ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ/
ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ & ΘΕΩΡΙΑΣ ΜΗΧΑΝΩΝ**

ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Γ. ΧΡΥΣΟΛΟΥΡΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ
ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΠΑΛΜΟΥΣ
ΔΕΣΜΗΣ *LASER* ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ

ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ Γ. ΣΤΟΥΡΝΑΡΑΣ
ΔΙΠΛ. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2009

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ/
ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ & ΘΕΩΡΙΑΣ ΜΗΧΑΝΩΝ**

ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Γ. ΧΡΥΣΟΛΟΥΡΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ
ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΠΑΛΜΟΥΣ
ΔΕΣΜΗΣ *LASER* ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ

ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ Γ. ΣΤΟΥΡΝΑΡΑΣ
ΔΙΠΛ. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2009

Η παρούσα διατριβή αποτελεί μέρος του ερευνητικού προγράμματος ΠΕΝΕΛ2003-03ΕΛ575.

Το έργο συγχρηματοδοτείται

- **75% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο**
- **25% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας**
- **και από τον Ιδιωτικό Τομέα**

στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα – Γ΄ Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης.

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εγκρίθηκε ομόφωνα με βαθμό «ΑΡΙΣΤΑ» στις **28 Απριλίου 2009**, από την Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή η οποία ορίστηκε από την Γενική Συνέλευση με Ειδική Σύνθεση του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών, στην υπ' αριθμόν **7/31-03-2009** συνεδρίασή της, σύμφωνα με το άρθρο **36 Ν. 1268/82** και το άρθρο **13 Ν. 2083/92**, μετά από σχετική εισήγηση της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής.

Μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής αποτέλεσαν οι:

1. ΧΡΥΣΟΛΟΥΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Επιβλέπων)

Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών

2. ΑΝΥΦΑΝΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ (Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής)

Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών

3. ΠΑΝΤΕΛΑΚΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ (Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής)

Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών

4. ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών

5. ΚΑΡΑΜΠΕΛΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

Λέκτορας του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών

6. ΜΟΥΡΤΖΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Λέκτορας του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών

7. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Καθηγητής της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Στους γονείς μου, Γιώργο και Σταυρούλα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Από το 2000 ως προπτυχιακός και στην συνέχεια ως μεταπτυχιακός φοιτητής τέλεσα μέλος του Εργαστηρίου Συστημάτων Παραγωγής και Αυτοματισμού, του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Πατρών, όπου και είχα την ευκαιρία και την τύχη να έρθω σε επαφή με τον συναρπαστικό κόσμο των κατεργασιών με δέσμη *Laser*. Θα ήθελα λοιπόν να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον κ. *Χρυσολούρη Γεώργιο*, καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών και διευθυντή του συγκεκριμένου εργαστηρίου, ο οποίος ήταν ο επιβλέπων της παρούσας διατριβής, όχι μόνο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου αλλά και για την πολύτιμη καθοδήγηση του για την ολοκλήρωση της ερευνητικής εργασίας μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, καθηγητές *Παντελάκη Σπυρίδων* και *Ανυφαντή Νικόλαο* για τις εποικοδομητικές τους συμβουλές τους και την συμβολή τους στην ολοκλήρωση της διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον *Δρ. Μούρτζη Δημήτρη*, λέκτορα του τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών καθώς και στην κ. *Συμπούνη Αντζελα*, γραμματέα, για την συμπαράσταση τους κατά την διάρκεια εκπόνησης της διατριβής. Θα ήταν παράλειψη μεγάλη εάν δεν ευχαριστούσα θερμά τους φίλους και συνεργάτες *Δρ. Σαλωνίτη Κωνσταντίνο*, *Δρ. Σταυρόπουλο Παναγιώτη*, *Δρ. Τσουκαντά Γιώργο* και τους κ.κ. *Πανδρεμένο Ιωάννη* και *Παραλίκα Ιωάννη* αλλά και τον φίλο *Δρ. Καππάτο Βασίλη* για την φιλία και τις στιγμές που μοιραστήκαμε όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Οφείλω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στους τεχνίτες του Μηχανουργείου του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών κ.κ. *Πάυλου Νικόλαο*, *Σπυρόπουλο Νικόλαο*, *Σπυράτο Ιωάννη* και *Λάμπρου Δημήτριο* για τις συμβουλές τους και τις γνώσεις που μου προσέφερε η συνεργασία μαζί τους στον χώρο του Μηχανουργείου.

Όσο μεγάλο και αν είναι πάλι μικρό θα φαίνεται, αλλά θα ήθελα να εκφράσω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην σύντροφο μου *Χαρά* για την εμπιστοσύνη, την υπομονή, την συμπαράσταση και την κατανόηση της σε δύσκολες στιγμές αλλά και για την βοήθεια της, που μου προσέφερε με τον δικό της ιδιαίτερο και μοναδικό τρόπο όλο αυτόν τον καιρό.

Τέλος, τις πιο θερμές μου ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στους γονείς μου, *Γιώργο* και *Σταυρούλα*, τον αδερφό μου *Γιάννη* και την σύζυγο του *Ελένη* για την πίστη τους σε εμένα, την αδιάκοπη υποστήριξη, κατανόηση και συμπαράσταση τους που απλόχερα μου προσέφεραν χωρίς κανέναν ενδοιασμό και δισταγμό.

Στουρνάρας Αριστείδης
Πάτρα, Απρίλιος 2009

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΠΑΛΜΟΥΣ ΔΕΣΜΗΣ *LASER* ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η διερεύνηση και η ανάπτυξη μεθόδου παρακολούθησης της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης *Laser* (*Laser drilling*).

Η διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser* περιλαμβάνει την χρήση μιας εστιασμένης δέσμης *Laser* υψηλής ενεργειακής πυκνότητας για την διάτρηση του υλικού μέσω της τήξης ή ακόμα και εξάτμισης του. Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός συστήματος παρακολούθησης ικανό να προβλέψει σε πραγματικό χρόνο τα διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αποτελέσματος της διεργασίας αξιοποιώντας οπτικές αλλά και ακουστικές εκπομπές προερχόμενες από την περιοχή κατεργασίας. Τα σήματα που καταγράφονται μέσω φωτοδιόδων και μικροφώνων, σχετίζονται με την εξέλιξη της διεργασίας και κατά συνέπεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της. Θεωρητική ανάλυση της απόκρισης των αισθητήρων σε σχέση με την γεωμετρία της οπής που δημιουργείται, οδήγησε στην δημιουργία θεωρητικών μοντέλων ικανών να προβλέψουν άμεσα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής, όπως είναι το βάθος και η διάμετρος εισόδου, χρησιμοποιώντας τα σήματα που λαμβάνονται κατά την διάρκεια της διεργασίας. Παράλληλα, η ανάπτυξη εμπειρικών προτύπων συσχέτισης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών με τις παραμέτρους της διεργασίας, προκειμένου να αξιοποιηθούν για τον προγραμματισμό και τον έλεγχο της διεργασίας, αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας της παρούσης διατριβής.

Το σημαντικότερο συμπέρασμα που προκύπτει από την συγκεκριμένη διατριβή είναι ότι τόσο τα οπτικά όσο και τα ακουστικά σήματα που δημιουργούνται κατά την διάρκεια της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser* μπορούν να αξιοποιηθούν για την παρακολούθηση της διεργασίας σε πραγματικό χρόνο και κατά συνέπεια για τον άμεσο έλεγχο της διασφαλίζοντας έτσι την επίτευξη των στόχων και απαιτήσεων που ορίζονται, όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής.

SUMMARY

INVESTIGATION AND DEVELOPMENT OF REAL-TIME MONITORING AND CONTROL SYSTEM FOR PERCUSSION LASER DRILLING PROCESS

The main objective of the present study is the investigation and development of a real-time monitoring method of the percussion laser drilling process.

Percussion laser drilling process involves the utilization of a focused laser beam, presenting high power density to melt or vaporize the material. The present work is focalized in the development of a process monitoring system capable to predict the geometrical characteristics of the drill in real time utilizing optical and acoustic emissions originating from the processing zone. The signals acquired by means of photodiodes and microphone, are correlated with the process evolution and consequently can be used for the evaluation of the process output. Theoretical analysis of sensors' response in relation with the geometry of the drill led in the development of sensor models able to predict the geometrical characteristics of the drill, such as the depth and entrance diameter, utilizing the signals acquired during the process. Additionally, the development of empirical models, correlating hole's geometrical characteristics with process parameters, able to be utilized for the off-line programming as also and the control of the process, comprised research topic of the present dissertation.

The main conclusion of the present work is that both optical and acoustic signals originating from the processing zone during the laser drilling process, can be utilized for real-time process monitoring and consequently for process control purposes ensuring that the final product of the process is within the defined requirements, as far as geometry of the hole is concerned.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<u>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</u>	<u>V</u>
<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u>	<u>VII</u>
<u>SUMMARY</u>	<u>IX</u>
<u>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</u>	<u>XI</u>
<u>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	<u>1</u>
1.1 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER	1
1.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER	3
1.3 ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	6
1.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	9
1.5 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	10
1.6 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	11
1.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	14
<u>2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ</u>	<u>17</u>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
2.2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER	17
2.3 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER	26
2.3.1 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΣΩ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ,	28
2.3.2 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.	34
2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	40
<u>3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ</u>	<u>49</u>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	49
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	49
3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	53
3.3.1 «ΤΥΦΛΕΣ» ΟΠΕΣ	53

3.3.1.1	ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ	54
3.3.1.2	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	57
3.3.2	ΔΙΑΜΠΕΡΕΙΣ ΟΠΕΣ	60
3.3.2.1	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	62
3.3.2.2	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ	63
3.3.2.3	ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ	64
3.4	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	66
4	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	67
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	67
4.2	ΑΡΧΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	67
4.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ (REGRESSION ANALYSIS)	69
4.3.1	«ΤΥΦΛΕΣ» ΟΠΕΣ	73
4.3.1.1	ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ	73
4.3.1.2	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	77
4.3.2	ΔΙΑΜΠΕΡΕΙΣ ΟΠΕΣ	81
4.3.2.1	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	81
4.3.2.2	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ	84
4.3.2.3	ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ	88
4.4	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΟΠΗΣ.	91
4.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	93
5	ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΠΑΛΜΟΥΣ ΔΕΣΜΗΣ LASER	95
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	95
5.2	ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ	95
5.2.1	ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER	97
5.2.2	ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	98
5.2.3	ΟΠΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ	99
5.2.4	ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ	100
5.2.5	ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	101
5.2.6	ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΩΝ	102
5.3	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ	104
5.3.1	ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ	104
5.3.1.1	ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ	104
5.3.1.2	ΜΙΚΡΟΦΩΝΟ	106

5.3.2	ΙΔΙΟΣΥΣΚΕΥΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	107
5.3.3	ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	109
5.4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ	112
5.4.1	«ΤΥΦΛΕΣ» ΟΠΕΣ	112
5.4.1.1	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ	112
5.4.1.1.1	ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	119
5.4.1.2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ	124
5.4.1.2.1	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ (SENSITIVITY ANALYSIS)	130
5.4.1.2.2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	132
5.4.1.3	ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ «ΤΥΦΛΩΝ» ΟΠΩΝ ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ	139
5.4.2	ΔΙΑΜΠΕΡΕΙΣ ΟΠΕΣ	143
5.4.2.1	ΟΠΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ	143
5.4.2.1.1	ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	146
5.4.2.2	ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ	151
5.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	152
6	ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΠΑΛΜΟΥΣ ΔΕΣΜΗΣ LASER	155
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	155
6.2	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ	155
6.2.1	ΓΕΝΙΚΗ ΙΔΕΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ	155
6.3	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΠΑΛΜΟΥΣ ΔΕΣΜΗΣ LASER	157
6.4	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	162
6.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	167
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	169
7.1	ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	171
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	173
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ	175
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	179
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	187
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΒΑΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	189
	Δ1: «ΤΥΦΛΕΣ» ΟΠΕΣ – ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ	191
	Δ2: «ΤΥΦΛΕΣ» ΟΠΕΣ – ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	197

Δ3: ΔΙΑΜΠΕΡΕΙΣ ΟΠΕΣ – ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	203
Δ4: ΔΙΑΜΠΕΡΕΙΣ ΟΠΕΣ – ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ	207
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: ΣΧΕΔΙΑ	211
 ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ – ΕΡΓΑΣΙΕΣ	 215
 ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ	 215
ΔΙΕΘΝΗ ΣΥΝΕΔΡΙΑ	216
ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ	219

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER

Η τεχνολογία *Laser* και οι αντίστοιχες κατεργασίες με δέσμη *Laser* έχουν βρει σημαντική ανταπόκριση στην βιομηχανία και παρουσιάζουν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, λόγω ορισμένων χαρακτηριστικών τα οποία τους προσδίδουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με συμβατικές διεργασίες ([1]-[3]).

Η αποδοτικότητα των διεργασιών με δέσμη *Laser* εξαρτάται κυρίως από τις θερμικές και οπτικές ιδιότητες του υλικού και όχι από τις μηχανικές (αντοχή σε θραύση, όριο θραύσης, σκληρότητα, όριο διαρροής κτλ.). Κατά συνέπεια υλικά τα οποία είναι δύσκολο να κατεργαστούν με συμβατικές μεθόδους, π.χ. υψηλής σκληρότητας χάλυβες, κεραμικά, γυαλί, πλαστικά και σύνθετα υλικά, και διαθέτουν τις κατάλληλες θερμικές ιδιότητες, μπορούν να κατεργαστούν πολύ αποτελεσματικά με μια δέσμη *Laser*.

Επίσης, στις διεργασίες με δέσμη *Laser* η απαραίτητη για την διεργασία ενέργεια μεταφέρεται μέσω ακτινοβολίας και κατά συνέπεια δεν αναπτύσσονται δυνάμεις μέσω της επαφής εργαλείου-υλικού. Αυτό έχει σαν συνέπεια την απουσία σημαντικών προβλημάτων που παρουσιάζουν οι συμβατικές διεργασίες αφαίρεσης υλικού, όπως είναι η φθορά και θραύση εργαλείων, ταλαντώσεις κατά την διάρκεια της διεργασίας, παραμορφώσεις στα στοιχεία των εργαλειομηχανών κ.α.

Ένα άλλο πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι ο υψηλός βαθμός ευελιξίας. Ουσιαστικά το ίδιο σύστημα κατεργασίας και το ίδιο «εργαλείο», δηλ. η δέσμη *Laser*, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια πληθώρα διεργασιών όπως: διάτρηση, κοπή, χάραξη, συγκόλληση και θερμική επεξεργασία, με την ίδια προετοιμασία (*setup*) του ίδιου συστήματος *Laser*, μιας και οι διαφορετικές διεργασίες μπορούν να εκτελεστούν μεταβάλλοντας μόνο κάποιες κοινές παραμέτρους.

Επίσης, εξαιτίας του πολύ μικρού μεγέθους του στίγματος της δέσμης αλλά και της δυνατότητας διαχείρισης της κατανομής ισχύος της δέσμης, οι διεργασίες με δέσμη *Laser* χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας.

Ο σκοπός των διεργασιών αφαίρεσης υλικού με δέσμη *Laser* είναι η μεγιστοποίηση του ποσοστού αφαίρεσης υλικού, εξασφαλίζοντας βέλτιστη ποιότητα και διαστασιολογική ακρίβεια προκειμένου να παραχθεί οικονομικά, ένα υψηλής ποιότητας εξάρτημα ή προϊόν. Η αφαίρεση υλικού με δέσμη *Laser* μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους

βιομηχανικούς τομείς, όπως αυτοκινητοβιομηχανία, αεροπορική βιομηχανία, μικροεπεξεργασία, εμβιομηχανική, χειρουργική, για την δημιουργία τρισδιάστατων μορφών, κτλ. ([4]-[9]). Αυτές οι εφαρμογές όμως είναι σε διαφορετικά επίπεδα ανάπτυξης και βιομηχανικής εκμετάλλευσης. Μερικές από αυτές δεν έχουν εκμεταλλευτεί, είτε επειδή δεν προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με ανταγωνιστικές διεργασίες, είτε επειδή δεν είναι ακόμα επαρκώς θεμελιωμένες για βιομηχανική χρήση. Η βιομηχανική χρήση μερικών βασικών διεργασιών με δέσμη *Laser* εξαρτάται επίσης από την περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση των πηγών δέσμης *Laser* χαμηλού κόστους ([10]-[13]). Η τεχνολογία των *Lasers* προσφέρει διαφορετικές μεθόδους δημιουργίας μίας δέσμης τόσο συνεχούς κύματος όσο και παλμικής, με μήκος κύματος που κυμαίνεται από κλάσματα έως δεκάδες μm .

