή κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα.

TABLE D-2 Three-Level Orthogonal Array Selection

OA	Number of three-level factors								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
L_9	4*		1	Not possible					
L_{18}				1					
L_{27}	4		2		1				

Αποφασίστηκε συνεπώς να επιλεγεί ο πίνακας L₉ και να θυσιαστεί μέρος της ανάλυσης του πειράματος για να γίνει η διαδικασία εφαρμόσιμη.

7. Επιλογή των αλληλεπιδράσεων που πιστεύεται ότι μπορεί να υπάρχουν μεταξύ των παραγόντων.

Λόγω της συνθέτης φύσης της διεργασίας που εξετάζεται, είναι δύσκολο να προσδιοριστούν οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων. Πιθανότερο θεωρείται πως είναι να εμφανιστεί αλληλεπίδραση μεταξύ της πρόωσης και της περιστροφικής ταχύτητας.

8. Τοποθέτηση των παραγόντων στον ορθογώνιο πίνακα και εντοπισμός των αλληλεπιδράσεων.

Η τοποθέτηση των παραγόντων στον πίνακα L₉ θα γίνει ως εξής:

Πίνακας 5-10: Τοποθέτηση παραγόντων στον ορθογώνιο πίνακα.

Παράγοντας	Στήλη
Δύναμη	1
Περιστροφική ταχύτητα	2
Πρόωση	3

Όπως παρατηρείται και στον παρακάτω τριγωνικό πίνακα (Πίνακας 5-11), η αλληλεπίδραση μεταξύ της πρόωσης και της περιστροφικής ταχύτητας εμφανίζεται στις στήλες 1 και 4.

Τα τελευταία βήματα που αφορούν την διεξαγωγή του πειράματος, την ανάλυση και την ερμηνεία των πειραματικών δεδομένων και τη διεξαγωγή των πειραμάτων επιβεβαίωσης θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 5-12: Τριγωνικός πίνακας αλληλεπιδράσεων για πίνακες 3 επιπέδων. (27)

Table A-9. Triangular Table for 3 Level Orthogonal Arrays*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13											
(1)	3	2	2	6	5	5	9	8	8	12	11	11											
	4	4	3	7	7	6	10	10	9	13	13	12											
	(2)	1	1	8	9	10	5	6	7	5	6	7											
		(3)	4	3	11	12	13	11	12	13	8	9	10										
			(3)	1	9	10	8	7	5	6	6	7	5										
				(4)	2	13	11	12	12	13	11	10	8	9									
					(4)	10	8	9	6	7	5	7	5	6									
						(4)	12	13	11	13	11	12	9	10	8								
							(5)	1	1	2	3	4	2	4	3								
								(5)	7	6	11	13	12	8	10	9							
									(6)	1	4	2	3	2	4								
										(6)	5	13	12	11	10	9	8						
											(7)	3	4	2	4	3	2						
												(7)	12	11	13	9	8	10					
													(8)	1	1	2	3	4					
														(8)	10	9	5	7	6				
															(9)	1	4	2	3				
																(9)	8	7	6	5			
																	(10)	3	4	2			
																		(10)	6	5	7		
																			(11)	1	1		
																				(11)	13	12	
																					(12)	1	1
																						(12)	11

6 Διεξαγωγή πειραμάτων - αποτελέσματα

6.1 Εισαγωγή

Με το τέλος της φάσης του σχεδιασμού και με τη συμπλήρωση του ορθογώνιου πίνακα καθορίζονται αυτόματα τόσο το πλήθος των διαφορετικών επαναλήψεων αλλά και ο συνδυασμός των τιμών των παραγόντων για καθεμιά από αυτές. Για τη φάση διεξαγωγής των πειραμάτων προτείνεται από τη μέθοδο η εκτέλεση των δοκιμών σε τυχαία σειρά καθώς έτσι διασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή του συστηματικού σφάλματος στα πειραματικά δεδομένα. Επίσης συνιστάται σε κάθε επανάληψη να λαμβάνονται τουλάχιστον δύο μετρήσεις και να υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Στις συγκεκριμένες σειρές πειραμάτων ελήφθησαν οκτώ μετρήσεις ανά δοκίμιο.

Τα πειράματα έλαβαν χώρα στο κέντρο κατεργασιών Haas TM-1 του εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ και η πειραματική διαδικασία διήρκησε συνολικά τέσσερις εβδομάδες. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται, αναλύονται και ερμηνεύονται στην συνέχεια.

6.2 Έκθεση αποτελεσμάτων

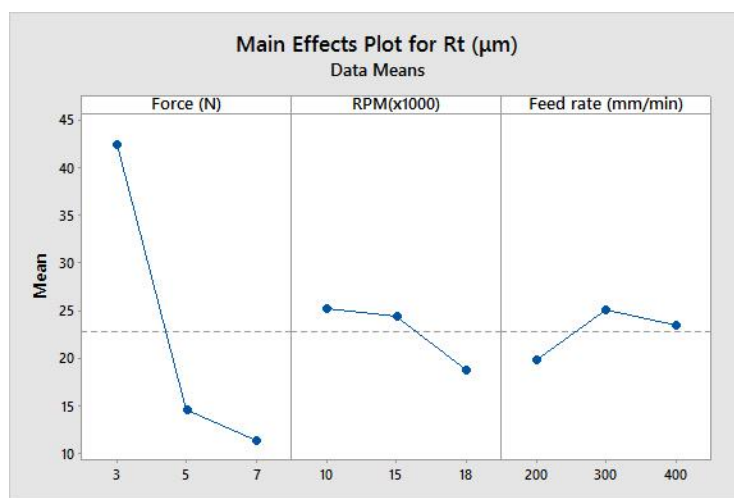
6.2.1 Πείραμα λείανσης

Οι δοκιμές της πρώτης σειράς πειραμάτων έγιναν με χρήση του διαμαντένιου δακτυλίου της NOVAPAX, χωρίς χρήση επιπλέον λιπαντικού υγρού. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν αρχική τραχύτητα 80μm κατά μέσο όρο (απόκλιση $\pm 4\mu\text{m}$) και κατεργάστηκαν με επτά περάσματα ανά δοκιμή. Η τροχιά του εργαλείου ήταν τροχοειδής καμπύλη με παραμέτρους $a=2.5$ και $b=9.5$ με καμπύλη οδηγό ευθύγραμμο τμήμα συγκεκριμένου μήκους. Οι δοκιμές και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6-1):

Πίνακας 6-2: Αποτελέσματα δοκιμών πειράματος λείανσης.

Grinding test				
Trial No.	A	B	C	Roughness
#	Force (N)	R. Speed (RPM)	Feed rate (mm/min)	Rt (μm)
1	3	10	200	43.75
2	3	15	300	45.5
3	3	18	400	38
4	5	10	300	18.25
5	5	15	400	18.75
6	5	18	200	7
7	7	10	400	13.5
8	7	15	200	9
9	7	18	300	11.5

Η κύρια επίδραση των παραγόντων απεικονίζεται στο Σχήμα 6-1:



Σχήμα 6-2: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για το πείραμα λείανσης.

Τα αποτελέσματα της ANOVA για το πείραμα παρουσιάζονται στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 6-3: Πίνακας ANOVA πειράματος λείανσης.

Παράγοντες	f	S	V	F	P
Δύναμη	2	1747.347	873.673	111.434	93.11%
Περιστροφική ταχύτητα	2	71.847	35.92361	4.581	3.82%
Πρόωση	2	41.722	20.86111	2.660	2.22%
Σφάλμα	2	15.68056	7.840278	1	0.83%
Σύνολο	8	1876.6			100%

Όπως είναι οπτικά εμφανές από το διάγραμμα (Σχήμα 6-3) ο βέλτιστος συνδυασμός των παραγόντων για το πείραμα της λείανσης είναι ο εξής:

Πίνακας 6-4: Βέλτιστα επίπεδα παραγόντων για το πείραμα λείανσης

Δύναμη	7 N
Περιστροφική ταχύτητα	18000 RPM
Πρόωση	200 mm/min

Επιλέγονται, συνεπώς, οι μεγαλύτερες τιμές δύναμης και περιστροφικής ταχύτητας και η μικρότερη πρόωση. Τα αποτελέσματα αυτά είναι λογικά καθώς μεγαλύτερη δύναμη και περιστροφική ταχύτητα προκαλούν μεγαλύτερους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού. Όσο γρηγορότερα αφαιρείται υλικό, τόσο πιο γρήγορα καταστρέφονται και τα 'αυλάκια' που έχουν δημιουργηθεί κατά την χάραξη των δοκιμών και συνεπώς μειώνεται η τραχύτητα. Έπειτα όσο μικρότερη είναι η πρόωση τόσο περισσότερο χρόνο είναι το εργαλείο σε επαφή με την υπό κατεργασία επιφάνεια και σε συνδυασμό με την ταχύτητα περιστροφής τόσο περισσότερο κατεργάζεται η δεύτερη.

Από την ANOVA παρατηρείται ότι στο αποτέλεσμα κατά κύριο λόγο συνεισφέρει ο παράγοντας της δύναμης σε ποσοστό 93.11%. Αποτέλεσμα που προκύπτει κυρίως λόγω της πολύ χαμηλής απόδοσης των δοκιμών στα οποία εφαρμόστηκε η χαμηλότερη δύναμη (3 N).

Η εκτίμηση για την απόκριση του βέλτιστου συνδυασμού προέκυψε ίση με:

$$Y_{opt} = 4.47 \mu m$$

Ενώ το επιβεβαιωτικό πείραμα έδωσε αποτέλεσμα για την επιφανειακή τραχύτητα:

$$Y_G = 5.1 \mu m$$

Υπάρχει, συνεπώς, μια απόκλιση της τάξης του 14%.

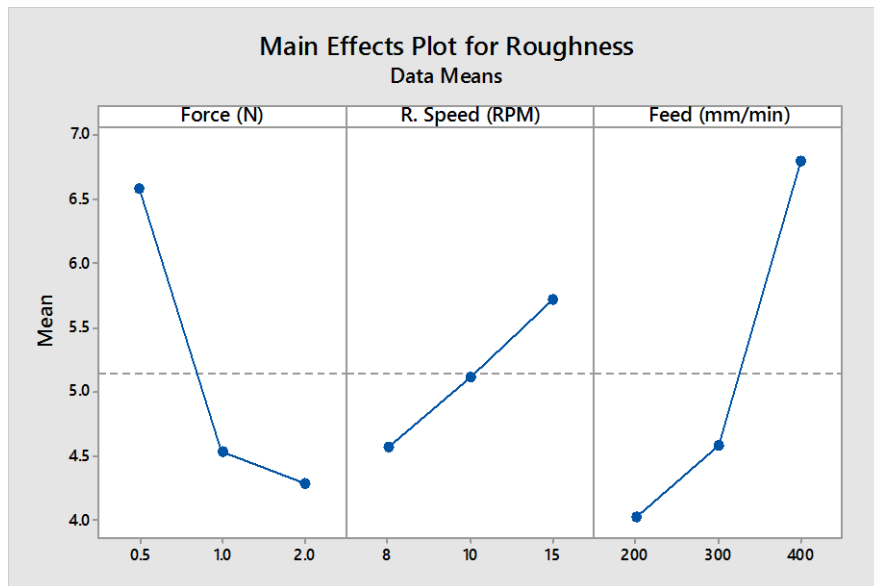
6.2.2 Πείραμα στίλβωσης με μπρούτζινο εργαλείο (Lapping)

Οι δοκιμές της δεύτερης σειράς πειραμάτων έγιναν με χρήση του μπρούτζινου δακτυλίου της NOVAPAX, με χρήση διαμανταλοιφής με μέγεθος κόκκου 15 μm και λιπαντικού υγρού στην αναλογία που ορίζει η κατασκευάστρια εταιρία. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ήδη κατεργαστεί με τον διαμαντένιο δακτύλιο και είχαν αρχική τραχύτητα 8 μm κατά μέσω όρο (απόκλιση $\pm 0.6\mu\text{m}$). Έγιναν πέντε περάσματα ανά δοκιμή. Η τροχιά του εργαλείου ήταν τροχοειδής καμπύλη με παραμέτρους $a=2.5$ και $b=9.5$ με καμπύλη οδηγό ευθύγραμμο τμήμα συγκεκριμένου μήκους. Οι δοκιμές και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6-5):

Πίνακας 6-6: Αποτελέσματα δοκιμών πειράματος στίλβωσης με μπρούτζινο δακτύλιο.

Brass disk lapping test				
Trial No.	A	B	C	Roughness
#	Force (N)	R. Speed (RPM)	Feed rate (mm/min)	Rt (μm)
1	0.5	8	200	5.1
2	0.5	10	300	5.37
3	0.5	15	400	9.28
4	1	8	300	3.87
5	1	10	400	6.37
6	1	15	200	3.37
7	2	8	400	4.75
8	2	10	200	3.62
9	2	15	300	4.5

Η κύρια επίδραση των παραγόντων απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 6-4:



Σχήμα 6-5: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για το πείραμα στίλβωσης με μπρούτζινο δακτύλιο.

Τα αποτελέσματα της ANOVA για το πείραμα παρουσιάζονται στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 6-7: Πίνακας ANOVA πειράματος στίλβωσης με μπρούτζινο δακτύλιο.

Παράγοντες	f	S	V	F	P
Δύναμη	2	9.509	4.755	4.877	36.12%
Περιστροφική ταχύτητα	2	1.962	0.981	1.006	7.45%
Πρόωση	2	12.903	6.452	6.618	49.02%
Σφάλμα	2	15.68	0.974	1	7.40%
Σύνολο	8	26.324			100%

Όπως είναι οπτικά εμφανές από το διάγραμμα (Σχήμα 6-6) ο βέλτιστος συνδυασμός των παραγόντων για το πείραμα στίλβωσης με μπρούτζινο δακτύλιο είναι ο εξής:

Πίνακας 6-8: Βέλτιστα επίπεδα παραγόντων για το πείραμα στίλβωσης με μπρούτζινο δακτύλιο.

Δύναμη	2 N
Περιστροφική ταχύτητα	8000 RPM
Πρόωση	200 mm/min

Σε αντίθεση με το προηγούμενο πείραμα εδώ επιλέγεται η μικρότερη τιμή της ταχύτητας περιστροφής. Επίσης στην περίπτωση της δύναμης η επιλογή της

υψηλότερης τιμής δημιουργεί το ερώτημα εάν ακόμα υψηλότερη τιμή θα παρήγαγε καλύτερα αποτελέσματα. Στην περίπτωση του μπρούτζινου εργαλείου η εμπειρία δείχνει ότι μεγαλύτερες τιμές δύναμης έχουν αρνητικό αποτέλεσμα στην τραχύτητα της επιφανείας. Αυτό συμβαίνει διότι ο μπρούτζος δεν ενδίδει όσο αλλά υλικά (πχ πλαστικά) και κατά συνέπεια, αν του ασκηθεί μεγαλύτερο φορτίο αρχίζει να 'σέρνει' τους κόκκους της διαμανταλοιφής πάνω στην επιφάνεια χαράζοντας την και αυξάνοντας έτσι την επιφανειακή της τραχύτητα.

Από την ANOVA παρατηρείται ότι στο αποτέλεσμα συνεισφέρουν σχεδόν εξίσου η δύναμη και η πρόωση και λιγότερο η περιστροφική ταχύτητα.

Η εκτίμηση για την απόκριση του βέλτιστου συνδυασμού προέκυψε ίση με:

$$Y_{opt} = 2.62\mu m$$

Ενώ το επιβεβαιωτικό πείραμα έδωσε αποτέλεσμα για την επιφανειακή τραχύτητα:

$$Y_G = 3\mu m$$

Υπάρχει συνεπώς μια απόκλιση της τάξης του 15%.