Ανάλογα με τον μηχανισμό που διέπει την επίδραση της δέσμης *Laser* στο υλικό, οι διεργασίες με δέσμη *Laser* μπορούν να διαχωριστούν σε διεργασίες αφαίρεσης υλικού ([11], [13]-[19]) συνένωσης ή προσθήκης υλικού ([20], [21]), και διεργασίες τροποποίησης των ιδιοτήτων ενός υλικού ([9], [22]-[26]). Η διαδικασία αφαίρεσης υλικού με δέσμη *Laser* αποτελεί μια εξαιρετικά καθιερωμένη οικογένεια διεργασιών. Κατά τη διάρκεια της επίδρασης της δέσμης στο υλικό, ορισμένη ποσότητα της ακτινοβολούμενης ενέργειας απορροφάται από το υλικό (απορρόφηση φωτονίων), γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στο υλικό κοντά στην περιοχή του στίγματος της δέσμης με συνέπεια την τοπική εξασθένηση, την τήξη ή και την εξάχνωση του υλικού. Ανάλογα με το υλικό που υποβάλλεται σε επεξεργασία, την ισχύ της δέσμης *Laser*, το μέγεθος του στίγματος της δέσμης, και την ταχύτητα σάρωσης, σε περίπτωση σχετικής κίνησης μεταξύ της δέσμης και του υλικού, τα αποτελέσματα που προκαλεί η δέσμη *Laser* στο υλικό μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τα φαινόμενα που προκαλούνται ([1], [3], [10], [27]):

- **Μηχανικά αποτελέσματα:** Σε περίπτωση μικρών και μέσων τιμών έντασης *Laser*, σε συνδυασμό με υψηλές ταχύτητες σάρωσης, η άνοδος της θερμοκρασίας στην επεξεργαζόμενη επιφάνεια είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του υλικού. Κατά συνέπεια, το επεξεργαζόμενο υλικό θερμαίνεται τοπικά και οι δεσμοί των μορίων του υλικού εξασθενούν.
- **Αποτελέσματα αλλαγής φάσης:** Όταν η ένταση *Laser* είναι αρκετά υψηλή έτσι ώστε να ανυψώσει τη θερμοκρασία της ακτινοβολούμενης επιφάνειας του υλικού πάνω από το σημείο τήξης του υλικού ή και του σημείου εξάχνωσης.
- **Φυσικές-χημικές αλληλεπιδράσεις:** Ανάλογα με το βοηθητικό υλικό που χρησιμοποιείται στην εκάστοτε διεργασία, το οποίο και την επηρεάζει, μπορούν να πραγματοποιηθούν φυσικό-χημικές αντιδράσεις μεταξύ του βοηθητικού

υλικού και του προς επεξεργασία κομματιού. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η ενεργοποίηση φαινομένων, όπως το κάψιμο, η πυροσυσσωμάτωση, η συγκόλληση, η ανάμειξη, κτλ.

1.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER

Η διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser* περιλαμβάνει την αξιοποίηση μιας εστιασμένης δέσμης *Laser* υψηλής ενεργειακής πυκνότητας για την διάτρηση του υλικού μέσω της τήξης ή ακόμα και εξάτμισης του ([1]). Όπως σε όλες τις διεργασίες με δέσμη *Laser*, η διεργασία διάτρησης βασίζεται στην απορρόφηση της ενέργειας της δέσμης από το υλικό και την μετατροπή της ενέργειας των φωτονίων σε θερμική ενέργεια ([28]). Όταν η θερμοκρασία του υλικού ξεπεράσει το σημείο τήξης ή ακόμα και εξάτμισης, το υλικό αλλάζει φάση, απομακρύνεται κυρίως εξαιτίας της πίεσης ατμών και του βοηθητικού αερίου, το οποίο ρέει ομοαξονικά με την δέσμη, και με αυτό τον τρόπο σχηματίζεται η οπή.

Σχήμα 1-1: Σχηματική απεικόνιση διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser*.

Η διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser* μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με την σχετική κίνηση της δέσμης ως προς το κατεργαζόμενο υλικό ως εξής ([1], [29],[30]):

- Κρουστική διάτρηση (*percussion Laser drilling*)
- Διάτρηση μέσω κοπής (*trepanning Laser drilling*)
- Ελικοειδής διάτρηση (*helical Laser drilling*)

Στην περίπτωση της κρουστικής διάτρησης η δέσμη παραμένει στατική επάνω από το υλικό και προσπίπτει στην επιφάνεια του υλικού, συνεχόμενα ή παλμικά, και η αφαίρεση του τηγμένου υλικού επιτυγχάνεται με την βοήθεια του βοηθητικού αερίου ([1], [29]). Η δεύτερη περίπτωση περιλαμβάνει την κίνηση της δέσμης στην περιφέρεια της οπής και κατά συνέπεια την κοπή του υλικού για τον σχηματισμό της οπής ([29], [30]). Σε αυτή την περίπτωση, η διάμετρος της οπής πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την διάμετρο της δέσμης και επίσης αρκετά μεγαλύτερη από το πάχος του υλικού, προκειμένου να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του υλικού η οποία θα οδηγήσει στην μη επιτυχή κοπή της οπής. Επίσης, με αυτή την τεχνική δημιουργούνται μόνο διαμπερείς οπές. Στην τρίτη περίπτωση η κίνηση της δέσμης είναι ελικοειδής, δηλαδή καθώς κινείται στην περιφέρεια της οπής ταυτόχρονα κινείται και κάθετα ως προς το επίπεδο κατεργασίας ([30]).

Σχήμα 1-2: Διάφορες τεχνικές διάτρησης (α) κρουστική διάτρηση, (β) διάτρηση μέσω κοπής και (γ) ελικοειδής διάτρηση.

Η διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser* παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας ([1]):

- Εξαιτίας της θερμικής φύσης της διεργασίας, μπορούν να δημιουργηθούν οπές σε υλικά τα οποία είναι δύσκολα να κατεργαστούν με συμβατικές μεθόδους, όπως π.χ. τα κεραμικά και σύνθετα υλικά αλλά και σληρυνμένα μέταλλα.
- Ανάλογα με τον φακό εστίασης που χρησιμοποιείται, μπορούν να επιτευχθούν υψηλότερες ακρίβειες και μικρότερες διαστάσεις οπών.
- Είναι δυνατή η διάτρηση επικλινών οπών με κλίσεις έως και 80 μοίρες, κάτι το οποίο είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί με συμβατικές μεθόδους εξαιτίας της εκτροπής του εργαλείου από τον άξονα διάτρησης.

Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα, η διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser* έχει και κάποιους περιορισμούς:

- Είναι πολύ δύσκολο να δημιουργηθούν οπές μεταβλητής διαμέτρου.
- Για οπές μεγάλου βάθους, η απόκλιση της δέσμης *Laser* μπορεί να προκαλέσει την δημιουργία μη αποδεκτών οπών.
- Εξαιτίας της επιρροής διαφόρων αστάθμητων παραγόντων, ο έλεγχος του βάθους στην περίπτωση «τυφλών» οπών αλλά και γενικώς των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οπής είναι πάρα πολύ δύσκολος.

Κατά την κρουστική διάτρηση με παλμούς δέσμης *Laser* χρησιμοποιείται πληθώρα παλμών για την διαμόρφωση της οπής. Με αυτή την τεχνική μπορούν να δημιουργηθούν οπές με λόγο διαμέτρου-προς-βάθος έως και 1:100 για διαμπερείς οπές και 1:20 για «τυφλές» οπές. Η διάτρηση με παλμούς δέσμης *Laser* προσφέρει την δυνατότητα ρύθμισης της διάρκειας του παλμού και της συχνότητας των παλμών, γεγονός που μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην αποφυγή απορρόφησης της δέσμης και διαστρέβλωσης της από τον πλάσμα (νέφος ιονισμένων ιόντων) ή το τηγμένο υλικό ([29]).

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η δημιουργία μεγάλου αριθμού οπών οι οποίες είναι πολύ κοντά τοποθετημένες. Τυπικές εφαρμογές της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser* περιλαμβάνουν την δημιουργία οπών σε ιατρικά όργανα, σε ακροφύσια έγχυσης καυσίμων και σε φίλτρα και την δημιουργία καναλιών ψύξης και λίπανσης σε τμήματα κινητήρων.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	Αεροναυπηγική	Ηλεκτρονικά

	Ιατρική	Εργαλειομηχανές

	Αυτοκινητοβιομηχανία

Σχήμα 1-3: Εφαρμογές διάτρησης με παλμούς δέσμης *Laser* σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς

Κατά την διεργασία διάτρησης με παλμούς δέσμης *Laser* η διάρκεια κάθε παλμού χωρίζεται σε δύο στάδια: το στάδιο θέρμανσης και στάδιο διάτρησης/ψύξης ([1], [28]). Στην πρώτη φάση (στάδιο θέρμανσης) η δέσμη προσπίπτει στο υλικό και υπάρχει ροή θερμότητας με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του έως και την θερμοκρασία αλλαγής φάσης του υλικού. Στην δεύτερη φάση (στάδιο ψύξης) δεν υπάρχει ροή θερμότητας στο υλικό λόγω της δέσμης, το τήγμα απομακρύνεται και το υλικό ψύχεται λόγω των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής και ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον.

Σχήμα 1-4: Ένταση δέσμης *Laser* (α) συνεχούς κύματος και (β) παλμικού τύπου.

1.3 ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι διεργασίες με δέσμη *Laser* (δυνατότητα επεξεργασίας ποικιλίας υλικών, απουσία δονήσεων, φθοράς εργαλείου και μηχανικών παραμορφώσεων, εκτέλεση πληθώρας διεργασιών χωρίς την ανάγκη ιδιαίτερων αλλαγών στο σύστημα κατεργασίας), το αποτέλεσμα της διεργασίας μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από μια πληθώρα παραγόντων, όπως ακαθαρσίες στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού, ατέλειες στην δομή του υλικού, μη αποτελεσματική συγκράτηση του κομματιού, ανεπιθύμητη μεταβολή των παραμέτρων της διεργασίας, κτλ. Χαρακτηριστικά είναι τα παραδείγματα των βασικότερων διεργασιών με δέσμη *Laser*, της διάτρησης, της συγκόλλησης και της κοπής.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ορισμένες από τις πιο σημαντικές εφαρμογές της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser* είναι η διάνοιξη ψυκτικών καναλιών σε τμήματα κινητήρων αεροσκαφών, σε φίλτρα καθώς και σε εγχυτήρες καυσίμων. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις οι διαστάσεις της οπής πρέπει να βρίσκονται **εντός συγκεκριμένων προδιαγραφών** και συνήθως εντός πολύ «αυστηρών» **πεδίων ανοχών**, καθώς η γεωμετρία της οπής επηρεάζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα του προϊόντος, π.χ. την ροή του αερίου ή υγρού ([31]-[33]). Επίσης, κατά την διεργασία της διάτρησης με δέσμη *Laser*, εκτός από την απόκλιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών από τις

επιθυμητές τιμές, διάφορες μορφές ατελειών μπορούν να εμφανιστούν οι οποίες περιλαμβάνουν την εναπόθεση τηγμένου υλικού γύρω από την περιοχή της οπής καθώς και στο κάτω μέρος της, την δημιουργία εσωτερικών κοιλοτήτων και την κωνικότητα της οπής.

Σχήμα 1-5: Χαρακτηριστικά και ατέλειες της διεργασίας διάτρησης με δέσμη Laser.

Στην περίπτωση της συγκόλλησης το αποτέλεσμα της διεργασίας μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες δημιουργώντας ανεπιθύμητες ατέλειες στην περιοχή της συγκόλλησης.

Σχήμα 1-6: Χαρακτηριστικά και ατέλειες της διεργασίας συγκόλλησης με δέσμη Laser.

Οι ατέλειες αυτές περιλαμβάνουν την εμφάνιση πόρων, απώλεια συγκόλλησης σε όλο το πάχος και την εμφάνιση ρωγμών. Όλα τα παραπάνω διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αντοχή και την δομική ακεραιότητα καθώς και την διάρκεια ζωής της συγκόλλησης.

Κατά την διεργασία κοπής με δέσμη *Laser*, η ποιότητα της κοπής μπορεί να καθοριστεί και να ποσοτικοποιηθεί με βάση διάφορα χαρακτηριστικά, όπως είναι η εναπόθεση τηγμένου υλικού (*dross attachment*), το μέγεθος της ζώνης θερμικής επιρροής (*Heat Affected Zone-HAZ*), τραχύτητα της επιφάνειας κοπής (*cutting edge surface roughness*), το μέγεθος (*kerf width*) και η κωνικότητα της τομής (*tapering*) ([34]).

Σχήμα 1-7: Χαρακτηριστικά και ατέλειες της διεργασίας κοπής με δέσμη *Laser*.

Είναι εύκολα κατανοητό λοιπόν, ότι σε εφαρμογές όπως η κατασκευή εξαρτημάτων αυτοκινήτων, αεροσκαφών, πλοίων κτλ., η ποιότητα του προϊόντος της διεργασίας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο εξαιτίας της μεγάλης απαίτησης για ακρίβεια, αντοχή, μείωση των ατελειών, κτλ. Για αυτό τον λόγο ο έλεγχος της διεργασίας είναι πολύ σημαντικός προκειμένου να εξασφαλιστεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, τόσο από άποψη ποιότητας όσο και αποδοτικότητας, ειδικά όταν η διεργασία χρησιμοποιείται για μαζική παραγωγή.

Έλεγχος μιας διεργασίας με δέσμη *Laser* μπορεί να επιτευχθεί διατηρώντας τις παραμέτρους της διεργασίας εντός συγκεκριμένων προδιαγραφών, αφού πρώτα έχει διασφαλιστεί το αποτέλεσμα της επίδρασης της δέσμης στο υλικό καθώς και η επαναληψιμότητα του αποτελέσματος, κάτι το οποίο είναι πολύ δύσκολο δεδομένου του δυναμικού χαρακτήρα της διεργασίας και της πληθώρας των παραμέτρων που επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Ένας άλλος τρόπος είναι η μέτρηση, ο χαρακτηρισμός και η συσχέτιση διαφόρων μεγεθών με την ίδια την διεργασία. Επίσης, η δυνατότητα εντοπισμού ατελειών που δημιουργούνται κατά την διάρκεια της διεργασίας και η έγκυρη μεταβολή των παραμέτρων της, παίζουν σημαντικό ρόλο προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Αυτή η ανάγκη για αποτελεσματικό και άμεσο έλεγχο των διεργασιών έχει ωθήσει στην ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης του συστήματος κατεργασίας αλλά και της

διεργασίας την χρονική στιγμή που λαμβάνει χώρα η διεργασία (*on-line monitoring*). Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν διάφορους αισθητήρες, ικανούς να μετρήσουν ανάλογες μεταβολές των παραμέτρων της διεργασίας αλλά και μεταβολές των σημάτων που λαμβάνονται κατά την διάρκεια της διεργασίας. Τα σήματα αυτά σχετίζονται με τους φυσικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια της διεργασίας και κατά συνέπεια με το αποτέλεσμα της, π.χ. βάθος κοπής, βάθος και διάμετρος διάτρησης, ατέλειες (π.χ. εμφάνιση πόρων, εναπόθεση τηγμένου υλικού), κτλ.

1.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Όπως προαναφέρθηκε η διασφάλιση των επιθυμητών χαρακτηριστικών του προϊόντος της διεργασίας την χρονική στιγμή που αυτή πραγματοποιείται είναι πολύ σημαντική. Η διαδικασία παρακολούθησης μιας διεργασίας και κατά συνέπεια και ο έλεγχος της μπορεί να γίνει σε τρία στάδια ανάλογα με την χρονική στιγμή που πραγματοποιείται ([35]):

- Πριν την κατεργασία (*pre-process*)
- Κατά την διάρκεια της κατεργασίας (*in-process*)
- Μετά την κατεργασία (*post-process*)

Σχήμα 1-8: Ταξινόμηση περιοχών και χρόνων παρακολούθησης ανάλογα με το σημείο και την χρονική στιγμή ([35]).

Η παρακολούθηση της διεργασίας την χρονική στιγμή που αυτή συμβαίνει είναι πολύ σημαντική λόγω του γεγονότος ότι προσφέρει την δυνατότητα ελέγχου της διεργασίας χωρίς να χρειάζεται να σταματήσει η διαδικασία, γεγονός πολύ σημαντικό για την βιομηχανική παραγωγή.

Έτσι, το αντικείμενο της παρούσης διατριβής είναι η ανάπτυξη μιας μεθόδου παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser* αξιοποιώντας τις διάφορες μορφές ενέργειας που προέρχονται από την περιοχή κατεργασίας και είναι αποτέλεσμα της εξέλιξης της διεργασίας. Η προτεινόμενη μεθοδολογία περιλαμβάνει την διερεύνηση της συσχέτισης τόσο των εκπομπών ακτινοβολίας όσο και των ακουστικών εκπομπών με τα διάφορα χαρακτηριστικά, ποσοτικά αλλά και ποιοτικά, της οπής που δημιουργείται. Παράλληλα, η ανάπτυξη εμπειρικών προτύπων θα συντελέσει στον προσδιορισμό της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας στο αποτέλεσμα και στον καλύτερο προγραμματισμό και έλεγχο της διεργασίας.

Σχήμα 1-9: Σχηματικό διάγραμμα προτεινόμενης μεθόδου διερεύνησης της χρήσης οπτικών και ακουστικών εκπομπών για την παρακολούθηση της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser* σε πραγματικό χρόνο.

1.5 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται την πειραματική και θεωρητική συσχέτιση των εκπομπών ακτινοβολίας και των ακουστικών εκπομπών με την διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser*, προτείνοντας μαθηματικά μοντέλα προσδιορισμού των διαφόρων χαρακτηριστικών της διεργασίας. Η διατριβή εστιάζεται στην ανάπτυξη μεθόδου παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο τόσο των ποσοτικών όσο και των ποιοτικών χαρακτηριστικών της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser*.

Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε σε βάθος μελέτη της διεργασίας διάτρησης και των εκπεμπόμενων σημάτων από την περιοχή κατεργασίας. Δημιουργήθηκαν μαθηματικά μοντέλα σύνδεσης της απόκρισης των αισθητήρων με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής που δημιουργείται και για την επιβεβαίωση των θεωρητικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση της διεργασίας η οποία απέδειξε την ισχύ της μεθοδολογίας. Παράλληλα τα πειραματικά αποτελέσματα αξιοποιήθηκαν για τον μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας στο αποτέλεσμα και την δημιουργία εμπειρικών προτύπων για κάθε γεωμετρικό χαρακτηριστικό που μελετήθηκε.