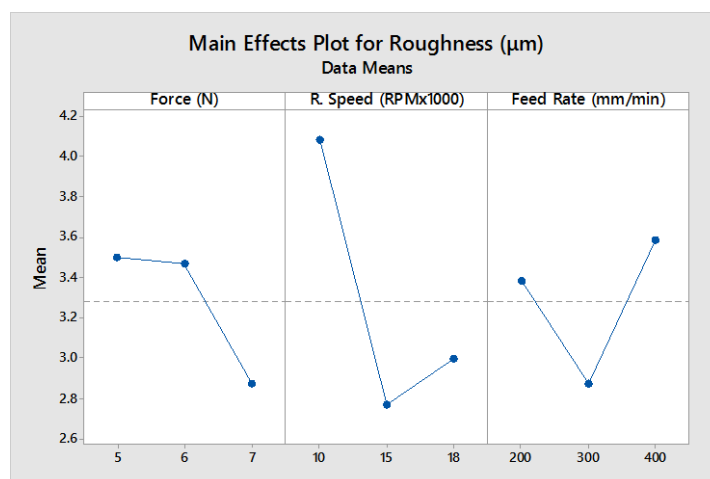
6.2.3 Πείραμα στίλβωσης με πλαστικό εργαλείο (Fine lapping):

Οι δοκιμές της τρίτης σειράς πειραμάτων έγιναν με χρήση του πλαστικού δακτυλίου της NOVAPAX, με χρήση διαμανταλοιφής με μέγεθος κόκκου 10 μm και λιπαντικού υγρού στην αναλογία που ορίζει η κατασκευάστρια εταιρία. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ήδη κατεργαστεί με τον διαμαντένιο και τον μπρούτζινο δακτύλιο και είχαν αρχική τραχύτητα 5 μm κατά μέσο όρο (απόκλιση $\pm 0.5\mu m$). Έγιναν πέντε περάσματα ανά δοκιμή. Η τροχιά του εργαλείου ήταν τροχοειδής καμπύλη με παραμέτρους $a=2.5$ και $b=8.5$ με οδηγό ευθύγραμμο τμήμα. Οι δοκιμές και τα αποτελέσματα δίνονται στο σχετικό πίνακα (Πίνακας 6-9):

Πίνακας 6-10: Αποτελέσματα δοκιμών πειράματος στίλβωσης με πλαστικό δακτύλιο.

Plastic disk lapping test				
Trial No.	A	B	C	Roughness
#	Force (N)	R. Speed (RPMx1000)	Feed rate (mm/min)	Rt (μm)
1	5	10	200	4.6
2	5	15	300	2.4
3	5	18	400	3.5
4	6	10	300	3.8
5	6	15	400	3.45
6	6	18	200	3.1
7	7	10	400	3.8
8	7	15	200	2.45
9	7	18	300	2.38

Η κύρια επίδραση των παραγόντων απεικονίζεται στο Σχήμα 6-7



Σχήμα 6-8: Διάγραμμα κυρίων επιδράσεων για το πείραμα στίλβωσης με πλαστικό δακτύλιο.

Τα αποτελέσματα της ANOVA για το πείραμα παρουσιάζονται στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 6-11: Πίνακας ANOVA πειράματος στίλβωσης με πλαστικό δακτύλιο.

Παράγοντες	f	S	V	F	P
Δύναμη	2	0.720	0.360	3.336	15.43%
Περιστροφική ταχύτητα	2	2.893	1.447	13.411	62.01%
Πρόωση	2	0.837	0.419	3.880	17.94%
Σφάλμα	2	0.216	0.108	1	4.62%
Σύνολο	8	1876.6			100%

Όπως είναι οπτικά εμφανές από το διάγραμμα (Σχήμα 6-9) ο βέλτιστος συνδυασμός των παραγόντων για το πείραμα στίλβωσης με πλαστικό δακτύλιο είναι ο εξής:

Πίνακας 6-12: Βέλτιστα επίπεδα παραγόντων πειράματος στίλβωσης με πλαστικό δακτύλιο.

Δύναμη	7 N
Περιστροφική ταχύτητα	15000 RPM
Πρόωση	300 mm/min

Τα αποτελέσματα της τρίτης σειράς πειραμάτων είναι δύσκολο να ερμηνευτούν καθώς επιλέγονται ως βέλτιστα τα ενδιάμεσα επίπεδα σε δύο από τους τρεις παράγοντες (περιστροφική ταχύτητα και πρόωση). Η ασάφεια των αποτελεσμάτων αποδίδεται κυρίως στα πολύ μικρά μεγέθη τραχύτητας που μετρούνται και στην ακρίβεια που απαιτείται για τις μετρήσεις αυτές.

Από την ANOVA παρατηρείται ότι στο αποτέλεσμα συνεισφέρει κυρίως η π. ταχύτητα και λιγότερο η δύναμη και η πρόωση.

Η εκτίμηση για την απόκριση του βέλτιστου συνδυασμού προέκυψε ίση με:

$$Y_{opt} = 1.95\mu m$$

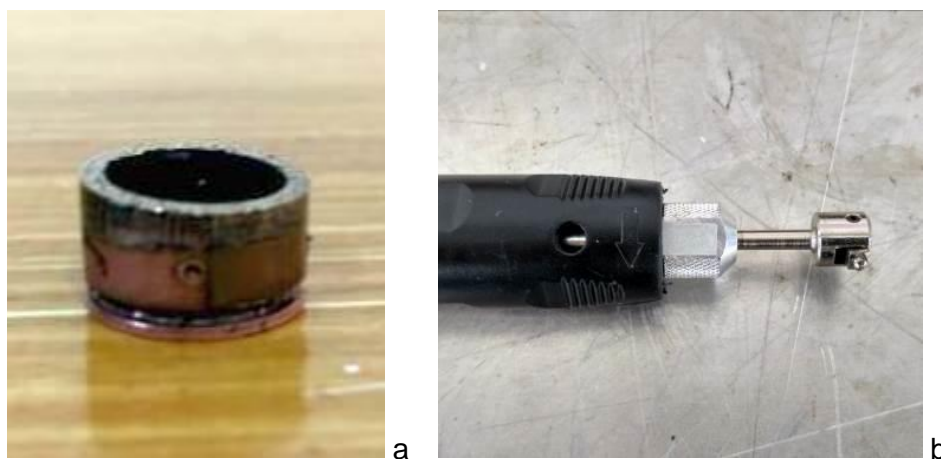
Ενώ το επιβεβαιωτικό πείραμα έδωσε αποτέλεσμα για την επιφανειακή τραχύτητα:

$$Y_G = 2.21\mu m$$

Υπάρχει συνεπώς μια απόκλιση της τάξης του 12%.

6.3 Παρατηρήσεις στα πειράματα

Οι τρεις σειρές πειραμάτων εκτελέστηκαν κατά κύριο λόγο ομαλά, με εξαίρεση ένα ενδιαφέρον συμβάν. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων λείανσης ο διαμαντένιος δακτύλιος άρχισε απροσδόκητα να υπολειτουργεί. Μειώθηκε η κοπτική του ικανότητα και ταυτόχρονα αυξήθηκαν αισθητά οι κραδασμοί κατά τη διεργασία. Έγινε επιθεώρηση του εργαλείου με παύση της διαδικασίας και διαπιστώθηκε ότι ο δακτύλιος είχε ‘φθαρεί’ ανομοιόμορφα με τρόπο ώστε η κάτω του επιφάνεια από επίπεδη είχε αποκτήσει κλίση (Σχήμα 6-4a). Το γεγονός αποδόθηκε τελικά στην αυτοκόλλητη ανακλαστική ταινία που είχε κολληθεί πάνω του και προκαλούσε αζυγοσταθμία. Αποφασίστηκε λοιπόν η ανακλαστική ταινία να κολληθεί στο τσόκ της επεκτατικής ντίζας (Σχήμα 6-4b). Εν τω μεταξύ ο δακτύλιος επισκευάστηκε στον τόρνο με χρήση διαμαντόλιμας, το τελευταίο δοκίμιο απορρίφθηκε και η πειραματική διαδικασία συνεχίστηκε με νέο δοκίμιο.



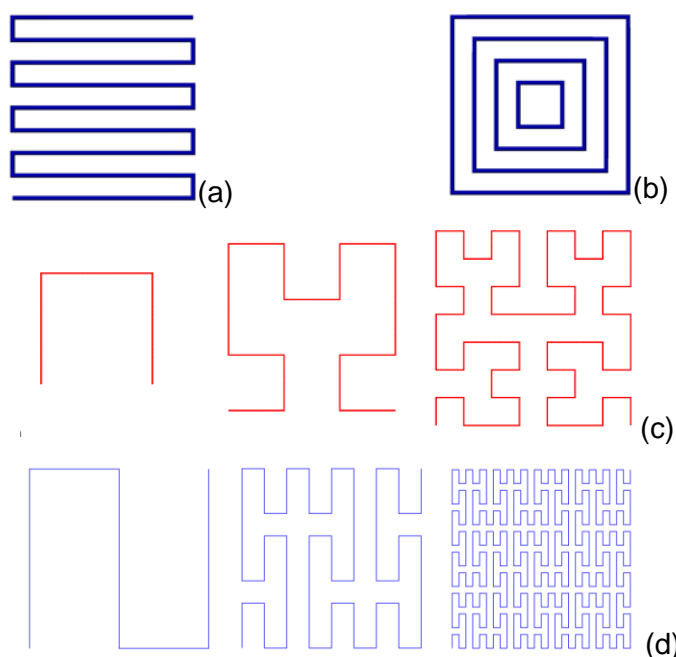
Σχήμα 6-10: (a) Διαμαντένιος δακτύλιος με βλάβη, (b) Ανακλαστική ταινία στο τσόκ της ντίζας

7 Πρακτική εφαρμογή

7.1 Εισαγωγή

Για την επιβεβαίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων και για την επαλήθευση της λειτουργικότητας τόσο της ιδιοσυσκευής όσο και της πειραματικής διαδικασίας που σχεδιάστηκε αποφασίστηκε να εκτελεστεί πρακτική εφαρμογή στίλβωσης μεταλλικής επιφάνειας. Να γίνει, δηλαδή, στίλβωση μεγαλύτερης επίπεδης επιφάνειας με χρήση κάποιου μοτίβου κάλυψης.

Υπάρχουν πολλά μοτίβα κάλυψης επιφανειών, ξεκινώντας από απλοϊκά παραδείγματα (πχ raster paths (Σχήμα 7-1a) ή contour offsets (Σχήμα 7-2b)) και καταλήγοντας σε πιο σύνθετες καμπύλες (πχ καμπύλες Hilbert (Σχήμα 7-3c) ή Peano (Σχήμα 7-4d)) όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 7-5). Στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγεται η χρήση σαρωτικής καμπύλης (zig zag) που θα χρησιμοποιηθεί σαν καμπύλη οδηγός για την τροχοειδή καμπύλη που θα ακολουθεί το εργαλείο.



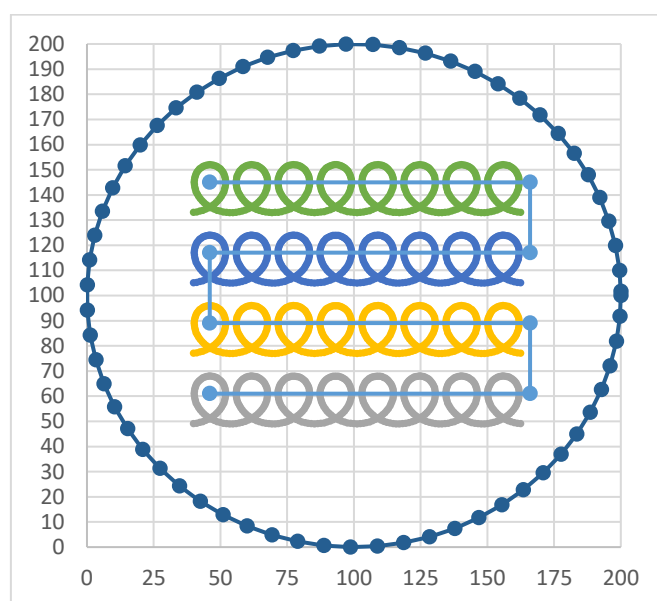
Σχήμα 7-6: Μοτίβα κάλυψης επιφανειών (a)raster path, (b)contour offset, (c)Hilbert iterations 1 to 3, (d) Peano iterations 1 to 3.

7.2 Περιγραφή εφαρμογής

Για τις ανάγκες της εφαρμογής επιλέχθηκε προς στίλβωση επιφάνεια με διαστάσεις 100x120mm σε δοκίμιο από χάλυβα ck45 διαμέτρου 200mm. Αρχικά χαράχθηκε η καμπύλη οδηγός και οι τροχοειδείς όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 7-7). Οι τροχοειδείς καμπύλες που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε στάδιο είχαν τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 7-1: Χαρακτηριστικά τροχοειδών καμπυλών ανά στάδιο της διεργασίας.

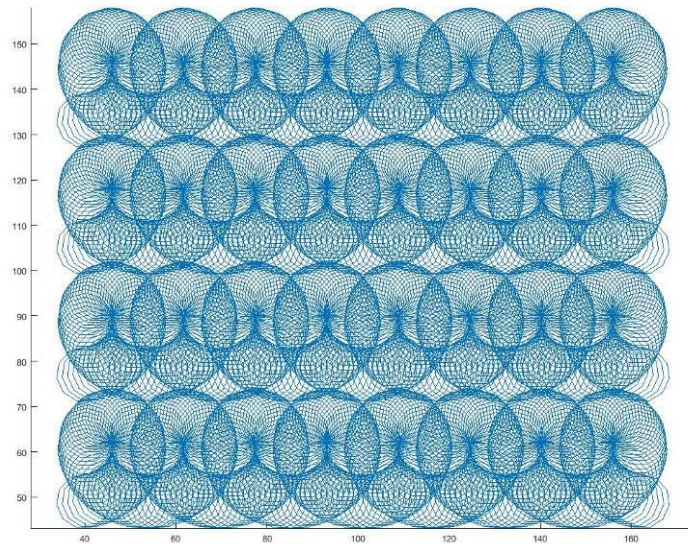
Στάδιο	a	b
Λείανση, Στίλβωση με μπρούτζινο εργαλείο	2.5	9.5
Στίλβωση με πλαστικό εργαλείο	2.5	9



Σχήμα 7-8: Απεικόνιση της τροχιάς του εργαλείου κατά την εφαρμογή.

Πρακτικά χρησιμοποιήθηκαν σαν καμπύλες-οδηγοί τα ευθύγραμμα τμήματα της σαρωτικής καμπύλης στον άξονα Χ.

Για την πλήρη κάλυψη της επιφάνειας και την αποφυγή μεγάλων υπερκαλύψεων έπρεπε να ρυθμιστεί η απόσταση μεταξύ των τροχοειδών, δηλαδή το ύψος ή βήμα της σαρωτικής καμπύλης οδηγού. Έγινε απεικόνιση του αποτελέσματος με χρήση του πακέτου Matlab και η ιδανική απόσταση προέκυψε 28mm όπως φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 7-9).

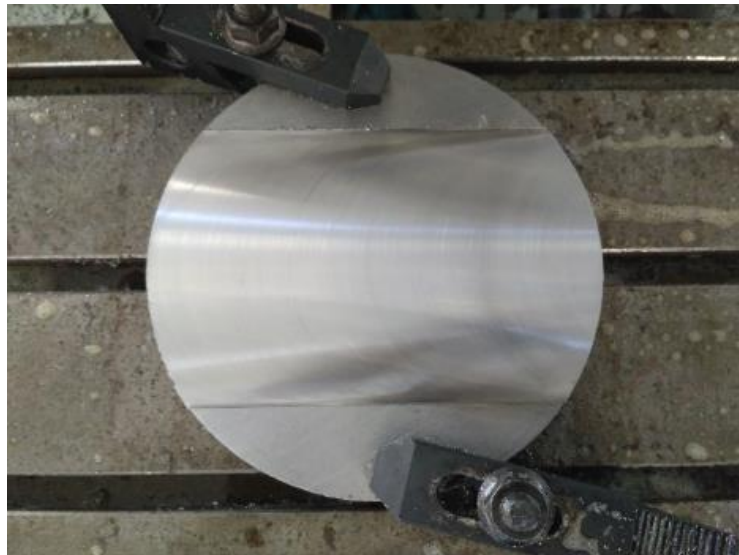


Σχήμα 7-10: Απεικόνιση της τροχιάς στίλβωσης για έλεγχο κενών και υπερκαλύψεων.