Τα κυριότερα πρωτότυπα στοιχεία της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Ανάπτυξη μεθόδου παρακολούθησης της διεργασίας σε πραγματικό χρόνο (*real-time*) αξιοποιώντας τα ακουστικά και οπτικά σήματα προερχόμενα από την περιοχή κατεργασίας, μέσω φωτοδιόδων και μικροφώνου. Χαμηλό κόστος, ευελιξία και ευκολία χρήσης είναι βασικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου συστήματος και της μεθόδου παρακολούθησης.
- Θεωρητική και πειραματική διερεύνηση συσχέτισης των εκπομπών ακτινοβολίας και των ακουστικών εκπομπών με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής («τυφλές», διαμπερείς οπές) καθώς και με ποιοτικά χαρακτηριστικά (διαμπερείς οπές).
- Πειραματική διερεύνηση και προσδιορισμός της επίδρασης των κυριότερων παραμέτρων της διεργασίας στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής, για «τυφλές» (βάθος, διάμετρος εισόδου) αλλά και διαμπερείς οπές (διάμετρος εισόδου, διάμετρος εξόδου).
- Δημιουργία εμπειρικών προτύπων συσχέτισης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οπής με τις παραμέτρους της διεργασίας, μέσω ανάλυσης επαναληπτικής σύγκλισης, και χρήση τους για τον προγραμματισμό της διεργασίας (*off-line programming*).

1.6 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η δομή της διατριβής έχει ως εξής:

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στην διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser*, στις διάφορες τεχνικές που υπάρχουν, στα πλεονεκτήματα αλλά και στους

περιορισμούς της διεργασίας καθώς και στις βιομηχανικές εφαρμογές της. Στην συνέχεια γίνεται μια σύντομη περιγραφή του τεχνολογικού προβλήματος και τέλος γίνεται αναφορά στο αντικείμενο το οποίο πραγματεύεται η συγκεκριμένη διατριβή και στην μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τέλος παρατίθενται τα σημαντικότερα πρωτότυπα στοιχεία της.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας τόσο σε θέματα μοντελοποίησης και διερεύνησης της ίδιας της διεργασίας όσο και σε θέματα παρακολούθησης της και γίνεται εκτενή αναφορά στις μεθόδους και τα συστήματα που έχουν αναπτυχθεί για αυτό τον σκοπό.

Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται λεπτομερής αναφορά σχετικά με την πειραματική διερεύνηση της διεργασίας. Πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας τόσο για την περίπτωση «τυφλών» όσο και διαμπερών οπών και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται μια εισαγωγή τις αρχές και τις μεθόδους μοντελοποίησης και πραγματοποιείται η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και η εμπειρική μοντελοποίηση. Γίνεται εκτενείς αναφορά στην ανάλυση επαναληπτικής σύγκλισης και παρουσιάζονται με λεπτομέρεια τα εμπειρικά πρότυπα για κάθε γεωμετρικό χαρακτηριστικό της οπής, τόσο για την περίπτωση «τυφλών», όσο και διαμπερών οπών.

Στο **Κεφάλαιο 5**, αρχικά πραγματοποιείται ο καθορισμός των απαιτήσεων του συστήματος παρακολούθησης της συγκεκριμένης διεργασίας, ο οποίος περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των απαιτήσεων τόσο για τους αισθητήρες, την διάταξη τους αλλά και για την καταγραφή και επεξεργασία των σημάτων. Στην συνέχεια λαμβάνει χώρα η υλοποίηση του συστήματος παρακολούθησης και ακολουθεί η θεωρητική ανάλυση συσχέτισης των ακουστικών και οπτικών σημάτων με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συσχέτισης των χαρακτηριστικών των σημάτων με τα χαρακτηριστικά της διεργασίας και γίνεται σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Στο **Κεφάλαιο 6**, γίνεται εισαγωγή στην γενική ιδέα ελέγχου των διεργασιών μέσω σημάτων που συλλέγονται κατά την διάρκεια της διεργασίας και στην συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου για την διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser* αξιοποιώντας τα οπτικά και ακουστικά σήματα και την συσχέτιση τους με τα διάφορα χαρακτηριστικά της διεργασίας. Τέλος, παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογής της μεθοδολογίας.

Στο **Κεφάλαιο 7**, συγκεντρώνεται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της διατριβής και περιγράφονται εν συντομία οι πρωτοτυπίες της διατριβής και παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και εξέλιξη της υπό διερεύνηση διεργασίας.

Τέλος, στα **Παραρτήματα Α, Β, Γ και Δ** παρουσιάζονται η ονοματολογία των συμβόλων που χρησιμοποιούνται στην διατριβή, ο κατάλογος των σχημάτων και ο κατάλογος των πινάκων, καθώς και οι βάσεις δεδομένων για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οπών, με την μορφή πινάκων.

1.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Chryssolouris G., (1991), "Laser Machining: Theory and Practice", Springer-Verlag.
- [2] Kempfer L., (1995), "Laser Design Time Cut 50%", Computer Aided Engineering, 14/8, pp. 1-8.
- [3] Chryssolouris G., J. Brecht, S. Kordas, E. Wilson, (1988), "Theoretical Aspects of a Laser Machine Tool", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 110, pp. 65-70.
- [4] Hutfless J., M. Glasmacher, H.-J Precher, M. Geiger, (1995), "Laser Beam Microprocessing of Three-Dimensional Circuit Boards". Proceedings, ISEM XI, April 1995, EPFL, Lausanne, Switzerland, pp. 721-732.
- [5] Kikuchi K., R. Maeda, Y. Kawaguchi, (1995), "Micromachining with Laser Beam of Glasses and Diamond-Like Carbon". Proceedings, ISEM XI, April 1995, EPFL, Lausanne, Switzerland, pp. 757-764.
- [6] Hecht J., 1994, "Star Wars Laser Gives Surgeons a Cleaner Cut", New Scientist, Vol. 144, pp. 24.
- [7] Ziegert J. C., C.D. Mize, (1994), "The Laser Ball Bar—A new Instrument for Machine Tool Metrology", Precision Engineering, Journal of the ASPE, Vol. 16/4, pp. 259-267.
- [8] Katsuki A., H. Onikura, T. Sajima, S. Machida, K. Oda, (1994), "Development of a Deep-Hole, Laser Boring Tool—The Boring of Workpieces With a Thin Wall and an Inclined Prebored Hole", Precision Engineering, Journal of the ASPE, Vol. 16/4, pp. 296-301.
- [9] Poprawe R., R. Klein, L. Abram, (1995), "Laser Technology in Processing of Coated Sheets", Stahl und Eisen, Vol. 115/7, pp. 31-37.
- [10] Haferkamp H., D. Seebaum, (1994), "Material Removal on Tool-steel Using High Power CO₂-Lasers". Proceedings of the LANE'94, Vol. I, pp. 411-426.
- [11] Firestone R. F., E. J. Vesely, (1988), "High Power Laser Beam Machining of Structural Ceramics", ASME Symposium of Advanced Ceramic Materials, pp. 215-227.
- [12] Hügel H., T. Rundlaff, M. Wiedmaier, (1994), "Laser Processing Integrated in Machine Tools-Design, Applications, Economy". Proceedings of the LANE'94, Vol. I, pp. 439-453.
- [13] Leidinger D., A. Penz, D. Schuöcker, (1995), "Improved Manufacturing Processes With High Power Lasers", Infrared Physics Technology, Vol. 36/1, pp. 251-266.
- [14] Von Allmen M., (1978), "Absorption Phenomena in Metal drilling with Nd-Lasers", IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-Vol. 14/2, pp. 85-88.

-
- [15] Siekman J. G., (1979), "Analysis of Laser Drilling and Cutting Results on Al₂O₃ and Ferrites", *Journal of the American Ceramics Society*, pp. 225-231.
 - [16] Modest M. F., H. Abakians, (1986), "Evaporative Cutting of a Semi-Infinite Body With a Moving CW Laser", *Journal of Heat Transfer*, pp. 602-607.
 - [17] Babenko V. P., V. P. Tychinskii, (1973), "Gas-Jet Laser Cutting", *Soviet Journal of Quantum Electronics*, Vol. 2/5, pp. 399-410.
 - [18] Schulz W., G. Simon, H. M. Urbassek, I. Decker, (1989), "On Laser Fusion Cutting of Metals", *Journal Physics D: Applied Physics*, Vol. 20, pp. 481-488.
 - [19] Chryssolouris, G., W. C. Choi, (1989), "Gas Jet Effects on Laser Cutting". *Proceedings of the SPIE Conference on CO₂ Lasers and Applications*, Los Angeles, California (Jan. 15-20, 1989).
 - [20] Messler W. R., D. L. Millard, (1994), "Laser Soldering—New Light on an Old Joining Process", *Welding Journal*, Vol. 73/10, pp. 43-48.
 - [21] Tosto S., F. Nenci, J. Hu, (1994), "Microstructure and Tensile Properties of AISI 316 Stainless Steel Electron-Beam Cladding on C40 Mild Steel", *Journal of Materials Science*, Vol. 29/22, pp.5852-5858.
 - [22] Vollertsen, F., (1994), "Model for the Temperature Gradient Mechanism of Laser Bending". *Proceedings of the LANE'94*, Vol. I, pp. 345-360.
 - [23] Geiger M., H. Arnet, F. Vollertsen, (1994), "Laser Forming", *Proceedings of the LANE'94*, Vol. I, pp. 81-92.
 - [24] Heuvelman C. J., W. Köning, H. K. Tönshoff, J. Meijer, P. K. Kimer, M. Rund, M. F. Schneider, I. van Sprang, (1992), "Surface Treatment Techniques by Laser Beam Machining". *CIRP Annals*, 41/2, pp. 657-666.
 - [25] Bello J. M., B. J. Fernander, V. Lopez, J. Ruiz, (1994), "Fatigue Performance and Residual Stresses in Laser Treated 50CrV4 Steel", *Journal of Materials Science*, Vol. 29/19, pp.5213-5218
 - [26] Koutsomichalis A., L. Saettas, H. Badekos, (1994), "Laser Treatment of Magnesium", *Journal of Materials Science*, Vol. 29/24, pp.6543-6547.
 - [27] Chryssolouris G., N. Anifantis, S. Karagiannis, (1997), "Laser Assisted Machining: An Overview", *Transaction of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119 (75th Anniversary Issue, November 1997), pp. 766-769.
 - [28] Salonitis, K., A. Stournaras, G. Tsoukantas, P. Stavropoulos and G. Chryssolouris, (2007), "A Theoretical and Experimental Investigation on Limitations of Pulsed Laser Drilling", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183 /1, pp. 96-103.
 - [29] LIA "Handbook of Laser materials processing", Editor in chief: J.F. Ready, 2001, Magnolia Publishing, Inc.
-

- [30] Corcoran, A., L. Sexton, B. Seaman, P. Ryan, G. Byrne, (2002), "The Laser drilling of multi-layer aerospace material systems", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 123, pp. 100-106.
- [31] Fohl, C., D. Breitling, F. Dausinger, (2002), "Precise drilling of steel with ultrashort pulsed solid-state Lasers", *Conference on Lasers, Applications and Technologies (LAT2002)*, June 22-28, Moscow, Russia.
- [32] "The Laser as a tool", TRUMPF Handbook, Chapter 4: "A world of possibilities – The processes", 2008.
- [33] Hand D., P., C. Peters, F. Haran, J. D.C. Jones, (1997), "A fibre-optic-based sensor for optimization and evaluation of the laser percussion drilling process", *Material Science Technology*, Vol. 8, pp. 587-592.
- [34] Pietro P.Di., Y.L. Yao, (1994), "An investigation in characterizing and optimizing Laser cutting quality", *International Journal of Machine Tools Manufacture*, Vol. 34/2, pp. 225-243.
- [35] Kogel-Hollacher M., C. Dietz, T. Nicolay, J. Schmid, M. Schmidt, J. Bahnmüller, B. Kessler, B. Schürmann, M. G. Müller, (2001), "Process monitoring or process control in Laser materials processing", *International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO)*.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με την διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser* καθώς και η βιβλιογραφική ανασκόπηση που σχετίζεται με την παρακολούθηση των διεργασιών με δέσμη *Laser* εξετάζοντας τα χαρακτηριστικά παραδείγματα των διάφορων μεθόδων παρακολούθησης που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα σε ερευνητικό αλλά και βιομηχανικό επίπεδο.

2.2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΔΕΣΜΗ *LASER*

Μια από τις πρώτες μελέτες σχετικά με την μοντελοποίηση της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser* παρουσιάστηκε από τον *Chryssoulouris* ([1]) όπου με βάση την ενεργειακή ισορροπία στην περιοχή κατεργασίας (*erosion front*) υπολογίζεται η κατανομή θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υλικού και στην συνέχεια το βάθος διάτρησης.

Σχήμα 2-1: Στάδια θέρμανσης και διάτρησης/ψύξης ([1]).

Θεωρήθηκε ότι η διεργασία διάτρησης διαχωρίζεται σε δύο στάδια, το στάδιο θέρμανσης όπου η θερμοκρασία του υλικού αυξάνει έως το σημείο τήξης και το στάδιο διάτρησης όπου λαμβάνει χώρα η αφαίρεση του τηγμένου υλικού.

Επίσης, ένα μονοδιάστατο αναλυτικό μοντέλο για την διερεύνηση του μέγιστου βάθους διάτρησης με παλμούς δέσμης *Laser* παρουσιάστηκε από τους *Salonitis et al.* ([2]), το

οποίο λαμβάνει υπόψη τον απαιτούμενο χρόνο για την τήξη του υλικού, τον μηχανισμό τήξης καθώς και αφαίρεσης του υλικού όπως επίσης και την κρίσιμη τιμή πυκνότητας ισχύος ικανή να προκαλέσει τήξη του υλικού.

Σχήμα 2-2: (α) Ενεργειακή ισορροπία στην περιοχή τήξης κατά την διάτρηση με παλμούς δέσμης Laser, (β) απαιτούμενη παλμοί για την έναρξη τήξης του υλικού συναρτήσει της πυκνότητας ισχύος και (γ) θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα για το βάθος διάτρησης συναρτήσει της πυκνότητας ισχύος ([2]).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το βάθος διάτρησης δεν επηρεάζεται σημαντικά από την συχνότητα των παλμών αλλά εξαρτάται κυρίως από την ισχύ της δέσμης. Οι *Modest et al.* ([3]) ανέπτυξαν ένα μοντέλο με βάση την κατανομή θερμοκρασίας και την γεωμετρία της οπής για αποτίμηση των τάσεων που αναπτύσσονται κατά την διαδικασία διάτρησης με δέσμη Laser στην ελαστική και βισκοελαστική περιοχή και είναι κυρίως υπεύθυνες για την δημιουργία ρωγμών και μείωση της αντοχής του υλικού. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι κατά την διεργασία διάτρησης κεραμικών υλικών τάσεις αναπτύσσονται πάνω σε ένα λεπτό επίπεδο κάτω από την επιφάνεια του υλικού, καθώς και ότι οι βισκοελαστικές επιδράσεις περιορίζονται σε ένα υπερβολικά λεπτό επίπεδο πολύ κοντά στο μέτωπο αποκόλλησης, όπου το υλικό μαλακώνει και εξασθενούν οι δεσμοί. Ένα δισδιάστατο αναλυτικό θερμικό μοντέλο για την προσομοίωση της διεργασίας παρουσιάστηκε από τους *Ganesh et al.* ([4], [5]) το οποίο λάμβανε υπόψη την πίεση και την θερμοκρασία πάνω στην τηγμένη επιφάνεια μέσω

ενός ένα μονοδιάστατου δυναμικού μοντέλου αερίου. Επίσης, στην μελέτη ([6]), παρουσιάστηκε ένα τρισδιάστατο αναλυτικό μοντέλο το οποίο υπολογίζει τον ρυθμό αποκόλλησης όταν ένας παλμός της δέσμης *Laser* προσπίπτει σε μια πλάκα υλικού πεπερασμένου πάχους. Στην μελέτη ([7]) παρουσιάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο προβλέπει τις ιδιότητες του πλάσματος, όπως είναι η θερμοκρασία, ο συντελεστής απορροφητικότητας και ο διαμερισμός της ενέργειας της δέσμης *Laser* ανάμεσα στο πλάσμα και το κατεργαζόμενο υλικό από τους *Sankaranarayanan et al.* Το συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνει υπόψη του την επίδραση του πλάσματος στην επιφανειακή θερμοκρασία του τηγμένου υλικού και στον ρυθμό εξάτμισης του. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι περισσότερο από 80% της προσπίπτουσας ενέργειας απορροφάται στις ζώνες αλληλεπίδρασης πλάσματος- δέσμης *Laser* πάνω από την περιοχή κατεργασίας καθώς και ότι οι παράμετροι της διεργασίας, όπως είναι η ενέργεια της δέσμης *Laser*, η διάμετρος του στίγματος της δέσμης και οι ιδιότητες του υλικού και το βοηθητικό αέριο επηρεάζουν τις ιδιότητες του πλάσματος που δημιουργείται. Ένα θερμικό μοντέλο για την μοντελοποίηση των φαινομένων τήξης και εξάτμισης κατά την διεργασία της διάτρησης αναπτύχθηκε από τους *Zhang et al.* ([8]), στο οποίο οι διεπιφάνειες στερεού-υγρού και υγρού-αερίου προσεγγίζονται μέσω των εξισώσεων διατήρησης της ενέργειας και η μεταβολή της θερμοκρασίας κορεσμού με την πίεση λαμβάνεται υπόψη χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις *Clausius-Clapeyron*.