7.3 Αποτελέσματα

Ακολουθεί περιγραφή της διαδικασίας στίλβωσης που ακολουθήθηκε:

Αρχικά το δοκίμιο δέθηκε στο τραπέζι του κέντρου κατεργασιών και κατεργάστηκε με φρεζοκεφαλή (Σχήμα 7-11). Η τραχύτητα της επίπεδης επιφάνεια που προέκυψε μετρήθηκε ίση με 24 μm .



Σχήμα 7-12: Δοκίμιο μετά την κατεργασία με φρεζοκεφαλή.

Στη συνέχεια έγιναν έξι περάσματα με τον διαμαντένιο δακτύλιο ακολουθώντας της βέλτιστες συνθήκες της κατεργασίας όπως προέκυψαν από τα πειράματα λείανσης (Σχήμα 7-13). Μετά τη λείανση η επιφάνεια του δοκιμίου είχε τραχύτητα R_t 6 μm .



Σχήμα 7-14: Δείγμα της επιφάνειας με το πέρας της λείανσης.

Έπειτα ακολούθησε το στάδιο της στίλβωσης με μπρούτζινο δακτύλιο. Έγιναν τρία περάσματα με διαμανταλοιφή μεγέθους κόκκου 15 μm και τέσσερα περάσματα με διαμανταλοιφή 10 μm . Η διαμανταλοιφή εφαρμόστηκε σε είκοσι σημεία και με ταυτόχρονη χρήση λιπαντικού υγρού δημιουργήθηκε η στίλβωτική πάστα (Σχήμα 7-15). Η μετρούμενη τραχύτητα Rt στο δοκίμιο έπεσε στα 2 μm . Παρά την μικρή τιμή της επιφανειακής τραχύτητας, οπτικά η επιφάνεια θόλωσε αισθητά.



Σχήμα 7-16: Κατεργασία με μπρούτζινο δακτύλιο.

Με τα πρώτα κιάλας περάσματα με το πλαστικό εργαλείο η επιφάνεια καθάρισε σημαντικά και πλησίασε περισσότερο σε όψη 'καθρέπτη' (Σχήμα 7-17). Σε αυτό το στάδιο έγιναν τρία περάσματα με διαμανταλοιφή μεγέθους κόκκου 10 μm και τρία

περάσματα με διαμανταλοιφή 7 μ m. Η τραχύτητα της επιφάνειας του δοκιμίου μετρήθηκε ίση με 0.7 μ m.



Σχήμα 7-18: Η επιφάνεια μετά τα πρώτα περάσματα με πλαστικό δακτύλιο.

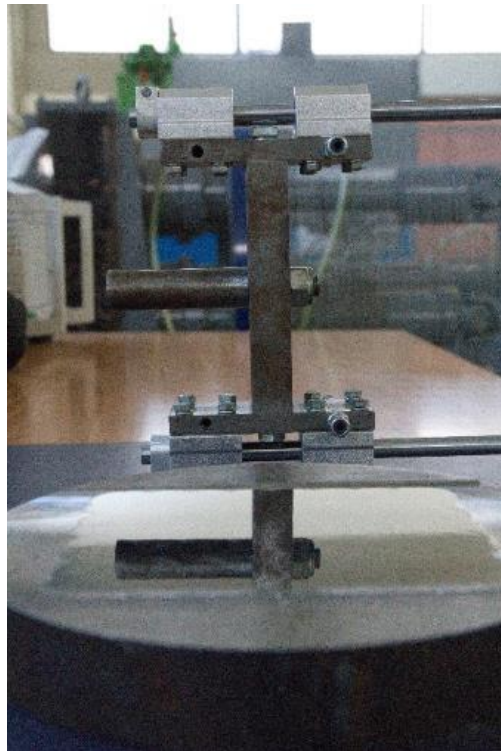
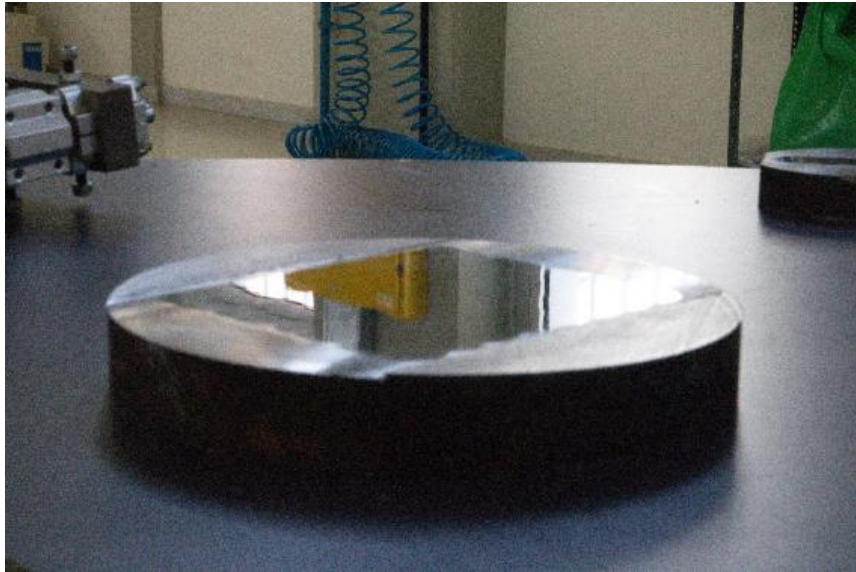
Τελειώνοντας τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε αλοιφή με μέγεθος κόκκων 3 μ m η οποία εφαρμόστηκε στην επιφάνεια χειροκίνητα, με αρκετή δύναμη και χωρίς τη χρήση λιπαντικού υγρού. Η τραχύτητα R_t του δοκιμίου δεν μειώθηκε αισθητά σε αυτό το στάδιο, αγγίζοντας τα 0.6 μ m, αλλά η διαφορά οπτικά ήταν αξιοσημείωτη καθώς αφαιρέθηκαν μικρές ατέλειες από τα προηγούμενα στάδια και η επιφάνεια ‘γυάλισε’ εμφανίζοντας όψη καθρέπτη δημιουργώντας πολύ καθαρά είδωλα (Σχήματα 7-19, 7-9).



(a)

(b)

Σχήμα 7-20: (a) Αποτέλεσμα διεργασίας, (b) Άποψη ποιότητας παραγόμενων ειδώλων από την επιφάνεια.



Σχήμα 7-21: Αποτέλεσμα στίλβωσης.

Η διαδικασία στέφθηκε με επιτυχία, καθώς επιτεύχθηκαν ικανοποιητικά επίπεδα τραχύτητας και ομοιομορφίας στην επιφάνεια, αποδεκτά για επιφάνεια καλουπιού. Το αποτέλεσμα όμως δεν ήταν ελεύθερο ατελειών καθώς εμφανίζονται στην επιφάνεια του δοκιμίου κατά τόπους μικρές ατέλειες που προκλήθηκαν κατά το στάδιο της λείανσης και οφείλονται στην φθορά του διαμαντένιου δακτυλίου. Αντικατάσταση του τελευταίου με καινούργιο θα έλυne αυτό το πρόβλημα.

8 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

8.1 Συμπεράσματα

Σε αυτό το τμήμα της εργασίας παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα και μια σύνοψη της δουλειάς που έγινε σε κάθε τμήμα της εργασίας.

Σκοπός της εργασίας ήταν η βελτιστοποίηση και η απόδειξη της λειτουργικότητας συστήματος στίλβωσης που προσαρμόζεται σε κέντρο κατεργασιών και έχει σχεδιαστεί με σκοπό την αυτόματη στίλβωση επιφανειών μεταλλικών καλουπιών εκμεταλλευόμενο το σύστημα Ring-finish της NOVAPAX.