Σχήμα 2-3: Σχηματική απεικόνιση μοντέλου διάτρησης με δέσμη *Laser* ([8]).

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης έδειξαν ότι οι απώλειες θερμότητας λόγω μεταφοράς είναι πολύ μικρές και η επιρροή τους στην διαδικασία εξάτμισης είναι ασήμαντη. Επίσης, διαπίστωσαν ότι η απώλεια θερμότητας είναι σημαντική για το πάχος του τήγματος, το οποίο επαναστερεοποιείται μετά την διάτρηση καθώς και ότι η ψύξη του υλικού βοηθά στην μείωση του πάχους του επανατηκόμενου στρώματος. Επίσης οι *Solana et al.*, στην εργασία ([9]) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για την διάτρηση με δέσμη *Laser* λαμβάνοντας υπόψη τους μηχανισμούς αποκόλλησης, εκτίναξης τήγματος

και μετάδοσης θερμότητας. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο μηχανισμός εκτίναξης του τήγματος από την οπή ευθύνεται για το 40% της συνολικής ποσότητας του υλικού που αφαιρείται για την περίπτωση διάτρησης αλουμινίου ενώ για το 70% στην περίπτωση τιτανίου. Οι *Tokarev et al.* ([10]) παρουσίασαν ένα αναλυτικό μοντέλο, για την διάτρηση πολυμερών με παλμούς δέσμης *Laser*, με βάση τους μηχανισμούς απορρόφησης της ακτινοβολίας και της διάδοσης της στο εσωτερικό της «κλειδαρότρυπας» (*keyhole*) και τα αποτελέσματα ήταν σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.

Οι *Solana et al.* ([11]), παρουσίασαν ένα μονοδιάστατο μαθηματικό μοντέλο για την διάτρηση με δέσμη *Laser* συνεχούς και παλμικού τύπου, το οποίο λαμβάνει υπόψη του την εξάτμιση του υλικού και την απορρόφηση μέρους της ενέργειας της δέσμης από το εξατμιζόμενο υλικό. Θεωρήθηκε ότι υπάρχουν δύο στάδια κατά την διάτρηση, πριν αρχίσει η εξάτμιση του υλικού και αυτό μετά την εξάτμιση του υλικού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι θεωρητικές προβλέψεις είναι σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα για την ταχύτητα διάτρησης σε χαλκό καθώς και όσον αφορά την γεωμετρία της οπής για την περίπτωση διάτρησης τιτανίου. Επίσης, οι *Semak et al.* ([12]), ανέπτυξαν ένα μοντέλο με βάση την εξάτμιση του υλικού λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις της γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης, του συντελεστή απορρόφησης του υλικού και της ενεργειακής πυκνότητας της δέσμης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ιδιαίτερης σημαντικότητας στην αποδοτικότητα της διάτρησης είναι η επίδραση της κατανομής της απορροφούμενης ενέργειας.

Οι *Cheng et al.* ([13]), παρουσίασαν ένα τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών για την διάτρηση ανθρακονημάτων (ανισοτροπικό υλικό), επιτρέποντας την πρόβλεψη του σχήματος και του μεγέθους της οπής με βάση το θερμοκρασιακό πεδίο.

Σχήμα 2-4: Εκτιμώμενο θερμοκρασιακό πεδίο και γεωμετρία της οπής για (α)αλουμίνιο και (β) χαλκό ([13]).

Στην εργασία ([14]) παρουσιάζεται μια ημιστατική ανάλυση για την ροή του τήγματος λαμβάνοντας υπόψη τους μηχανισμούς εξάτμισης και εκτίναξης του τήγματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μέγεθος της δέσμης *Laser* παίζει σημαντικό ρόλο στο πάχος της περιοχής τηγμένου υλικού, το βάθος διείσδυσης και στον μηχανισμό αφαίρεσης του υλικού. Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα της δέσμης οδηγεί σε λεπτότερες περιοχές τήγματος και μεγαλύτερες ταχύτητες διείσδυσης. Επίσης, η αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας του υλικού που εξατμίζεται και στην αύξηση των πιέσεων στην περιοχή του τήγματος. Επίσης, οι *Voisey et al.* ([15]) διερεύνησαν τον μηχανισμό εκτίναξης του τηγμένου υλικού από την οπή για πληθώρα μεταλλικών υλικών και μελέτησαν το μέγεθος, την κλίση της τροχιάς, την ταχύτητα εκτίναξης των σταγονιδίων του τήγματος καθώς και το πάχος του στρώματος του τήγματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αύξηση της ενέργειας του παλμού έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας του εκτινασσόμενου τήγματος και την μείωση του μεγέθους των σταγονιδίων.

Αρκετές διερευνήσεις έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με την εναπόθεση τήγματος (*spatter*) γύρω από την περιοχή της οπής. Στις μελέτες ([16]-[19]), οι *Low et al.* εξέτασαν την επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας στην εναπόθεση τήγματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μικρά πλάτη παλμών, χαμηλή ενέργεια της δέσμης και υψηλή συχνότητα παλμού οδηγούν σε μικρές περιοχές εναπόθεσης ιζήματος. Επίσης επισήμαναν ότι η ποσότητα εναπόθεσης τήγματος, είναι μικρότερη για μεγάλο εστιακό μήκος καθώς και ότι για θέσεις του επιπέδου εστίασης από -0.5 έως και +1.5mm σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου η εναπόθεση τήγματος είναι μεγάλη. Επίσης στην μελέτη ([20]) διερεύνησαν την επίδραση του βοηθητικού αερίου (οξυγόνο O_2 , άζωτο N_2 , αργό Ar ή ατμοσφαιρικός αέρας) στα φυσικά χαρακτηριστικά του τήγματος στην περιφέρεια της οπής. Η αντοχή του τήγματος εμφανίζεται να εξαρτάται από τον τύπο του βοηθητικού αερίου και από την σύνθεση του κατεργαζόμενου υλικού.

Σχήμα 2-5: Φωτογραφίες όπών οι οποίες δημιουργήθηκαν με οξυγόνο (αριστερά) και αργό (δεξιά) ως βοηθητικό αέριο([20]).

Μια τεχνική για την μείωση του τήγματος γύρω από την περιοχή της οπής παρουσιάστηκε από τους *Sharp et al.* ([21]) όπου δείχθηκε ότι η επικάλυψη του κατεργαζόμενου κομματιού με ένα απολυμαντικό υγρό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του τήγματος γύρω από την περιοχή της οπής.

Μια από τις πρώτες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας, όπως η ενέργεια, η θέση του επιπέδου εστίασης, η πίεση του αερίου και το πάχος του υλικού στην ποιότητα της οπής παρουσιάστηκε από τον *Yilbas* ([22]). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ποσότητα απόβλητων στην επιφάνεια του υλικού, η κωνικότητα εισόδου και η μέση διάμετρος της οπής επηρεάζονται σημαντικά από την ενέργεια. Επίσης, βρέθηκε ότι η θέση του επιπέδου εστίασης επηρεάζει την κωνικότητα εισόδου και εξόδου καθώς και ότι σημαντική είναι η επίδραση της πίεσης του αερίου στην δημιουργία αποβλήτων στην επιφάνεια, στην δημιουργία κοιλοτήτων στο εσωτερικό της οπής, την κωνικότητα εξόδου και την μέση διάμετρο. Τέλος, η κωνικότητα εισόδου και η δημιουργία κοιλοτήτων στο εσωτερικό της οπής επηρεάζονται από το πάχος του υλικού. Επιπρόσθετα, στην μελέτη ([23]), παρουσιάστηκε μια στατιστική ανάλυση για τον προσδιορισμό της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας στην ποιότητα της οπής για πληθώρα μεταλλικών υλικών. Η πειραματική διερεύνηση έδειξε ότι η διάρκεια του παλμού, η θέση του επιπέδου εστίασης, η ενέργεια και το πάχος του υλικού έχουν την πιο σημαντική επίδραση. Οι *Yilbas et al.* ([24]) μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων του παλμού της δέσμης *Laser* όπως είναι το μήκος και το σχήμα του, στο βάθος των οπών που δημιουργούνται για διάφορα υλικά ενώ στην μελέτη ([25]), οι *Luft et al.*, μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων του παλμού (μήκος και ενέργεια παλμού) στα θερμικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού. Επίσης, η διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας στην ταχύτητα διάτρησης για διάφορα υλικά πραγματοποιήθηκε από τον *Yilbas* ([26]) καθώς και από τους *Tam et al.* ([27]) και από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα δεν εξαρτάται μόνο από την ισχύ της δέσμης αλλά και από τις άλλες παραμέτρους διάτρησης αλλά και από τις ιδιότητες του υλικού. Οι τελευταίες καθορίζουν τους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας στο κατεργαζόμενο υλικό με αποτέλεσμα να επηρεάζουν τη ταχύτητα εξέλιξης της διεργασίας. Οι *Ng et al.* ([28], [29]), μελέτησαν επίσης της επίδραση της ισχύος της δέσμης καθώς και του χρονικού μήκους του παλμού στην επαναληψιμότητα της γεωμετρίας της οπής μετρώντας την ποσοστιαία τυπική απόκλιση των διαμέτρων εισόδου και εξόδου καθώς και την κυκλικότητα (*circularity*). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μεγαλύτερη ισχύ και μικρότερη διάρκεια παλμού αυξάνουν την επαναληψιμότητα της γεωμετρίας της οπής. Επίσης, οι *Lusquinos et al.* ([30]) μελέτησαν την επίδραση του είδους του βοηθητικού αερίου και της πίεσης του, του πλάτους του παλμού και της ισχύος της δέσμης *Laser*, στην γεωμετρία της οπής. Όπως φάνηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα, η εσωτερική διάμετρος της οπής (*inlet diameter*) αυξάνει με την αύξηση της μέσης ισχύος

ανεξαρτήτως από το πλάτος του παλμού, το αέριο ή την πίεση. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι ο τύπος και η πίεση του αερίου παίζουν σημαντικότερο ρόλο από την μέση ισχύ καθώς και ότι η χρήση οξυγόνου ως βοηθητικό αέριο έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία οπών με μικρότερη εσωτερική διάμετρο, ενώ η χρήση αζώτου επιτρέπει την πιο γρήγορη διάτρηση. Οι *Weichnhain et al.* ([31]) μελέτησαν την διάτρηση κεραμικών και πολυμερών υλικών με παλμούς δέσμης *Laser* διάρκειας της τάξεως των *psec* (*picoseconds*). Η μελέτη της γεωμετρίας των οπών γίνεται μέσω της διερεύνησης του ρυθμού απομάκρυνσης υλικού και της οριακής ροής απομάκρυνσης υλικού. Επίσης μελετήθηκε και η επίδραση που έχουν διάφορα μήκη κύματος στην διαδικασία απομάκρυνσης υλικού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η οριακή ροή απομάκρυνσης υλικού είναι της ίδιας έκτασης και είναι ανεξάρτητη από το μήκος κύματος της δέσμης *Laser*. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι για τα κεραμικά υλικά ότι η ζώνη θερμικής επιρροής (*Heat Affected Zone - HAZ*) μπορεί να μειωθεί με την μείωση της ενεργειακής έντασης της δέσμης. Οι *Yilbas et al.* ([32]) διερεύνησαν τον μηχανισμό αποβολής τήγματος καθώς και την ύπαρξη μηχανισμών πυρηνικού βρασμού κατά την διεργασία διάτρησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εκτίναξη τήγματος αρχίζει αμέσως μετά την εξάτμιση του υλικού καθώς και ότι η θερμοκρασία για την έναρξη του μηχανισμού πυρηνικού βρασμού πλησιάζει τους 4500 °C και επιτυγχάνεται περίπου 120μsec από την στιγμή που ενεργεί ο παλμός της δέσμης.

Όσον αφορά την μελέτη ([33]), οι *Nolte et al.* διερεύνησαν την επίδραση του φαινομένου πόλωσης (*polarization*) της δέσμης *Laser* στην γεωμετρία οπών. Πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι με περιστροφή της πόλωσης μέσω ειδικής τεχνικής περιστροφής των οπτικών καθοδήγησης της δέσμης (*polarization trepanning*) κατά τη διάρκεια της διάτρησης βελτιώνεται σημαντικά η ποιότητα των οπών όσον αφορά το κυκλικό σχήμα των οπών. Επίσης, οι *Corcoran et al.* στην μελέτη ([34]) διερεύνησαν την διάτρηση με δέσμη *Laser* σε υλικά με επικάλυψη για αεροναυτικές εφαρμογές και μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας σε χαρακτηριστικά όπως η κατάσταση στην διεπιφάνεια των υλικών, την συνοχή τους καθώς και στην δημιουργία ατελειών στην μικροδομή, όπως ρωγμές. Μια διερεύνηση σχετικά με τους μηχανισμούς δημιουργίας της κωνικότητας των διαμπερών οπών καθώς και σχετικά με τον έλεγχο της πραγματοποιήθηκε από τους *Li et al.* ([35]). Στατιστική ανάλυση και μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε για τον χαρακτηρισμό των σχέσεων μεταξύ των παραμέτρων και της κωνικότητας και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κωνικότητα εξαρτάται κυρίως από την θέση του επιπέδου εστίασης καθώς και από την διάρκεια του παλμού, την ισχύ και τον αριθμό των παλμών. Επιπρόσθετα, πρότειναν μια νέα μέθοδο διάτρησης με παλμούς που κατά τη διάρκεια της διεργασίας αυξάνεται γραμμικά η ισχύς της δέσμης τους έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή κωνικότητα της οπής.

Σχήμα 2-6: (α) Σχηματικό διάγραμμα αύξησης ισχύος κατά την διάτρηση και (β) οπές διαφορετικής κωνικότητας με εφαρμογή της προτεινομένης τεχνικής από τους Li et al. ([35]).

Επίσης, οι Ghoreisi et al. ([36], [37]), διερεύνησαν την συσχέτιση της ισχύος, της διάρκειας τους παλμού, της συχνότητας των παλμών, της πίεσης του αερίου και της θέσης του επιπέδου εστίασης στην κωνικότητα και κυκλικότητα των οπών. Δείχθηκε ότι η συχνότητα των παλμών επηρεάζει σημαντικά την διάμετρο εισόδου της οπής και την κυκλικότητα για την περίπτωση διάτρησης ανοξείδωτου χάλυβα ενώ για την διάτρηση μαλακού χάλυβα η συχνότητα των παλμών δεν παίζει σημαντικό ρόλο στα χαρακτηριστικά της οπής. Οι Bandyopadhyay et al. ([38], [39]), μελέτησαν την επίδραση του είδους και πάχους του υλικού καθώς και της συχνότητας και της ενέργειας των παλμών στην διάμετρο και κωνικότητα της οπής αλλά και σε μεταλλουργικά χαρακτηριστικά όπως το τήγμα γύρω από την οπή και την ζώνη θερμικής επιρροής. Οι Bradjic et al. ([40]) διερεύνησαν την ταχύτητα διάτρησης, την γεωμετρία των οπών και την επαναληψιμότητα της και τον χρόνο διάτρησης με σκοπό την βελτίωση της αποδοτικότητας και της ποιότητας της διεργασίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με υπέρθεση των παλμών μπορεί να μειωθεί σημαντικά ο χρόνος διάτρησης, η εκτίναξη του τήγματος είναι συνεχόμενη και οι ατέλειες στα τοιχώματα της οπής μειώνονται.

Επίσης, εμπειρικά μοντέλα νευρωνικών δικτύων έχουν εφαρμοστεί επίσης για την βελτιστοποίηση της διεργασίας διάτρησης με δέσμης Laser στις μελέτες ([41], [42]), από τους Nakhjavani et al. και M. Ghoreishi et al.

Σχήμα 2-7: Δομή νευρωνικού δικτύου για την συσχέτιση των παραμέτρων της διεργασίας με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οπών ([41]).

Διάφορες μελέτες για την διάτρηση με δέσμη Laser και των προσδιορισμό της επίδρασης των παραμέτρων έχουν πραγματοποιηθεί και για μη μεταλλικά υλικά, όπως τεφλόν ([43]), σχιστόλιθο ([44]), σύνθετα και κεραμικά υλικά ([45], [46]), θερμοπλαστικά πολυμερή ([47]) καθώς και γλυκερίνη ([48]) (σε κανονικές συνθήκες αλλά και σε συνθήκες μηδενικής βαρύτητας).

2.3 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER

Η ταυτόχρονη με την διεργασία παρακολούθηση της επιτυγχάνεται με τη μέτρηση διαφόρων μορφών ενέργειας (σήματα) που απορρέουν από την περιοχή κατεργασίας. Τα σήματα αυτά είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της δέσμης *Laser* στο υλικό, μπορούν να ληφθούν κατά την διάρκεια της διεργασίας χρησιμοποιώντας κατάλληλους αισθητήρες και μπορούν να αξιοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την διεργασία ([49],[50]).

process	effect and location		typical detectors
welding	electromagnetic radiation from	keyhole	camera, photo diode
		melt pool	camera, photo diode
		back side of the workpiece	camera, photo diode
	acoustic emissions	keyhole opening	microphone
		workpiece borne	piezoelectric transducer
	particle ejections	melt pool	camera, photo diode
	backscattered laser radiation	keyhole	camera, photo diode
cutting	electromagnetic radiation from	interaction zone	photo diode, camera
	gaseous ejections	workpiece material	photo diode, capacitive
	particle ejections	fluid workpiece	photo diode, capacitive
	laser radiation	interaction zone	photo diode
		through the kerf	photo diode

Σχήμα 2-8. Διάφορα φαινόμενα, σήματα και αντίστοιχοι αισθητήρες κατά τις διεργασίες κοπής και συγκόλλησης με δέσμη *Laser* ([49]).