Για την εξυπηρέτηση του σκοπού αυτού πραγματοποιήθηκε σειρά τροποποιήσεων στην ιδιοσυσκευή και την πειραματική διάταξη με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης τους. Οι τροποποιήσεις αυτές περιλάμβαναν τον σχεδιασμό, την κατασκευή και εφαρμογή παθητικού συστήματος ελέγχου της δύναμης με χρήση ελατηρίων, την βελτίωση των κινητικών χαρακτηριστικών της συσκευής με κατάλληλη λίπανση, την εφαρμογή τρόπου ακριβούς μέτρησης της ταχύτητας του περιστρεφόμενου εργαλείου και τον on-the-spot έλεγχο της καθώς και την απαραίτητη αντικατάσταση τμημάτων του εξοπλισμού (επεκτατική ντίτζα). Με την εφαρμογή των παραπάνω διασφαλίστηκε ο πλήρης και ακριβής έλεγχος όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν τη διεργασία (δύναμη, ταχύτητα περιστροφής κτλ.) καθώς και η σταθερότητα του συστήματος το οποίο είναι πλέον ικανό να παράγει ικανοποιητικά και επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα, όπως επιβεβαιώθηκε με αυτόματες δοκιμές.

Κατόπιν επίτευξης των παραπάνω ακολούθησε ο σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας με σκοπό αφενός την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών της κατεργασίας και αφετέρου την τυποποίηση μεθόδου ικανής να χρησιμοποιηθεί σε πιθανές αλλαγές υλικού ή τύπου εργαλείου κτλ. Πολύ σημαντική σε αυτό το στάδιο ήταν η ανάλυση της στιλβωτικής μεθόδου σε τρία στάδια και ο σχεδιασμός ξεχωριστής πειραματικής διαδικασίας για κάθε ένα από αυτά. Με αυτό τον τρόπο διευκολύνθηκε ο σχεδιασμός των πειραμάτων μειώνοντας τον αριθμό των πιθανών παραγόντων και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Το σημαντικότερο όμως πλεονέκτημα ήταν η αύξηση της ευελιξίας που δίνει η συγκεκριμένη μέθοδος στον πειραματιστή, καθώς του δίνει τη δυνατότητα στην περίπτωση αλλαγής ενός εκ των εργαλείων που χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένο στάδιο της διεργασίας να εξάγει συμπεράσματα για τις βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας κατά τη χρήση του, εκτελώντας μόνο μέρος των πειραμάτων (μόνο αυτά που αφορούν το στάδιο στο οποίο χρησιμοποιείται το νέο εργαλείο). Σε περίπτωση στίλβωσης διαφορετικού υλικού βέβαια ο πειραματιστής πρέπει να εκτελέσει και τις τρεις σειρές πειραμάτων.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως σε περίπτωση ανάγκης για εξαγωγή αποτελεσμάτων που αφορούν διαφορετικά κριτήρια μπορούν, εκτός από την επιφανειακή τραχύτητα, να προστεθούν και άλλα μετρήσιμα μεγέθη στην διαδικασία. Για παράδειγμα, εάν ενδιαφέρει ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού (ή το βάθος κοπής) μπορεί να προστεθεί σαν μετρούμενο μέγεθος στο πείραμα της λείανσης η διαφορά βάρους του δοκιμίου πριν και μετά από κάθε δοκιμή. Η τελευταία παρατήρηση έχει σαν περιορισμό τα μετρούμενα μεγέθη που θα εξεταστούν να επηρεάζονται από τους ίδιους παράγοντες.

Με την διεξαγωγή των πειραμάτων προέκυψαν οι βέλτιστες συνθήκες για κάθε στάδιο της διεργασίας καθώς και το ποσοστό επιρροής του κάθε παράγοντα στο αποτέλεσμα. Σε αυτό το σημείο και ιδιαίτερα στα αποτελέσματα της ANOVA για τη συνεισφορά του κάθε παράγοντα στο αποτέλεσμα, έγινε εμφανές το πόσο σημαντικό είναι το επιλεγόμενο εύρος στις υποψήφιες τιμές των παραγόντων. Για παράδειγμα στην περίπτωση του πειράματος της λείανσης, η δύναμη που εφαρμόζεται στο εργαλείο προέκυψε ότι συνεισφέρει κατά 93% στο αποτέλεσμα. Η ένδειξη αυτή προέκυψε κυρίως λόγω της μεγάλης διαφοράς που εμφανιζόταν στην απόδοση της μικρότερης στάθμης της δύναμης (3N) σε σχέση με τα άλλα επίπεδα που επιλέχτηκαν (μέση απόδοση 42μm έναντι 14μm και 11μm). Για τη διόρθωση των παραπάνω η πειραματική διαδικασία θα έπρεπε να επαναληφθεί με διαφορετικές τιμές για τη δύναμη, που θα έδιναν μια πιο ρεαλιστική εικόνα για τη συνεισφορά του κάθε παράγοντα, χωρίς κάτι να αλλάζει απαραίτητα στις συνθήκες που προέκυψαν ως βέλτιστες. Τα επιβεβαιωτικά πειράματα που εκτελέστηκαν εμφάνισαν μικρή απόκλιση από τις εκτιμώμενες τιμές (της τάξης του 12%) γεγονός που δείχνει ότι η πειραματική διαδικασία είναι ικανή να παράγει σωστά συμπεράσματα για τις βέλτιστες συνθήκες της κατεργασίας από τις τιμές των παραγόντων που επιλέγονται από τον πειραματιστή. Τα παραπάνω δείχνουν ότι η διαδικασία μπορεί να εξάγει ορθά αποτελέσματα για την κατεργασία, δεν είναι όμως ανεξάρτητη από την εμπειρία ή την πληροφόρηση του εκάστοτε χειριστή.

Για την επιβεβαίωση των τιμών που προέκυψαν από τα πειράματα και την απόδειξη της ικανότητας του συστήματος να εκτελέσει το σχεδιαστικό σκοπό του έγινε πρακτική αυτόματη εφαρμογή σε μεγάλη μεταλλική επιφάνεια. Η εφαρμογή στέφθηκε με επιτυχία, παράγοντας επιφάνεια 'καθρέπτη' με μικρή τιμή επιφανειακής τραχύτητας και καλή ομοιομορφία πέραν μικρών ατελειών που οφείλονταν στην κακή κατάσταση του εργαλείου λείανσης (διαμαντένιος δακτύλιος).

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα της εργασίας δείχνουν ότι το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές εφαρμογές για τη στίλβωση μεταλλικών επιφανειών

με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η απόδοση του συστήματος μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω με αναβάθμιση τμημάτων του εξοπλισμού και κυρίως του περιστροφικού εργαλείου που εμφανίζει σχετικά μικρή ισχύ και συχνά μη-σταθερή συμπεριφορά. Επίσης, η πειραματική διαδικασία που αναπτύχθηκε κρίνεται ικανή να παράγει σωστά συμπεράσματα για τις βέλτιστες συνθήκες της κατεργασίας και συστήνεται να χρησιμοποιείται σε περίπτωση αλλαγής του επί στίλβωσης υλικού ή χρήση άλλων εργαλείων.

8.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Για τη βελτίωση του συστήματος και τη διεύρυνση της εφαρμογής του προτείνεται αρχικά η μελέτη του tool path σε περιπτώσεις επιφανειών τριών διαστάσεων με ανάπτυξη μαθηματικών κριτηρίων για την κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων σε μοτίβα κάλυψης επιφανείας (πχ καμπυλών Hilbert ή Peano), που να εξασφαλίζουν πλήρη κάλυψη της επιφανείας και αποφυγή υπερκαλύψεων.

Για την ενίσχυση των παραπάνω, επόμενες μελέτες θα ήταν καλό να εστιάσουν στην ανάπτυξη ενεργητικού συστήματος ελέγχου της δύναμης. Το παθητικό σύστημα που σχεδιάστηκε είναι παραπάνω από ικανό να ελέγξει τη δύναμη σε περιπτώσεις στίλβωσης επίπεδων επιφανειών αλλά σε περίπτωση που το σύστημα χρησιμοποιηθεί σε τρισδιάστατες επιφάνειες (γλυπτές καμπύλες) ο έλεγχος της δύναμης με το παρόν σύστημα καθίσταται ιδιαίτερα σύνθετος. Μια τέτοια μελέτη θα περιλαμβάνει την επιλογή του κατάλληλου αισθητηρίου, επενεργητή και ελεγκτή ώστε να αναπτυχθεί ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου που θα προσαρμόζει τη δύναμη στην επιφάνεια, στα κατάλληλα επίπεδα όπως έχουν προ-ρυθμιστεί, χωρίς εξωτερική παρέμβαση.

Επίσης προτείνεται η διεξαγωγή πειραμάτων ακολουθώντας την διαδικασία που σχεδιάστηκε για στίλβωση διαφορετικών υλικών και τη δημιουργία βάσης δεδομένων με τις βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας για κάθε υλικό.

Τέλος προτείνεται η δοκιμή διαφορετικών εργαλείων ιδιαίτερα για την περίπτωση της λείανσης, με δοκιμή διαφορετικών πετρών και ανάλυση της απαιτούμενης δύναμης για την επίτευξη της επιθυμητής διαστασιακής ακρίβειας.

Βιβλιογραφία

- [1] Αβράμπος Π., 'Σύστημα στίλβωσης καλουπιών σε κέντρα κατεργασιών CNC τριών αξόνων', Διπλωματική εργασία, 2015, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [2] Zhao Ji et al., 'A New Method of Automatic Polishing on Curved Aluminum Alloy Surfaces at Constant Pressure', *Int. J. Mech Tools*, Vol. 35, 1995, pp. 1683-1692.
- [3] Huisson J. P., Ismail F., Jafari A., Bedi S., 'Automated Polishing of Die Steel Surfaces', *Int. J. Manuf Technol*, 19, 2002, pp. 285-290
- [4] Liu C.H., Chen C.-C.A. Chen, Huang J.-S., 'The Polishing of Molds and Dies Using a compliance tool Holder Mechanism', *J. Mater Process Tech*, 166, 2005, pp. 230-236
- [5] Shiou F.-J., Ciou H.-S., 'Ultra-precision Surface Finish of the Hardened Stainless Mold Steel Using Vibration-Assisted Ball Polishing Process', *Int. J. Mach Tools Manuf*, 48, 2008 pp. 721-732
- [6] Shiou F.-J., Hsu C.-C., 'Surface Finishing of Hardened and Tempered Stainless Tool Steel Using Sequential Ball Grinding, Ball Burnishing, and Ball Polishing Processes on a Machining Center', *J. Mater Process Tech*, 205, 2008, pp. 249-258.
- [7] Pessoles X., Tournier C., 'Automatic Polishing Process of Plastic Injection Molds on a 5-axis Milling Center', *J. Mater Process Tech*, 209, 2009, pp. 3665-3673.
- [8] Miguzaki Y., Sakamoto M., 'Development of a Metal Polishing Robot System with Contact Pressure Control Using CAD/CAM Data', *Annals of the CIPR*, Vol. 39, 199, pp. 523-526.
- [9] Tam H.-Y., Osmond C.-H., Mok A., 'Robotic Polishing of Free Form Surfaces Scanning Paths', *J. Mater Process Tech*, 95, 1999, pp.191-200.
- [10] Ahn J.H. et al., 'Intelligently Automated Polishing for High Quality Surface Formation of Sculptured Die', *J. Mater Process Tech*, 130-131, 2002, pp. 339-344.
- [11] Nagata F. et al, 'CAD/CAM-Based Position/Force Controller for a Mold Polishing Robot', *Mechatronics*, 17, 2007, pp. 207-216.
- [12] Liao L., Xi F., Liu K., 'Modeling and Control of Automated Polishing/Deburring Process Using a Dual-Purpose Compliant Toolhead', *Int. J. Mach Tools Manuf*, 48, 2008, pp. 1454-1463.
- [13] Roswell A., Xi F., Liu G., 'Modelling and Analysis of Contact Stress for Automated Polishing', *Int. J. Mach Tools Manuf*, 46, 2006, pp. 424-435.

- [14] Xi F., Zhou D., 'Modelling Surface Roughness in the Stone Polishing Process', *J. Mach Tools Manuf*, 45, 2005, pp. 365-372.
- [15] Wang G., Wang Y., Xu Z., 'Modeling and Analysis of the Material Removal Depth for Stone Polishing', *J. Mater Process Tech*, 209, 2009, pp.2453-2463.
- [16] Rauch M., Duc E., Hascoet J.Y., 'Improving Trochoidal Tool Paths Generation and Implementation Using Process Constraints Modelling', *Int. J. Mach Tools Manuf*, 2009, 49, pp. 375–83.
- [17] Tam H.Y., Cheng H., 'An Investigation of the Effects of the Tool Path on the Removal of Material in Polishing', *J Mater Process Technol*, 2010, 210, pp. 807–818.
- [18] Chaves-Jacob J., Linares J.-M. , 'Improving Tool Wear and Surface Covering in Polishing via Toolpath Optimization', *J Mater Process Technol*, 213, 2013, pp.1661-1668.
- [19] Tsai M.J., Huang J.F., Kao W.L., 'Robotic polishing of precision molds with uniform material removal control', *Int. J. Mach Tools Manuf*, 49, 2009, pp. 885-895.
- [20] Zheng X., Yuan J., Wen D., Lou F., 'Parameters Optimization on the Lapping of 9Cr18 with Taguchi Method', *Key Eng Mat*, 359-360, 2008, pp. 158-161.
- [21] Deaconescu A., Deaconescu T., 'Robust Design of the Lapping Processes', 6th international DAAAM Baltic conference, April 2008, Tallin, Estonia.
- [22] Jun Li et al., 'Optimization of Polishing Parameters with Taguchi Method for LBO Crystal in CMP', *J. Mater Sci Technol*, 25, 2009, pp. 703-707.
- [23] Kumar P., Arun B.S., Babu A., 'Optimization of Process Parameters in Lapping of Stainless Steel', *Int. J. Eng Res Technol*, 9, 2013, pp.1865-1872.
- [24] Parate P., Ravidra B., Yarasu B., 'Optimization of Process Parameters of Lapping Operation by Taguchi Approach for Surface Roughness of SS3212', *Int. J. Mech Eng Technol*, 4, 2013, pp. 15-21.
- [25] Uddeholm, 'Polishing of Mold Steel', Edition 6, 2013
- [26] Budynas R., Nisbett K., 'Shigley's Mechanical Engineering Design', 9th Edition, 2008, McGraw-Hill.
- [27] Roy R., 'A Primer on the Taguchi Method', 1990, Society of Manufacturing Engineers.

Παράρτημα

Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται data sheets συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν.



Grinding and Engraving Set with flexible shaft BSG 135-Set Bavaria

Art.-No.: **44.191.70**
bar -code: **4006825446005**
sales unit: **4 pcs**

With this multi grinder and large range of accessories one can drill, rout, grind and brush. Various tools can be inserted on the head set of the tool. Besides the multi grinder is equipped with a flexible shaft. This shaft is particularly suitable for areas which are difficult to reach.

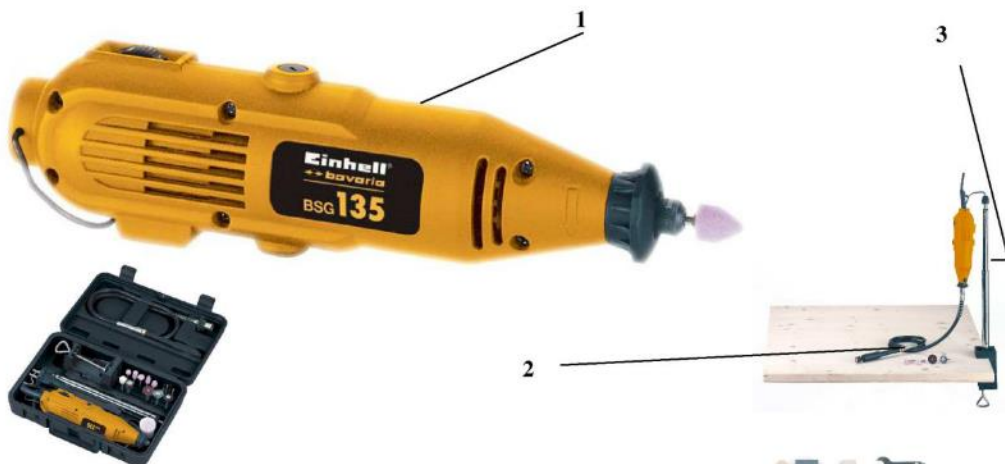
To change tools quickly the drive rod can be locked by pressing a button. The specially hardened collet chucks warrants safe locking of the drill bits. The speed control adapts very well to the various materials.