Στην μελέτη [50] παρουσιάστηκε μια εμπεριστατωμένη και λεπτομερής ανασκόπηση των σημάτων και αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των βασικότερων διεργασιών με δέσμη *Laser*, όπως η συγκόλληση, η διάτρηση, η κοπή και η χάραξη. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και ακουστικές εκπομπές, μεταδιδόμενες μέσω του αέρα και της δομής, αποτελούν τις επικρατέστερες κατηγορίες σημάτων που μπορούν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά για την παρακολούθηση της συγκεκριμένης κατηγορίας διεργασιών.

Σχήμα 2-9: Διατάξεις συστημάτων παρακολούθησης των διεργασιών με δέσμη Laser χρησιμοποιώντας (α) CCD κάμερα, (β) πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, (γ) φωτοδιόδο και (δ) μικρόφωνο ([50]).

Οι μέθοδοι και τα συστήματα που έχουν αναπτυχθεί για την αποτελεσματική παρακολούθηση των διεργασιών με δέσμη Laser μπορούν να ταξινομηθούν, ανάλογα με το είδος του σήματος που μετράται, ως εξής:

- Παρακολούθηση της διεργασίας χρησιμοποιώντας ακουστικά σήματα (με χρήση μικροφώνων, πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, κτλ.) ([49]-[72]).
- Παρακολούθηση της διεργασίας χρησιμοποιώντας οπτικά σήματα και εκπομπές ακτινοβολίας (με χρήση υπέρυθρων και υπεριωδών φωτοδιόδων, CCD και CMOS κάμερες, κτλ) ([49]-[52], [73]-[108]).
- Παρακολούθηση της διεργασίας χρησιμοποιώντας θερμοκρασιακά, ηλεκτρικά και άλλα δεδομένα (με χρήση πυρομέτρων, αισθητήρων μέτρησης ρεύματος και τάσης, κτλ.) ([109]-[112]).
- Παρακολούθηση της διεργασίας χρησιμοποιώντας συνδυασμό αισθητήρων ([113]-[115]).

Όσον αφορά την διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser*, υπάρχουν αρκετές μελέτες σχετικά με την χρήση οπτικών και ακουστικών σημάτων κυρίως όμως για τον προσδιορισμό της χρονικής στιγμής που η δέσμη διαπερνά το κατεργαζόμενο υλικό (*beam breakthrough detection*) ([51]). Παρά το γεγονός ότι η διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser* είναι μια από τις πρώτες εφαρμογές της τεχνολογίας κατεργασιών με δέσμη *Laser* και έχει πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, οι προσπάθειες ανάπτυξης μεθόδων παρακολούθησης και ελέγχου των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των οπών είναι περιορισμένες.

2.3.1 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΣΩ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ.

Η παρακολούθηση των διεργασιών με δέσμη *Laser* μέσω ακουστικών εκπομπών περιλαμβάνει την ύπαρξη ενός αισθητήρα ο οποίος έχει την δυνατότητα να μετατρέπει τα ακουστικά σήματα σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Σχήμα 2-10. Σχηματική αναπαράσταση μεθόδων μέτρησης ακουστικών εκπομπών κατά τις διεργασίες με δέσμη *Laser* ([52]).

Για την παρακολούθηση των διεργασιών με δέσμη *Laser* με την βοήθεια ακουστικών σημάτων, ένα μικρόφωνο τοποθετείται κοντά στην περιοχή κατεργασίας και καταγράφει τα ακουστικά σήματα που δημιουργούνται. Επίσης, πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, τα οποία καταγράφουν ακουστικά σήματα μεταδιδόμενα κυρίως μέσω της δομής, μπορούν να τοποθετηθούν στο κατεργαζόμενο κομμάτι, στα κάτωπτερα καθοδήγησης της δέσμης ή και στο ακροφύσιο της κεφαλής κατεργασίας ([52]).

Μια από τις πρώτες μελέτες για την χρήση ακουστικών σημάτων που δημιουργούνται κατά την διάρκεια της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser* παρουσιάστηκε από τους *Yeack et al.* ([53]). Χρησιμοποίησαν ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο τοποθετημένο κοντά στην περιοχή κατεργασίας προκειμένου να καταγράψουν την διαφορά πίεσης, και κατά συνέπεια την ακουστική εκπομπή, της γύρω περιοχής λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας.

Η διερεύνηση των ακουστικών σημάτων που δημιουργούνται από την ροή του βοηθητικού αερίου στην κοιλότητα που δημιουργείται κατά την διεργασία διάτρησης παρουσιάστηκε από τους *Chryssolouris et al.* ([54], [55]).

Σχήμα 2-11. (α) Πειραματική διάταξη για την μελέτη των ακουστικών σημάτων κατά την διεργασία διάτρησης και θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα συσχέτισης της συχνότητας του ήχου και του βάθους διάτρησης για (β) τυφλές και (γ) διαμπερείς οπές ([54], [55]).

Η θεωρητική ανάλυση των ακουστικών κυμάτων βασίστηκε στο φαινόμενο της δημιουργίας ήχου συγκεκριμένης συχνότητας κατά την ροή ενός αερίου σε μια κοιλότητα. Τα θεωρητικά αποτελέσματα συσχέτισης της συχνότητας του ήχου που δημιουργείται με το βάθος διάτρησης έδειξαν ότι μεγαλύτερο βάθος οπής έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της συχνότητας του παραγόμενου ήχου και επιβεβαιώθηκαν πειραματικά για την κατεργασία διαφορών υλικών (ακρυλικό, κεραμικό και ανοξείδωτο χάλυβα). Για την συλλογή των ακουστικών σημάτων χρησιμοποιήθηκε ένα μικρόφωνο τοποθετημένο κοντά στην περιοχή κατεργασίας και με βάση τα αποτελέσματα προτάθηκε στρατηγική ελέγχου της διεργασίας.

Επίσης, οι *Kurita et al.* ([56]) παρουσίασαν μια προσπάθεια για την δημιουργία ενός αριθμητικού μοντέλου του ήχου που δημιουργείται κατά την διεργασία χάραξης με δέσμη *Laser*. Για την δημιουργία του αριθμητικού μοντέλου χρησιμοποίησαν πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από την διάτρηση με ένα παλμό. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά οι *Kurita et al* ([57]), προσπάθησαν να συσχετίσουν τα ακουστικά σήματα που δημιουργούνται με την διατομή του υλικού που αφαιρείται. Οι *Grad και Mozina* ([58]), παρουσίασαν μια μελέτη για την επίδραση του χρονικού σχήματος του παλμού στην διεργασία διάτρησης και στα ακουστικά σήματα που δημιουργούνται.

Σχήμα 2-12: (α) Πειραματική διάταξη των *Grad και Mozina* και (β) παλμοί *Laser* και αντίστοιχα οπτικοακουστικά σήματα ([58]).

Βρέθηκε ότι χρησιμοποιώντας διαφορετικούς παλμούς δημιουργούνται διαφορετικά ακουστικά σήματα. Το σύστημα που παρουσίασαν χρησιμοποιεί μια φωτοδίοδο για τον προσδιορισμό του σχήματος τους παλμού και ένα μικρόφωνο ευρείας συχνότητας για την συλλογή των ακουστικών σημάτων.

Οι *Strgar et al.* ([59], [60]) παρουσίασαν την χρήση υπερηχητικών ακουστικών σημάτων για την παρακολούθηση της διεργασίας διάτρησης με δέσμη Laser. Συγκεκριμένα, μελέτησαν τα υπερηχητικά ακουστικά σήματα μεταδιδόμενα μέσω του αέρα αλλά και της δομής για τον προσδιορισμό του βάθους της οπής, μετρώντας τους χρόνους διάδοσης των ακουστικών κυμάτων από το κάτω μέρος της οπής έως τους αισθητήρες. Για τα ακουστικά σήματα μεταδιδόμενα μέσω της δομής χρησιμοποίησαν πιεζοηλεκτρικά στοιχεία ενώ για τα σήματα μεταδιδόμενα μέσω του αέρα χρησιμοποίησαν μια τεχνική μέτρησης της απόκλισης μιας βοηθητικής δέσμης *Laser He-Ne (beam-deflection probe)*, η οποία ήταν κάθετη στην δέσμη *Laser* που χρησιμοποιήθηκε για την διάτρηση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα ακουστικά σήματα τα οποία κατεγράφησαν μέσω του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του βάθους της οπής.

Σχήμα 2-13: Σχηματική απεικόνιση συστήματος παρακολούθησης της διεργασίας διάτρησης με δέσμη Laser των Strgar et al. ([59], [60]).

Η τεχνική της μέτρησης της απόκλισης μιας βοηθητικής δέσμης *Laser* εξαιτίας των κρουστικών κυμάτων που δημιουργούνται κατά την διάτρηση με παλμούς δέσμης *Laser* παρουσιάστηκε και από τους *Petkovsek et al.* ([61], [62]) και *Babnik et al.* ([63]) για την διάτρηση γυαλιού. Για την μέτρηση της εκτροπής της βοηθητικής δέσμης *Laser* χρησιμοποίησαν ψηφιακό παλμογράφο. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των σημάτων *LBPD (Laser Beam Probe Deflection)* έδειξαν ότι το πλάτος τους σήματος μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των παλμών και σχεδόν μηδενίζεται όταν η οπή γίνεται διαμερής. Επίσης, η συγκεκριμένη τεχνική παρακολούθησης μπορεί να αξιοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό των διαφόρων φάσεων διάτρησης.

Σχήμα 2-14: (α) πειραματική διάταξη για την ανίχνευση των κρουστικών σημάτων, (β) τυπικό LBDP σήμα και συσχέτιση (γ) σήματος LBDP με τον αριθμό των παλμών και (δ) βάθους οπής με τον αριθμό των παλμών ([62]).

Επίσης, οι *Stafe et al.* ([64]) παρουσίασαν μια αντίστοιχη μελέτη σχετικά με την παρακολούθηση του βάθους της οπής χρησιμοποιώντας τον χρόνο διάδοσης των κρουστικών κυμάτων μεταδιδόμενα μέσω της δομής του υλικού.

Σχήμα 2-15: (α) Πειραματική διάταξη των *Stafe et al.* και (β) Τυπικό ακουστικό σήμα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου ([64]).

Χρησιμοποίησαν ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο τοποθετημένο στο κάτω μέρος του υλικού και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο χρόνος διάδοσης του σήματος μειώνεται με τη αύξηση των παλμών της δέσμης και κατά συνέπεια με την αύξηση του βάθους της οπής και ήταν σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.

Οι *Efthimiopoulos et al.* ([65]) και *Dogas et al.* ([66]) παρουσίασαν την χρήση ακουστικών σημάτων μεταδιδόμενων μέσω της δομής του υλικού για την παρακολούθηση του ρυθμού αποκόλλησης σε πλαστικά υλικά (*PMMA* και *YBCO*). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο χρόνος άφιξης του σήματος στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, το οποίο βρίσκεται στο κάτω μέρος του κατεργαζόμενου υλικού σχετίζεται με το ρυθμό και το βάθος αποκόλλησης.

Σχήμα 2-16: Πειραματική διάταξη για την παρακολούθηση της διεργασίας αποκόλλησης με δέσμη Laser μέσω μέτρησης του χρόνου άφιξης ακουστικών σημάτων ([66]).

Συγκεκριμένα, κατέληξαν ότι αύξηση του βάθους αποκόλλησης έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου άφιξης του ακουστικού σήματος.

Μια μέθοδος συσχέτισης του χρόνου ανίχνευσης (*time of flight*) των ακουστικών σημάτων με το βάθος διάτρησης για την περίπτωση μικρό-διάτρησης κεραμικών υλικών με υπερβραχείς παλμούς παρουσιάστηκε από τους *Stauter et al.* ([67]). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενέργεια του κρουστικού κύματος που δημιουργείται κατά την επίδραση της δέσμης Laser συσχετίζεται με το ρυθμό αφαίρεσης υλικού και με το ακουστικό σήμα του μικροφώνου. Παρόμοια τεχνική παρουσιάστηκε και από τους

Petkovsek et al. ([68]) μετρώντας τον χρόνο ανίχνευσης του υπερηχητικού ακουστικού σήματος που καταγράφεται από ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, με το βάθος για διάτρηση με υπερβραχείς παλμούς σε αλουμίνιο, χάλυβα και χαλκό.

Σχήμα 2-17: Πειραματική διάταξη για την παρακολούθηση της διεργασίας μικρο-διάτρησης μέσω του χρόνου ανίχνευσης των υπερηχητικών σημάτων ([68])

2.3.2 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.

Οπτικοί αισθητήρες, υπεριώδους, υπέρυθρης αλλά και ορατής ακτινοβολίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να μετατρέψουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ηλεκτρικό σήμα αλλά και για απεικόνιση της περιοχής κατεργασίας ([52]).

Σχήμα 2-18. Σχηματική αναπαράσταση μεθόδων μέτρησης οπτικών σημάτων κατά τις διεργασίες με δέσμη Laser ([52]).

Οι *Hand et al.* ([73]) παρουσίασαν μια μέθοδο για την μέτρηση της διαμέτρου της οπής κατά την διεργασία διάτρησης. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί την αντανάκλαση της δέσμης ενός *He-Ne Laser* και η αντανακλώμενη ακτινοβολία μετράτε με την βοήθεια μιας φωτοδιόδου.

Σχήμα 2-19. (α) Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος παρακολούθησης της διαμέτρου της οπής και (β) μέτρηση της διαμέτρου της οπής χρησιμοποιώντας την αντανακλώμενη ακτινοβολία ([73]).

Για την μέτρηση της διαμέτρου της οπής, η δέσμη του *He-Ne Laser* μετακινείται κατά μήκος της διαμέτρου της οπής και στην περιοχή της οπής παρατηρείται μια πτώση της αντανακλώμενης ακτινοβολίας. Οι *Pandey et al.* ([74]) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία κριτήριο σχετικά με τον αν η διαδικασία διάτρησης έχει ολοκληρωθεί ή όχι (διαμερής οπή) βασιζόμενοι στην οπτική παρακολούθηση της συμπεριφοράς του πλάσματος που δημιουργείται κατά την διεργασία της διάτρησης.

Σχήμα 2-20: Σχηματική αναπαράσταση του πλάσματος για τα διάφορα στάδια της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης Laser κράματος SUPERNI 263A ([74]).

Η εμφάνιση πλάσματος και η αύξηση της λάμψης του πλάσματος στην έξοδο της οπής υποδεικνύει την δημιουργία διαμερούς οπής. Οι *Low et al.* ([16]-[19]) χρησιμοποίησαν

την τεχνική της φωτογράφισης με υψηλή ταχύτητα (9000 καρέ/λεπτό) για την παρακολούθηση του τήγματος που εκτινάσσεται κατά την διεργασία διάτρησης με παλμούς δέσμης *Laser* κρμάτος *Nimonic 263*.

Σχήμα 2-21: Φωτογράφιση υψηλής ταχύτητας κατά την διάτρηση κρμάτος *Nimonic 263* με παλμούς δέσμης *Laser* ([16]).

Οι *Su et al.* ([75]) παρουσίασαν μια μέθοδο για την παρακολούθηση της διεργασίας κοπής και διάτρησης με Nd:YAG δέσμη *Laser* το οποίο χρησιμοποιεί οπτικές ίνες για την παράδοση της δέσμης. Η τεχνική παρακολούθησης βασίζεται στο γεγονός ότι ένα μέρος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο υλικό, αντανακλάται. Στα συστήματα κατεργασίας με δέσμη *Laser* που χρησιμοποιούν οπτικές ίνες, ένα μέρος της ενέργειας που αντανακλάται συλλέγεται από τον τελικό φακό και διοχετεύεται στην οπτική ίνα. Το σύστημα των *Su et al.* χρησιμοποιεί μια φωτοδίοδο για την καταγραφή της ακτινοβολίας που επιστρέφει στην οπτική ίνα.

Experimental arrangement: JK702—Nd:YAG laser; F—main fibre; M.F.—monitor fibre; PD1—photodiode for target signal; PD2—photodiode for laser pulse monitoring; T—target.

Σχήμα 2-22. Διάταξη συστήματος παρακολούθησης της διεργασίας διάτρησης/κοπής συστήματος κατεργασίας που χρησιμοποιεί οπτική ίνα για την παράδοση της δέσμης *Laser* ([75]).

Διαπιστώθηκε ότι η ένταση του σήματος μειώνεται σημαντικά όταν η δέσμη διαπερνά το υλικό και η οπή γίνεται διαμπερής.

Στην μελέτη ([76]), οι *Mahlen et al.* ανέπτυξαν ένα σύστημα ελέγχου της θέσης του επιπέδου εστίασης έχοντας ως βάση την ακτινοβολία που αντανακλάται από το κατεργαζόμενο υλικό.

Σχήμα 2-23: Αρχή λειτουργίας του συστήματος ελέγχου της θέσης του επιπέδου εστίασης των Mahlen et al. ([76]).

Μετρώντας την ισχύ της ακτινοβολίας για δύο διαφορετικά μήκη κύματος (ορατή και υπέρυθρη) από την διαφορά των δύο σημάτων, προσδιορίζεται η θέση του επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του κατεργαζόμενου υλικού και κατά συνέπεια μπορούν να πραγματοποιηθούν ενέργειες διόρθωσης της θέσης του επιπέδου εστίασης. Ένα εμπορικά διαθέσιμο σύστημα ανίχνευσης διαμπερούς διάτρησης έχει παρουσιαστεί από την εταιρία *PRIMA North America Inc*¹ ([77]), το οποίο χρησιμοποιεί μια κάμερα, ομοαξονικά τοποθετημένη ως προς της δέσμη *Laser*, για την παρακολούθηση της περιοχής διάτρησης και τη καταγραφή της ορατής ακτινοβολίας που αντανακλάται.

(α)

(β)

Σχήμα 2-24: (α) Σύστημα ανίχνευσης διαμπερούς διάτρησης και (β) διακύμανση των διαμέτρων εισόδου και εξόδου διαμπερών όπως χρησιμοποιώντας ή όχι το προτεινόμενο σύστημα ([77]).

Το σήμα της κάμερας τροφοδοτείται σε μια μονάδα επεξεργασίας και συγκρίνεται με ένα προκαθορισμένο σήμα και ανάλογα σταματά ή συνεχίζεται η διαδικασία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το προτεινόμενο σύστημα συμβάλει στην βελτίωση της γεωμετρίας της οπής, όπως είναι η διάμετρος εισόδου και εξόδου.

¹Prima North America Inc, URL: www.prima-na.com

Επίσης, οι *Keuster et al.* ([78]) κατά την πειραματική διερεύνηση συσχέτισης ακουστικών και οπτικών σημάτων, χρησιμοποιώντας μικρόφωνο και φωτοδιόδους, με την ποιότητα κοπής με δέσμη *Laser* για διάφορα μεταλλικά υλικά (*St37*, *St37-LQ*, *St52-3*, *St52-LQ*, *AISI304*, *HARDOX-400*, *WELDOX-700*), διαπίστωσαν ότι κατά την διάτρηση του υλικού πριν αρχίσει η κοπή (*piercing*), όταν η δέσμη διαπερνά πλήρως το υλικό (*beam breakthrough*) τα σήματα που λαμβάνονται και από τους δύο τύπους αισθητήρων μειώνονται σημαντικά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήριο για το αν έχει επιτευχθεί διαμπερής διάτρηση. Η χρήση κάμερας και φασματοσκοπικής ανάλυσης για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του πλάσματος που δημιουργείται κατά την διάτρηση χαλαζία, παρουσιάστηκε στην μελέτη ([79]) από τους *Zeng et al.* Πειράματα με έναν παλμό έγιναν σε προκατασκευασμένες οπές με το ίδιο βάθος αλλά με διαφορετικές διαμέτρους εισόδου, έτσι ώστε ο λόγος βάθος-προς-διάμετρο να είναι 1:1, 3:1 και 6:1. Διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασία του πλάσματος καθώς και η πυκνότητα των ηλεκτρονίων ήταν μεγαλύτερη για λόγο 6:1 και καθώς ο λόγος των διαστάσεων μειώνεται, δηλαδή καθώς αυξάνεται η διάμετρος, η θερμοκρασία του πλάσματος μειώνεται και η πυκνότητα των ηλεκτρονίων πλησιάζει τις αντίστοιχες τιμές της περίπτωσης που δεν υπάρχει οπή.

Οι *Dietrich et al.* ([80]) στα πλαίσια της διερεύνησης της ταχύτητας διάτρησης χρησιμοποιώντας υπέρθεση παλμών δύο δεσμών *Laser* και διάφορα βοηθητικά αέρια (οξυγόνο, αργό, ήλιο) για την διάτρηση ανοξείδωτου χάλυβα, χρησιμοποίησαν μια υψηλής ταχύτητας κάμερα για τον προσδιορισμό του βάθους της οπής.

(γ)
Σχήμα 2-25: (α) Πειραματική διάταξη, (β) Σχηματική απεικόνιση μέτρησης βάθους οπής μέσω των παραμορφώσεων και φωτογραφίες της διεργασίας διάτρησης και (γ) ακτινοβολία από την περιοχή χωρίς και με υπέρθεση παλμών ([80]).

Το βάθος της οπής προσδιορίζεται με βάση τις παραμορφώσεις που δημιουργούνται στην πλευρά του δοκιμίου λόγω θερμικών τάσεων και υπολογίζονται από την επεξεργασία των φωτογραφιών. Επίσης, για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάτρησης χρησιμοποίησαν μια κάμερα υψηλής ταχύτητας, τοποθετημένη ομοαξονικά με την δέσμη *Laser*, για την καταγραφή της ακτινοβολίας προερχόμενη από την περιοχή κατεργασίας και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ταχύτητα διάτρησης αυξάνεται με υπέρθεση παλμών στην περίπτωση που χρησιμοποιείται οξυγόνο ως βοηθητικό αέριο.

Οι *French et al.* ([81]), επίσης χρησιμοποίησαν μια κάμερα υψηλής ταχύτητας, τοποθετημένη τόσο ομοαξονικά όσο και κάθετα σε σχέση με την δέσμη *Laser*, για την παρακολούθηση των φαινομένων (δημιουργία πλάσματος, εκτίναξη τήγματος, κτλ.) κατά την διάτρηση αεροναυπηγικών υλικών. Η μελέτη των φωτογραφιών οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η διεργασία αποτελείται από τρία κύρια στάδια. Αρχικά δημιουργείται πλάσμα επάνω από την περιοχή κατεργασίας, στην συνέχεια το υλικό αφαιρείται κυρίως σε υγρή μορφή εξαιτίας της πίεσης που δημιουργείται στην κοιλότητα της οπής και στην συνέχεια υπάρχει συνεχής εξέλιξη της γεωμετρίας της οπής με το υλικό να αφαιρείται υπό την μορφή σταγόνων και η διαδικασία αφαίρεσης υλικού σταματά όταν επέρχεται ενεργειακή ισορροπία στην περιοχή κατεργασίας.

Τέλος, ορισμένες πατέντες έχουν κατοχυρωθεί σχετικά με την παρακολούθηση της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser*, εκ των οποίων οι περισσότερες αφορούν τον προσδιορισμό της χρονικής στιγμής που η δέσμη διαπερνά πλήρως το κατεργαζόμενο υλικό ([82]-[87]), την έμμεση παρακολούθηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των οπών για διάτρηση πολυστρωματικών υλικών (*multilayer materials*) ([88], [89]), όπου η πρόσπτωση της δέσμης σε διαφορετικά υλικά δημιουργεί διαφορετικά σήματα, και τον έλεγχο της θέσης του ακροφυσίου σε σχέση με την επιφάνεια του κατεργαζόμενου υλικού ([90]).

2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Chryssolouris G., (1991), "Laser Machining: Theory and Practice", Springer-Verlag.
- [2] Salonitis, K., A. Stournaras, G. Tsoukantas, P. Stavropoulos and G. Chryssolouris, (2007), "A Theoretical and Experimental Investigation on Limitations of Pulsed Laser Drilling", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 183/1, pp. 96-103.
- [3] Modest M.F., (1997), "Transient elastic and viscoelastic thermal stresses during Laser drillings of ceramics", Proceedings of International Congress of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), Section B, pp. 90 – 99.
- [4] Ganesh, R.K, A. Faghiri, Y. Hahn, (1997), "A generalized thermal model for Laser drilling process—I. Mathematical modeling and numerical methodology", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 40/14, pp 3351-3360.
- [5] Ganesh, R.K, A. Faghiri, Y. Hahn, (1997), "A generalized thermal model for Laser drilling process—II. Numerical simulation and results.", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 40/14, pp 3361-3373.
- [6] Tosto, S., (1999), "Modelling and computer simulation of pulsed-Laser-induced ablation", Applied Physics A Material Science and Processing, Vol. 68, pp 439-446.
- [7] Sankaranarayanan, S, H. Emminger, A. Kar, (1999), "Energy loss in the plasma during Laser drilling", Journal of Physics, D: Applied Physics, Vol. 32, pp. 1605-1611.
- [8] Zhang, Y., A. Faghri, (1999), "Vaporization, melting and heat conduction in the Laser drilling process", International Journal of Heat and mass Transfer, Vol. 42, pp. 1775-1790.
- [9] P. Solana, P. Kapadia, J. Downen, W. Rodden, S. Kudesia, D. Hand, J. Jones, (2001), "Time dependent ablation and liquid ejection processes during the Laser drilling of metals", Optics Communications, vol 191, pp. 97-112.
- [10] Tokarev, V. N., J. Lopez, S. Lazare, (2000), "Modeling of high-aspect ratio microdrilling of polymers with UV Laser ablation", Applied Surface Science, vol 168, pp. 75-78.
- [11] Solana, P., P. Kabadia, J.M. Downden, P.J. Marsden, (1999), "An analytical model for the Laser drilling of metals with absorption within the vapour", Journal of Physics, D: Applied Physics, Vol. 32, pp. 942-952.
- [12] Semak, V., X. Chen, K. Mudra, J. Zhao, (1997), "Numerical simulation of hole profile in high beam intensity Laser drilling", Proceedings of International Congress of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), Section B, pp 81 – 89.

- [13] Cheng, C.F., Y.C. Tsui, T.W. Clyne, (1998), "Application of a three-dimensional heat flow model to treat Laser drilling of carbon fibre composites.", *Acta Mater*, Vol. 46/12, pp. 4273-4285.
- [14] Batteh J., M. Chen, J. Mazumber, (2000), ``A Stagnation Flow Analysis of the Heat Transfer and Fluid Flow Phenomena in Laser Drilling ``', *Journal of Heat Transfer*, vol 122, pp. 801-807.
- [15] Voisey K., S. Kudesia, W. Rodden, D. Hand, J. Jones, T. Clyne, (2003), ``Melt ejection during Laser drilling of metals``, *Materials Science and Engineering*, vol A356, pp. 414-424.
- [16] Low D.K.Y, L. Li, P.J. Byrd, (2000), "The effects of process parameters on spatter deposition in Laser percussion drilling", *Optics and Laser Technology*, Vol. 32, pp. 347-354.
- [17] Low D.K.Y, L. Li, A.G. Corfe, (2001), ``Characteristics of spatter formation under the effects of different Laser parameters during Laser drilling``, *Journal of Materials Processing Technology*, vol 118, pp. 179-186.
- [18] Low D.K.Y, L. Li, A.G. Corfe, P.J. Byrd, (2001), "Spatter-free Laser percussion drilling of closely space array holes." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, pp. 361-377.
- [19] Low D.K.Y, Li L, Byrd PJ, (2001), "The influence of temporal pulse train modulation during laser percussion drilling", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 35, pp. 149-164
- [20] Low, D.K.Y, L. Li, A.G. Corfe, (2000), "Effects of assist gas on the physical characteristics of spatter during Laser percussion drilling of NINOMIC 263 alloy.", *Aplied Surface Science*, vol. 154-155, pp. 689-695.
- [21] Sharp C.M., R.E. Mueller, J. Murthy, M.H. McCay, (1997), ``A novel anti – spatter technique for Laser drilling: applications to surface texturing``, *Proceedings of International Congress of Lasers and Electro-Opticis (ICALEO)*, Section A, pp. 41 – 50.
- [22] Yilbas, B.S., (1986), "A study of affecting parameters in the Laser hole-drilling of sheet metals", *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 13, pp. 303-315.
- [23] Yilbas, B.S., (1997), "Parametric study to improve Laser hole drilling process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 70, pp. 264-273.
- [24] Yilbas, B.S., A. Z Sahim, (1994), "Laser pulse optimization for practical Laser drilling", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol 20, pp. 311
- [25] Luft, A., U. Franz, A. Emserman, J. Kaspar, (1996), "A study of thermal and mechanical effects on materials induced by pulsed Laser drilling.", *Applied Physics A: Material Science and Processing*, Vol. 63, pp. 93-101.
- [26] Yilbas B.S., (1988), "Investigation into drilling speed during laser drilling of metals", *Butterworth & Co (Publishers) Ltd*, Vol. 20.

- [27] Tam S.C., C.Y Yeom., S. Jana, W.S. Lau Michael, E.N Lim Lennie., L.J Yang., Md Noor Yusoff, (1993), "Optimization of laser deep-hole drilling of Inconel 718 using the Taguchi method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 37, pp. 741-757.
- [28] Ng G.K.L., L. Li, (2001), "The effect of Laser power and pulse width on the hole geometry repeatability in Laser percussion drilling", *Optics and Laser Technology*, Vol. 33, pp. 393-402.
- [29] Ng, G.K.L., L. Li, (2003), "Repeatability characteristics of Laser percussion drilling of stainless steel", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 39, pp. 25-33.
- [30] Lusquinos, F., J. Pou, M. Larosi, R. Soto, M. P. Amor, (1997), "The influence of different assisting gases in the Nd: YAG Laser drilling of slate", *Proceedings of International Congress of Lasers and Electro-Optics (ICALEO)*, Section B, pp. 109 – 117.
- [31] Weichenhain, R., J. Jandeleit, A. Horn, E.W. Kreutz, R. Poprawe, (1997), "Drilling of ceramics and polymers by diode pumped solid state Lasers", *Proceedings of International Congress of Lasers and Electro-Optics (ICALEO)*, Section B, pp. 73 – 80.
- [32] Yilbas, B.S., M. Sami, (1997), "Liquid ejection and possible nucleate boiling mechanisms in relation to the Laser drilling process", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 30, pp. 1996-2005.
- [33] S. Nolte, C. Momma, G. Kamlage, A. Ostendorf, C. Fallnich, F. vonAlvensleben, H. Welling, (1999), "Polarization effects in ultrashort-pulse Laser drilling", *Applied Physics A*, vol 68, pp. 563-567
- [34] Corcoran, A., L. Sexton, B. Seaman, P. Ryan, G. Byrne, (2002), "The Laser drilling of multi-layer aerospace material systems", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 123, pp. 100-106.
- [35] Li L., D.K.Y. Low, M. Ghoreishi, J.R. Crookal, (2002), "Hole taper characterization and control in Laser percussion drilling", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 51/1, pp. 153-156.
- [36] Ghoreishi M., D.K.Y. Low, L. Li, (2002), "Comparative statistical analysis of hole taper and circularity in Laser percussion drilling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, pp. 985-995.
- [37] Ghoreishi M., Low D.K.Y., Li L., (2002), "Statistical modelling of laser percussion drilling for hole taper and circularity control", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of engineering manufacture*, Vol. 216, pp/ 307-319.
- [38] Bandyopadhyay, S., J.K. Sarin, Sundar, G. Sundararajan, S.V. Joshi, (2002), "Geometrical features and metallurgical characteristics of Nd:YAG Laser drilled holes in thick IN178 and Ti-Al-4V sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 5874, pp. 1-13.