Ausstattung:

- 1 drive unit (1)
- 1 flexible shaft (2)
- 1 telescopic tripod (3)
- 1 plastic carrying case
- 5 point grinding made of special corundum
- 1 routing pin
- 1 sanding tool
- 1 adapter for
- miniature grinding-/
- miniatur cutting discs
- 2 tiny fine grinding stones of special white corundum
- 8 miniatur cutting discs
- 3 felt polishing discs
- 1 HSS-drill bit
- 1 grindstone
- 1 holder for felt polishing discs
- 1 engraving pen
- 1 clamping sleeve
- 1 key for locking chuck

Technische Daten:

- mains: 230 V ~ 50 Hz
- power: 135 Watt
- Idle speed n_0 : 10.000 – 35.000 min-1



As special accessory available:

100-parts accessory set in the wood case

Art.-Nr.: **44.195.04**
EAN-Code: **4006825509670**



Moving Metrology into the 21st Century

Surtronic 3+

Rapid on the shopfloor
Surface Texture Measurement



S p e c i f i c a t i o n

The Surtronic 3+ System Includes:

- Display and Traverse Unit
- Calibration Standard
- Battery
- Pick-up and Diamond Stylus
- Carrying Case
- Handbook

T e c h n i c a l D a t a

Gauge Range	±150µm (0.006in)	Resolution	0.01µm (0.4µin)
Traverse Length (Max)	25.4mm (1.0in)	Traverse Length (min)	0.25mm (0.01in)
Pick up type	Variable reluctance	Traverse Speed	1mm/sec (0.04in/sec)
Stylus	112/1502: Diamond tip radius 5µm (200µin) 112/1503: Diamond tip radius 10µm (400µin)		
Cut Off Values	0.25, 0.8, 2.5, 8mm (0.01, 0.03, 0.1, 0.3in) (8mm Cut off only available when using Talyprofile or Macro-Maker Software)	Accuracy of Parameters	2% of reading + LSD µm
Parameters	Ra, Rq, Rz (DIN), Ry, Sm, Rt	Power	Battery or Mains (optional)
Optional additional parameters	Pc (in place of Sm), tp% (in place of Rq) - with optional EPROM available on request	Graphical studies	Waviness + Roughness curves, with interactive selection of type of filter and cut-off, Graphical studies of R&W (ISO 12085): roughness and waviness motifs, upper envelope Graphical study of Rk (DIN 4776 and ISO 13565-2 standards) Display of intermediate profiles used to compute Rk, Interactive Abbott Curve, Bearing Ratio Curve of ISO 13565 standard (Rk), Computation profiles of ISO 13565 standard (Rk), Volume of a hole and the associated rejected material Distance, difference in height, slope between two points, Spectral analysis using Fourier transform, Averaged Spectral Density.
Parameters supplied with Data Processing Module	RA, RV, Rp, Rt, Rq, Ry, Rpm, Rz (DIN), RzJIS, Ir, Sm, Rsk, Rku, S, Pc, HSC, Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2, Rpk, Rvk, R, Rmax, Ar, Pt, Kr, tp%, Htp, Vo.		
Parameters supplied with Talyprofile Windows	Roughness parameters obtained by filtering: Ra, Rq, Rt, Rp, Rv, Rku, Rsk, RSm, Rz, RΔq, RTp, RHTp, Rlo, Rλq, RPC, RzJIS, R3z. Waviness parameters obtained by filtering: Wa, Wq, Wt, Wp, Wv, Wku, Wsk, WSm, Wz, WzJIS, Wλq, WΔq, WTP, WHTp, WLo, WPC, W3z. Parameters on the raw profile (unfiltered): Pa, Pq, Pt, Pp, Pv, Pku, Psk, PSm, Pz, PΔq, Pλq, PTP, PHTp, PLo, PPC. Parameters obtained by double filtering (DIN 4776): Rk, Rpk, Rvk, MR1, MR2, A1, A2, Rpk, Rvk Parameters obtained by the motifs method ("R&W"): R, AR, Pt, Rx, SR, SAR, Nr, Kr, W, AW, Wte, Wx, SW, SAW, Nw, Kw, Rke, Rpk, Rvke, Trc, HTrc.		
Overall Dimensions	130 x 80 x 65mm (5.1 x 3.3 x 2.5in)	Weight	450g (1lb)
Data Processing Module	185 x 140 x 50mm (7.5 x 5.5 x 2in)		

Application

The SKF TMRT series Includes two tachometers, TMRT 1 and TMRT 1Ex, utilising laser or contact for measuring rotational and linear speed. The laser optical system allows easy and quick measurement at safe distance from rotating machinery. Wide speed range and the divers measurement modes make the TMRT series suitable for measuring speed in many applications.

Description

Both tachometers, TMRT 1 and TMRT 1Ex, offer excellent speed measurement versatility in five different modes. Additionally, their large angular range of ± 80 to target facilitates the easy measurement in areas where straight-line access is difficult. The laser optical system allows easy and quick speed measurement at safe distance from rotating machinery. The user can select to measure rpm, rps, m, ft or yds per minute or second, length or count revolutions or time interval. Both tachometers are one-hand operated, compact instruments with a large inverting LCD display facilitating easy reading even when pointing the unit down into the machinery.

The TMRT 1 can also be equipped with remote laser sensor, which is optionally available.

The intrinsically safe version, SKF TMRT 1 Ex, has been especially designed for use in potentially explosive hazardous areas. It has been tested and certified according to the latest ATEX standards in intrinsic safety zones generally found in industries such as the petrochemical, gas and pharmaceutical among others.

Both tachometers, TMRT1 and TMRT 1Ex, are equipped with a contact adaptor.

Measurement modes

- Optical; rpm & rps (also Count & Time)
- Via contact adaptor; rpm & rps, metres, yards, feet, per min & per sec.
- Count total revs, metres, feet, yards
- Measure Time Interval in seconds between pulses (reciprocal rate)
- Speed Capture feature - Maximum, Minimum or Average rate



Technical details

Designation	TMRT 1 TMRT 1Ex
Display	Inverting LCD Vertical 5 digit display
Display functions	180° Inverting
Speed range	Optical mode: 3 - 99,999 rpm (or equivalent in rps) Contact mode: Max. 50,000 rpm for 10 sec (or equivalent in rps)
Maximum linear speeds	0.30 - 1500.0 Metres or Yds/min. (4,500 ft/min) or equivalent in seconds
Optical range	50 mm - 2000 mm (1.9 - 78.7 in) ± 80°
Angle of operation	
Light source	Class II laser diode
Accuracy speed modes only	0.01%, ± 1 digit
Resolution range features	Fully Auto ranging up to 0.001 digit or ± 1 digit fixed, user selectable
On target indicator	Yes
Low battery indicator	Yes
Memory features	Last reading held for 1 minute Program settings retained in memory after power off
Auto switch off	After 1 minute
Remote Input for laser remotesensor TMRT 1-56	Yes, TMRT 1 only
Contact adaptor	Included complete with rpm cone & removable metric wheel assembly
Battery type TMRT 1	4 x AAA alkaline cells
Battery type TMRT 1 Ex	Only use 4 x Duracell "Procell" AAA cells
Unit dimensions	213 x 40 x 39 mm (8.3 x 1.5 x 1.5 in)
Unit weight	170 g (5.9 oz)
Carrying case dimensions	238 x 49 x 102 mm (9.3 x 1.9 x 4.0 in)
Total weight (incl. case)	355 g (12.5 oz)
Warranty	12 months
Intrinsically safe classification	EEx ia IIC T4 - ATEX code: II 2G