- [39] Bandyopadhyay S., H. Gokhale, J. K Sarin Sundar., G. Sundararajan, S. V. Joshi, (2005) "A statistical approach to determine process parameter impact in Nd:YAG laser drilling of IN718 and Ti-6Al-4V sheets", Vol. 43, pp. 163-182.
- [40] Brajdic M., K. Walther, U. Eppelt, (2008), "Analysis of Laser drilled deep holes in stainless steel by superposed pulsed Nd:YAG Laser radiation", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 46, pp. 648-655.
- [41] Nakhjavani O.B., M. Ghoreshi, (2006), "Multi criteria optimization of Laser percussion drilling process using artificial neural network model combined with genetic algorithm", Material and Manufacturing Processes, Vol. 21, pp. 11-18.
- [42] Ghoreshi M., O.B. Nakhjavani, (2008), "Optimization of effective factors in geometrical specifications of Laser percussion drilled holes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 196, pp. 303-310.
- [43] Haba B., Y. Morishige, S. Kishiba, (1996), "Novel technique of through-hole Laser drilling in teflon.," Materials Science and Engineering B, Vol. 41, pp. 383-385.
- [44] Boutinguiza M., J Pou., F. Lusquinos, F. Quintero, R. Soto, M. Perez-Amor, K. Watkins, W.M. Steen, (2005), "Drilling of slate tiles by CO₂ laser", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 159, pp. 83-90.
- [45] Kacar E., M. Mutlu, E. Akman, A. Demir, L. Candan, T. Canel, V. Gunay, T. Sinmazcelik, (2008), "Characterization of the drilling aluimina ceramic using Nd YAG pulsed laser", Journal of Materials Processing Technology, Vol. xxx, pp. xxx.
- [46] Dell'Erba M., L.M. Galantucci, S. Miglietta, (1992), "An experimental study on laser drilling and cutting of composite materials for the aerospace industry using excimer and CO₂ sources", Composite Manufacturing, Vol. 3/1, pp. 14-19.
- [47] Masmia N., P.K. Philip, (2007), "Investigations on laser percussion drilling of some thermoplastic polymers", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 185, pp. 198-203.
- [48] Olfert M., W. Duley, (2000), "Time-dependent interaction of pulsed CO₂ Laser radiation with liquids", Optics and Lasers in Engineering, vol 34, pp. 205-211
- [49] Kogel-Hollacher M., C. Dietz, T. Nicolay, J. Schmid, M. Schmidt, J. Bahnmüller, B. Kessler, B. Schürmann, M. G. Müller, (2001), "Process monitoring or process control in Laser materials processing", International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO).
- [50] Chryssolouris G (1994), "Sensors in laser machining",. CIRP Annals, 43/2, pp. 513-519
- [51] "Laser Physics and Applications", (2004), Editors: R. Poprawe, H. Weber, G. Herziger,, Sub-volume C: Laser Applications", Springer-Verlag Berlin

- Heidelberg New York, ISBN: 3-540-00105, (Chapter 2.8: Process monitoring and closed-loop control”, W. Weismann).
- [52] Shao Y., Y. Yan, (2005), “Review techniques for On-line monitoring and inspection of Laser welding”, Journal Of Physics: Conference series, Vol. 15, pp. 101-107.
- [53] Yeack C.E., R.L. Melcher, H.E. Klauser, (1982), “Transient photoacoustic monitoring of pulsed lased drilling”, Applied Physics Letters, Vol. 41/11.
- [54] Chryssolouris G., P. Sheng, (1991), “Process control of Laser grooving using acoustic sensing”, Transactions of ASME, Vol. 113, pp. 268-275.
- [55] Cryssolouris G., P. Sheng, (1994), “Investigation of acoustic sensing for Laser machining processes-Part 1: Laser Drilling”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 43, pp. 125-143.
- [56] Kurita T., T. Ono, N. Morita, (2000), “Study on numerical analysis of the frequency characteristic of Laser processing sound”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 101, pp. 193-197.
- [57] Kurita T., T. Ono, T. Nakai, (2001), “A study of processes area monitoring using the strength of YAG Laser processing sound”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 112, pp. 37-42.
- [58] Grad L., J. Mozina, (1998), “Laser pulse influence shape on optically induced dynamic processes”, Applied Surface Science, Vol. 127-129, pp. 999-1004.
- [59] Strgar S, J Mozina, (2002), “An optodynamic determination of the depth of *Laser*-drilled holes by the simultaneous detection of ultrasonic waves in air and in the workpiece”, Ultrasonics, Vol. 40, pp. 791–795.
- [60] Strgar S, J Mozina, (2002), “An optodynamic method for the real-time determination of the depth of a laser-drilled hole”, Applied Physics A: Materials Science & Processing, Vol.74, pp. 321-323.
- [61] Petkovsek R., A Babnik., J. Diaci, (2006), „Optodynamic monitoring of the laser drilling of through holes in glass ampoules“, Measurement Science and Technology, Vol. 17, pp. 2828-2834.
- [62] Petkovsek R., A. Babnik, J. Diaci, J. Mozina, (2008), “Monitoring of laser micro-drilling of glass by using a laser probe”, Applied Physics A: Material Science and Processing, Vol. 93, pp. 141-145, DOI: 0.1007/s00339-008-4658-0.
- [63] Babnik A. R. Petkovsek, J. Diaci, (2007), Monitoring Excimer laser drilling through glass using optodynamic detection, 5th Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE2007), pp. 1083-1092, 25-28 September, Erlangen, Germany.
- [64] Stafe M., C. Negutu, I.M. Popescu, (2005), “Real-time determination and control of the laser-drilled hole depth”, Shock Waves, DOI: 10.1007/s00193-004-0240-7.

- [65] Efthimiopoulos T., E. Kritsotakis, H. Kiagias, C. Savvakis, Y. Bertahas, (1998), "Laser ablation rate of materials using the generated acoustic waves", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.31, pp. 2648-2652.
- [66] Dogas D., T. Efthimiopoulos, C. Andreouli, M. Campbell, (2001), "Acoustic wave monitoring of the excimer laser ablation of YBCO high- T_c super conductor", *Applied Physics A: Material Science and Processing*, Vol. 73, pp. 287-294.
- [67] Stauter C., P. Gerard, J. Fontain, T. Engel, (1997) "Laser ablation acoustical monitoring", *Applied Surface Science*, Vol. 109/110, pp. 174-178.
- [68] Petkovsek R., I. Panjan, A. Babnik, J. Mozina, (2006), "Optodynamic study of multiple pulses micro drilling", *Ultrasonics*, Vol. 44, pp.1191-1194.
- [69] Gu. H., W.W. Duley, (1996), "A statistical approach to acoustic monitoring of Laser welding", *Journal of Applied Physics*, Vol. 29, pp. 556-560.
- [70] Gu H., W. W. Duley, (1996), "Resonant acoustic emission during Laser welding of metals", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 29, pp. 550-555.
- [71] Cryssolouris G., P. Sheng, (1994), "Investigation of acoustic sensing for Laser machining processes-Part 2: Laser grooving and cutting", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 43, pp. 145-163.
- [72] Bordatchev E., S.K. Nikub, (2006), "Effect of focus position on informational properties of acoustic emission generated by laser-material interactions", *Applied Surface Science*, Vol. 253, pp. 1122-1129.
- [73] Hand D., P. C. Peters, F. Haran, J.D.C. Jones, (1997), "A fibre-optic-based sensor for optimization and evaluation of the Laser percussion drilling process", *Material Science Technology*, Vol. 8, pp. 587-592.
- [74] Pandey N.D., H.S. Shan, A. Bharti, (2006), "Percussion Laser drilling: hole completion criterion", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 28, pp. 863-868.
- [75] Su D., I. Norris, C. Peters, D.R. Hall, J.D.C. Jones, (1993), "In-situ Laser material process monitoring using cladding power detection technique", *Optics and Laser in Engineering*, pp. 371-376.
- [76] Fox M.D.T., P. French, C. Peters, D.P. Hand, J.D.C. Jones, (2002), "Application of optical sensing for laser cutting and drilling", *Applied Optics*, Vol. 41/24, pp. 4988-4995.
- [77] Vanderwert T., (2006), "Breakthrough detection", *Industrial Laser Solutions* (electronic journal), June, URL: <http://www.industrial-lasers.com>.
- [78] Keuster J.D., J.R Duflou, J-P Kruth, (2006), Monitoring of high-power CO2 laser cutting by means of an acoustic microphone and photodiodes, *Int. Journal of Advanved Manufacturing Technology*, DOI 10.1007/s00170-006-0695-z.

- [79] Zeng X., S.S. Mao, C. Liu, X. Mao, R. Greif, R. Russo, (2003), "Plasma diagnostics during laser ablation in cavity", *Spectrochimica Acta Part B*, Vol. 58, pp. 867-877.
- [80] Dietrich J., M. Bradjic, K. Walther, A. Horn, I. Kelbassa, R. Poprawe, (2008), „Investigation of increased drilling speed by online high-speed photography“, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 46, pp. 705-710.
- [81] French P.W., D.P. Hand, C. Peters, G.J. Shannon, P. Byrd, W.M. Steen, (1998), "Investigation of the Nd:YAG laser percussion drilling process using high speed filming", *International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO)*, Orlando, Florida (USA), November 16-19. .
- [82] Duffin J.E., (2001), "Laser drilling with optical feedback", *United States Patent No.6,201,214*.
- [83] Somers R. M., D. R. Compton, (1991), "Optical breakthrough sensor for laser drill", *United States Patent No.5026964*.
- [84] Sommers R.M., J. M. Crow, (2000), "Laser drilling breakthrough detector", *United States Patent No.6,140,604*.
- [85] Chen X., (2000), "Method and apparatus for laser drilling", *United States Patent No.6,054,673*.
- [86] Ortiz A.L., J.L. Scotia, L. Schneiter, (1991), "Method and apparatus for optically/acoustically monitoring laser materials processing", *United States Patent No.5,045,669*.
- [87] Kong Ma D., J.T. Pinder, (1989), "Laser drilling of components", *United States Patent No.4,873,414*.
- [88] Melcher R., Wen Sheree H., (1985), "Laser drilling system utilizing photoacoustic feedback", *United States Patent No.4504727 (A)*.
- [89] Toth V., W.H. Kasner, J.F. Roach, (1992), "Controlled depth laser drilling system", *Canadian Patent document No.1306019*.
- [90] Lorniger L, (2000), "Laser drilling holes in a cylindrical workpiece", *United States Patent No.6,130,405*.
- [91] Rudiger, N.E., M. Houlot, (1997), "Integration of real time quality control systems in a welding process", *Journal of Laser Applications*, Vol. 9, pp. 95 – 102.
- [92] Sanders, P.G, K.H. Leong, J.S. Keske, G. Kornecki, (1998), "Real – time monitoring of Laser beam welding using infrared weld emissions", *Journal of Laser Applications*, Vol. 10/5, pp. 205 – 211.
- [93] L'hospitalier, S., P. Bourges, A. Bert, J. Quesada, M. Lambertin, (1991), "Temperature measurement inside and near the weld pool during Laser welding", *Journal of Laser Applications*, Vol. 11/1, pp. 32 – 37.

- [94] Riciardi, G., M. Cantello, F. Mariotti, P. Castelli, M. Penasa, (1999), "On – line process control used in the Laser welding of metal sheet lightweight structural Panels," *Annals of the CIRP*, Vol. 48/2, pp. 159 – 162.
- [95] Mori, K., and I. Miyamoto, (1997), "In – process monitoring of Laser welding by the analysis of ripples in the plasma emission," *Journal of Laser Applications*, Vol. 9, pp. 155 – 159.
- [96] Park, H., S. Rhee, (1999), "Analysis of mechanism of plasma and spatter in CO₂ Laser welding of galvanized steel," *Optics & Laser Technology*, Vol. 31/2, pp/ 119 – 126.
- [97] Park, H., S. Rhee, (1999), "Estimation of weld bead size in CO₂ Laser welding by using multiple regression and neural network", *Journal of Laser Applications*, Vol. 11/3, pp. 143 – 150.
- [98] Iwai, T., K. Sadamura, F. Natumi, (1994), "Integrated Automotive Panel Production System using Laser Welding", *Laser Assisted Net shape Engineering, Proceeding of the LANE'94*, Vol.1, pp. 135 – 144.
- [99] Zhang, Y.M., R. Kovacevic, L.Li, (1996), "Characterization and Real – time measurement of geometrical appearance of the weld pool", *International Journal of Machining Tools and Manufacturing*, Vol. 36/No. 7, pp. 799 – 816.
- [100] Beersiek J., (2001), "A CMOS camera as a tool for process analysis not only for Laser beam welding", *International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO)*.
- [101] Beersiek J., (2002), "New aspects of monitoring with a CMOS camera for Laser material processing", *Proceedings of International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO)*.
- [102] Beersiek J., T. Deverman, K. Behler, (2004), "Practical applications of in-process monitoring for Laser processes-not only for single welds and common materials", *Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO)*.
- [103] Pietro P.Di., Yao Y.L., (1994), "An investigation in characterizing and optimizing Laser cutting quality", *International Journal of Machine Tools Manufacture*, Vol. 34/2, pp. 225-243.
- [104] Huang M.Y., C.R. Chatwin, (1994), "A knowledge-based adaptive control environment for an industrial Laser cutting system", *Optics and Laser in Engineering*, Vol. 21, pp. 273-295.
- [105] Roggero G., F. Scotti, F.S. Sessa, , V. Piuri, (2001), "Quality anaysis measurement for Laser cutting", *IEEE International Workshop in virtual and intelligent measurement systems*, Budapest, Hungary, May 19-20, pp. 41-44.
- [106] Poprawe P., (2001), "Modelling, monitoring and control in high quality Laser cutting", *Annals of the CIRP*, Vol. 50/1.

- [107] Yilbas B.S., (1996), “Experimental investigation into CO₂ Laser cutting parameters”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 58, pp. 323-330.
- [108] Chen S.L., (1997), “In-process monitoring of the cutting front of CO₂ Laser cutting with of-axis optical fibre”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.13, pp. 685-691.
- [109] Kirby, C., P. Abels, A. Drenker, H.Nitsch, E. Beyer, (1994), “Process monitoring for Laser Beam Welding and Applications”, *Laser Assisted Net shape Engineering, Proceeding of the LANE’94*, Vol.1, pp. 125 – 134.
- [110] Li, L., W.M. Steen, (1996), "Plasma charge sensor for in-process, non-contact monitoring of the Laser welding process", *Measurement Science and Technology*, Vol. 7, pp. 615-626.
- [111] Ignatiev M., I. Smurov, G. Flamant, (1994), “Real-time optical pyrometry in laser machining”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 5, pp. 563-573.
- [112] Idris N., S.N. Madjid, M. Ramli, K.H. Kurniawan, Y.I. Lee, K. Kagawa, (2008), “Monitoring of laser processing using induced current under applied electrical field on laser-produced plasma”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. xxx, pp. xxx-xxx.
- [113] Tonshoff H.K, A Ostendorf, K. Korber, O. Hillers, (2001), “Principles of reference-free process monitoring for Laser material processing based on a multiple sensor system”, *Proceedings of International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO)*.
- [114] Farson D., Y., Sang, A. Ali, (1997), “Relationship between airborne acoustic and optical emissions during Laser welding”, *Journal of Laser Applications*, Vol. 9, pp. 87-94.
- [115] Farson D., K.R. Rim, (1999), “Generation of optical and acoustic emissions in Laser weld plumes”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 85/3, pp. 1329-1336.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης *Laser*. Ο σκοπός της πειραματικής διερεύνησης ήταν πολλαπλός. Τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν έδωσα την δυνατότητα μελέτης της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής. Επίσης, τα πειραματικά αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την συσχέτιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οπής με τα σήματα που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων και συγκρίθηκαν με τα θεωρητικά αποτελέσματα με σκοπό την ανάπτυξη του συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου της διεργασίας.

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η πειραματική διερεύνηση περιελάμβανε τον προσδιορισμό της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής, προσδιοριζόμενα από το βάθος διάτρησης και την διάμετρο εισόδου για την περίπτωση των «τυφλών» οπών και την διάμετρο εισόδου και εξόδου για την περίπτωση των διαμπερών οπών.

Και στις δύο περιπτώσεις, για την πραγματοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η μηχανή κατεργασίας με δέσμη *Laser TRUMATIC TLF 2530* της εταιρείας *TRUMPF*² που βρίσκεται στο Μηχανουργείο του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, τα κύρια χαρακτηριστικά της οποίας φαίνονται στον Πίνακα 3-1.

Η κατανομή πυκνότητας ισχύος χαμηλότερης τάξης TEM_{00} (*TEM: Transverse Electromagnetic Modes*) ή αλλιώς κατανομή *Gauss* περιγράφεται από την εξίσωση ([1]-[4]):

$$I = I_0 * e^{-\left(\frac{r^2}{R_f^2}\right)} \quad \text{Εξίσωση 3-1}$$

² *TRUMPF Group*: URL: www.trumpf.com

όπου $I_0 = \frac{2LP}{R_{f0}^2}$ είναι η μέγιστη πυκνότητα ισχύος της δέσμης στο κέντρο της ($x=y=0$)

στο εστιακό επίπεδο, LP είναι η συνολική παρεχόμενη ισχύς της δέσμης, R_{f0} είναι η διάμετρος της δέσμης στο εστιακό επίπεδο και R_f είναι η διάμετρος της δέσμης σε απόσταση z από την επιφάνεια του δοκιμίου

Χαρακτηριστικά μηχανής κατεργασίας με δέσμη *Laser* TRUMPF TRUMATIC TLF 2530

Τύπος	Διοξειδίου του άνθρακα
Μήκος κύματος λ	10.6 μm
Διάμετρος δέσμης στο επίπεδο εστίασης D_{f0} (για εστιακό φακό με μήκος εστίασης 5")	$\approx 0.16 \text{ mm}$
Ενεργός διάρκεια παλμού t_{on} (χρόνος που η δέσμη είναι «ανοιχτή»)	10 μsec
Ισχύς εξόδου LP	100 – 1800 W
Σταθερότητα εξόδου	$\pm 2\%$
Συχνότητα παλμών PF	100 - 10000 Hz
Κατανομή ισχύος	TEM ₀₀

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά μηχανής κατεργασίας με δέσμη *Laser* TRUMPF TRUMATIC TLF 2530.

Σχήμα 3-1: Μηχανή κατεργασίας με δέσμη *Laser* TRUMPF TRUMATIC TLF 2530.

Η διάμετρος της δέσμης εξαρτάται από πληθώρα παραμέτρων και προσδιορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση ([2]-[5]):

$$R_f = R_{f0} \left[1 + \left(M^2 \frac{\lambda (z + \delta_f)^2}{\pi * R_{f0}^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Εξίσωση 3-2}$$

όπου M^2 είναι ο συντελεστής ποιότητας της δέσμης, λ είναι το μήκος κύματος της δέσμης και δ_f είναι η θέση του επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου.

Σχήμα 3-2: Κατανομή πυκνότητας ισχύος TEM_{00} (κατανομή Gauss).

Εξαιτίας του γεγονότος ότι η συγκεκριμένη μηχανή κατεργασίας έχει κατασκευαστεί για κοπή και χάραξη δεν παρέχει την δυνατότητα αυτόματου προγραμματισμού για την περίπτωση διάτρησης. Για τον λόγο αυτό ήταν αναγκαίο να συνταχθεί κώδικας αριθμητικού ελέγχου (CNC) σε γλώσσα M και G . Ο κώδικας αποτελείται από δύο μέρη, το κυρίως πρόγραμμα (*Main Program – MPDRILL1*) και το υποπρόγραμμα (*Sub-Program – SPDRILL1*).

Το κυρίως πρόγραμμα περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με την μηχανή, τις διαστάσεις του υλικού, τις συντεταγμένες του σημείου διάτρησης, και το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει εντολές για την έναρξη της διεργασίας, την διάρκεια της και τις τιμές των παραμέτρων.

```

N10 MSG("MAIN PROGRAM NO.: MPDRILL1")
N20 MSG("TOPS100 V4.01 - L2530 - SIEMENS - TOPS 100 VERSION: 4.01 99/08/06")
N30 MSG ("SHEET DIMENSIONS 2900.00X815.00X1177.00")
N40G71
N50F8400
N60:(FILENAME: C:\TRUMPF\TEILEUSER1\DRILL_1.LST)
N70:(TRANSFERNAME: DRILL_1.LST PROGRAMME RUNS:0)
N80:(MACHINE:L2530 TYPE:1)
N90:(CONTROL: SIN840D VERSIO:)
N110 TC_SHEET_TECH("SHL-1");BLECHLAGE
N120TC_SHEET_LOAD("SHL-1")
N130:GOTO ENTRY_LASER
N140:ENTRY_LASER:
N150:(PART NUMBER:1 CONCECUTIVE NUMBER:1)
N160G01 X2250 Y10
N170SP1DRILL1
N263TC_LASER_OFF(2)
N270M30

```

(α)

```

N10 MSG("SUB_PROGRAM NO.,SP1DRILL1")
N20G91
N30:(PART NUMBER:1)
N40TC_POS_LEVEL(115)
N50TC_LASER_ON(5,"9120",0,100);
N60G04 F8
N80TC_LASER_OFF(1);
N170G90
N180M17
N190M02

```

(β)

Σχήμα 3-3: (α) Κυρίως πρόγραμμα και (β) υποπρόγραμμα για τον προγραμματισμό διάτρησης με δέσμη Laser στην μηχανή κατεργασίας TRUMPF TRUMATIC TLF 2530

Και στις δύο περιπτώσεις, «τυφλές» και διαμπερείς οπές, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για υλικό μαλακό χάλυβα St37, το οποίο είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο στην βιομηχανία κατασκευών αλλά και σε καθημερινές κατασκευαστικές εφαρμογές. Στην περίπτωση των «τυφλών» οπών, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια πάχους 10mm, ενώ στην περίπτωση των διαμπερών οπών σε δοκίμια πάχους 2mm.

Στον Πίνακα 3-2 και στο Σχήμα 3-4 που ακολουθούν φαίνονται η τυπική σύσταση και οι βασικές θερμικές ιδιότητες του μαλακού χάλυβα St37, αντίστοιχα:

Χημική σύσταση μαλακού χάλυβα St.37				
Fe	C	Mn	P	S (wt%)
bal.	0.2	0.4	0.04	0.05
Ιδιότητες χάλυβα St.37				
Σημείο τήξης				1808 K
Κρίσιμη τιμή πυκνότητας ισχύος				$4 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$

Πίνακας 3-2: Ιδιότητες χάλυβα τύπου St37 ([3],[5],[6]).

Σχήμα 3-4: Θερμικές ιδιότητες μαλακού χάλυβα St37 συναρτήσει της θερμοκρασίας ([5]).

3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.3.1 «ΤΥΦΛΕΣ» ΟΠΕΣ

Για την πειραματική διερεύνηση της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης *Laser*, πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων και μετρήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής τα οποία συμπεριλαμβάνουν το βάθος και την διάμετρο εισόδου. Οι παράμετροι των οποίων η επίδραση στο αποτέλεσμα της διεργασίας διερευνήθηκε, ήταν η ισχύς της δέσμης *Laser*, η θέση του επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου, ο χρόνος δράσης της δέσμης και η συχνότητα των παλμών. Κάθε παράμετρος μεταβλήθηκε μέσα σε συγκεκριμένο εύρος τιμών. Στον Πίνακα 3-3 που ακολουθεί φαίνονται οι τιμές των παραμέτρων κατά την πειραματική διερεύνηση στην περίπτωση των «τυφλών» οπών:

Παράμετρος	Τιμή 1	Τιμή 2	Τιμή 3
Ισχύς (Watt)	500	1000	1500
Συχνότητα (Hz)	1000	5000	10000
Θέση επιπέδου εστίασης (mm)	-2	0	+2
Χρόνος δράσης (sec)	1	3.5	6

Πίνακας 3-3: Παράμετροι κατά την πειραματική διερεύνηση στην περίπτωση "τυφλών" οπών.

Ο σχεδιασμός και η οργάνωση των πειραμάτων έγινε κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να είναι δυνατός ο προσδιορισμός της επίδρασης της κάθε παραμέτρου στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής (*Full Factorial design of experiments*) καλύπτοντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς μεταξύ των παραμέτρων. Κάθε πείραμα επαναλήφθηκε τρείς φορές και λήφθηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων για κάθε γεωμετρικό χαρακτηριστικό.

3.3.1.1 ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

Για την αποτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των οπών, εξαιτίας της φύσης των δοκιμίων, δεν ήταν δυνατή η μέτρηση του βάθους διάτρησης τεμαχίζοντας και φωτογραφίζοντας τα δοκίμια, έτσι η μέτρηση του βάθους πραγματοποιήθηκε με ένα μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων (*Scanning Electron Microscope - SEM*) το οποίο βρίσκεται στο Ερευνητικό Ινστιτούτο Χημικής Μηχανικής και Χημικών Διεργασιών Υψηλής Θερμοκρασίας – ΙΤΕ/ΕΙΧΗΜΥΘ³.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: αρχικά μετά την εισαγωγή των δοκιμίων στο θάλαμο κενού του μικροσκοπίου, η δέσμη των ηλεκτρονίων εστιαζόταν στην επιφάνεια του δοκιμίου και καταγραφόταν η κάθετη απόσταση από τον ανιχνευτή, μέσω του συστήματος ελέγχου του συστήματος. Στην συνέχεια, η δέσμη ηλεκτρονίων εστιαζόταν στο κάτω μέρος της οπής και καταγραφόταν πάλι η θέση του επιπέδου εστίασης σε σχέση με το ανιχνευτή. Έτσι, από την διαφορά των αποστάσεων των επιπέδων εστίασης, μετρήθηκε το βάθος διάτρησης.

Σχήμα 3-5: Εικόνες SEM «τυφλών» οπών.

³ ΙΤΕ/ΕΙΧΗΜΥΘ: URL: <http://www.iceht.forth.gr/index-gr.html>

Στο Σχήμα 3-6, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για το βάθος διάτρησης για την περίπτωση "τυφλών" οπών συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας.

Όπως φαίνεται από τα πειραματικά αποτελέσματα, αύξηση της ισχύος και της χρονικής διάρκειας της διεργασίας έχει σαν αποτέλεσμα, κατά κανόνα, την αύξηση του βάθους διάτρησης.

(α)

(β)

Συχνότητα παλμών: 1KHz

Σχήμα 3-6: Πειραματικά αποτελέσματα για το βάθος διάτρησης στην περίπτωση "τυφλών" οπών συναρτήσει των παραμέτρων τις διεργασίας (α) για συχνότητα παλμών 10KHz, (β) για συχνότητα παλμών 5KHz και (γ) για συχνότητα παλμών 1KHz.

Αυτό μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη ότι αύξηση της ισχύος ή του χρόνου, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της προσφερόμενης στο υλικό ενέργειας και κατά συνέπεια την αύξηση της ποσότητας του υλικού το οποίο τήκεται. Είναι εμφανές επίσης, ότι η σχέση δεν είναι γραμμική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει μια κρίσιμη τιμή της ενεργειακής πυκνότητας η οποία μπορεί να προκαλέσει τήξη του υλικού και στην περίπτωση τυπικών μαλακών χαλύβων, όπως ο St37, είναι περίπου $PD_{crit.} = 4 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ ([6]). Καθώς μεγαλώνει το βάθος διάτρησης, η διάμετρος της δέσμης *Laser* που προσπίπτει στην επιφάνεια του υλικού αλλάζει και κατά συνέπεια αλλάζει και η ενεργειακή πυκνότητα. Όταν η τιμή της ενεργειακής πυκνότητας γίνει μικρότερη από αυτή την κρίσιμη τιμή, τότε το βάθος δεν αυξάνει πλέον όση επιπλέον ενέργεια και να προσφερθεί στο υλικό. Επίσης, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, το μεγαλύτερο βάθος διάτρησης επιτυγχάνεται όταν η θέση του επιπέδου εστίασης βρίσκεται στην επιφάνεια του υλικού. Αυτό οφείλεται, στο γεγονός ότι στο επίπεδο εστίασης επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα της δέσμης και όταν αυτό βρίσκεται στην επιφάνεια του υλικού ο ρυθμός τήξης του υλικού και κατά συνέπεια ο ρυθμός αφαίρεσης του υλικού είναι πολύ μεγαλύτερος σε σύγκριση με τις περιπτώσεις που η θέση του επιπέδου εστίασης βρίσκεται πάνω ή κάτω από την επιφάνεια του υλικού, εξαιτίας του γεγονότος ότι μετά την απορρόφηση της ακτινοβολίας από ένα λεπτό

στρώμα, ό κύριος τρόπος μετάδοσης θερμότητας είναι μέσω αγωγής και εξαρτάται από την διαφορά θερμοκρασίας του υλικού.

Επίσης, όπως φαίνεται η συχνότητα των παλμών έχει μικρή επίδραση στο βάθος διάτρησης, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με αποτελέσματα από την βιβλιογραφία ([5]) και οφείλεται στο ότι η θερμοκρασία του υλικού δεν μειώνεται σημαντικά κατά την διάρκεια του σταδίου ψύξης, ο οποίος και καθορίζεται από την διάρκεια της περιόδου του παλμού καθώς η διάρκεια του σταδίου θέρμανσης στην προκειμένη περίπτωση είναι σταθερή. Κατά κανόνα, παρατηρείται ότι για μικρότερες συχνότητες το βάθος διάτρησης είναι μεγαλύτερο, που οφείλεται στην αύξηση του χρόνου που η δέσμη δεν ενεργεί στην διάρκεια ενός παλμού, γεγονός που οδηγεί στην αποτελεσματικότερη διάχυση της θερμότητας στο εσωτερικό του υλικού.

3.3.1.2 ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ

Όσον αφορά την διάμετρο εισόδου, και σε αυτή την περίπτωση ελήφθησαν φωτογραφίες σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων και οι μετρήσεις των οπών έγιναν με την βοήθεια ειδικού λογισμικού επεξεργασίας εικόνων που διαθέτει η συσκευή. Τυπικές εικόνες *SEM* οπών και αντίστοιχες μετρήσεις της διαμέτρου φαίνονται στο Σχήμα 3-7.

Σχήμα 3-7: Εικόνες SEM τυφλών οπών και μετρήσεις διαμέτρων.

Τα πειραματικά αποτελέσματα για την διάμετρο εισόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-8.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η διάμετρος εισόδου γενικά φαίνεται να αυξάνει με την αύξηση της ισχύος αλλά και για θέσεις του επιπέδου εστίασης πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου. Αύξηση της ισχύος της δέσμης, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της διαμέτρου εισόδου εξαιτίας του γεγονότος ότι αυξάνει η προσφερόμενη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και κατά συνέπεια αυξάνει η επιφάνεια η οποία επηρεάζεται θερμικά. Όσον αφορά την θέση του επιπέδου εστίασης, εξαιτίας της μεταβολής της διαμέτρου της δέσμης με το βάθος (Εξίσωση 3-2), σε οποιαδήποτε θέση, πάνω ή κάτω από το επίπεδο εστίασης, η διάμετρος της δέσμης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν στο επίπεδο εστίασης και αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της επηρεαζόμενης περιοχής. Παρατηρείται ότι η διάμετρος εισόδου της οπής, είναι μεγαλύτερη για θέσεις του επιπέδου εστίασης πάνω από την επιφάνεια του υλικού.

(β)

(γ)

Σχήμα 3-8: Πειραματικά αποτελέσματα για την διάμετρο εισόδου στην περίπτωση "τυφλών" όπών συναρτήσει των παραμέτρων τις διεργασίας (α) για συχνότητα παλμών 10KHz, (β) για συχνότητα παλμών 5KHz και (γ) για συχνότητα παλμών 1KHz.

Σε αυτή την περίπτωση, η διάμετρος εισόδου αυξάνει εξαιτίας της συγκέντρωσης της θερμότητας πιο κοντά στην επιφάνεια για περισσότερο χρόνο και την διάχυση της στην ακτινική διεύθυνση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για θέσεις του επιπέδου εστίασης πάνω από την επιφάνεια του υλικού, η ταχύτητα διάτρησης είναι μικρότερη, συγκρινόμενη με τις αντίστοιχες θέσεις κάτω από την επιφάνεια του υλικού διότι καθώς αυξάνει το βάθος της οπής μειώνεται η πυκνότητα ισχύος της δέσμης που προσπίπτει στην κάτω επιφάνεια της οπής, ενώ για αντίστοιχες θέσεις κάτω από την επιφάνεια του υλικού καθώς αυξάνει το βάθος (έως την θέση του επιπέδου εστίασης) αυξάνει η πυκνότητα ισχύος. Όσον αφορά την επίδραση της συχνότητας των παλμών, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η διάμετρος εισόδου αυξάνει με την αύξηση της συχνότητας, γεγονός που οφείλεται στην μείωση του χρόνου που δεν ενεργεί η δέσμη, στην διάρκεια ενός παλμού. Παρ' όλα αυτά, όπως και στο βάθος διάτρησης, φαίνεται ότι η συχνότητα των παλμών έχει μικρή επίδραση στην διάμετρο εισόδου που οφείλεται στο γεγονός ότι ο χρόνος που η δέσμη δεν ενεργεί είναι αρκετά μικρός και η θερμοκρασία κατά το στάδιο ψύξης δεν μειώνεται αρκετά. Τέλος, παρατηρείται μια μικρή αύξηση της διαμέτρου εισόδου με την αύξηση του χρόνου της διεργασίας η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι αυξάνει η συνολική προσφερόμενη ενέργεια στο υλικό έχοντας σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασιακά επηρεαζόμενης περιοχής. Παρόλα αυτά, η επίδραση του χρόνου της διεργασίας επίσης δεν έχει μεγάλη επιρροή στην διάμετρο κυρίως εξαιτίας της μορφής της ενεργειακής κατανομής της δέσμης. Η ενεργειακή πυκνότητα της δέσμης μειώνεται καθώς μεγαλώνει η απόσταση από το κέντρο της δέσμης με συνέπεια να υπάρχει μια ακτινική απόσταση από το κέντρο της δέσμης όπου η πυκνότητα ισχύος της δέσμης γίνεται ίση με την κρίσιμη τιμή ικανή να προκαλέσει τήξη του υλικού. Εάν η πυκνότητα ισχύος είναι μικρότερη από την κρίσιμη τιμή, ανεξάρτητα από τον χρόνο δράσης της δέσμης, δεν θα προκληθεί τήξη του υλικού.

3.3.2 ΔΙΑΜΠΕΡΕΙΣ ΟΠΕΣ

Επίσης στα πλαίσια της πειραματικής διερεύνησης της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης *Laser*, πραγματοποιήθηκαν και πειράματα για την περίπτωση δημιουργίας διαμπερών οπών. Σε αυτή την ομάδα πειραμάτων η συχνότητα των παλμών διατηρήθηκε σταθερή για όλα τα πειράματα, καθώς τα αποτελέσματα για την περίπτωση των «τυφλών» οπών έδειξαν ότι η συγκεκριμένη παράμετρος δεν επηρεάζει σημαντικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής. Έτσι οι παράμετροι που μεταβλήθηκαν ήταν η ισχύς της δέσμης, η θέση του επιπέδου εστίασης και ο χρόνος της διεργασίας. Στον Πίνακα 3-4 φαίνονται οι τιμές των παραμέτρων κατά την πειραματική διερεύνηση για την περίπτωση διαμπερών οπών.

Παράμετρος	Τιμή 1	Τιμή 2	Τιμή 3	Τιμή 4
Ισχύς (Watt)	600	800	1000	1200
Θέση επιπέδου εστίασης (mm)	-2	0	2	-
Χρόνος δράσης (sec)	1	2	3	4

Πίνακας 3-4: Παράμετροι κατά την πειραματική διερεύνηση στην περίπτωση διαμπερών οπών

Και σε αυτή την περίπτωση ο σχεδιασμός των πειραμάτων έγινε καλύπτοντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς μεταξύ των παραμέτρων, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε μαλακό χάλυβα *St37* πάχους *2mm* και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν ήταν η διάμετρος εισόδου και εξόδου της οπής.

Σε αυτή την περίπτωση, η παρατήρηση και φωτογράφιση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου, ελήφθησαν εικόνες και οι αντίστοιχες μετρήσεις των διαμέτρων εισόδου και εξόδου έγιναν με την βοήθεια ειδικού λογισμικού εργαλείου επεξεργασίας εικόνων. Όπως και για τις «τυφλές» οπές, για την καλύτερη αποτίμηση των διαμέτρων των οπών, για κάθε οπή πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές μετρήσεις των διαμέτρων εισόδου και εξόδου και υπολογίστηκε ο μέσος όρος τους.

(β) Διάμετροι εξόδου

Σχήμα 3-9: Φωτογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διαμπερών οπών (α) διαμέτρων εισόδου και (β) διαμέτρων εξόδου.

3.3.2.1 ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ

Στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η μεταβολή της διαμέτρου εισόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας για την περίπτωση διαμπερών οπών.

Σχήμα 3-10: Διάμετρος εισόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η διάμετρος εισόδου αυξάνει με την αύξηση της ισχύος, γεγονός το οποίο είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι μεγαλύτερη ισχύς έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της επιφάνειας που επηρεάζεται θερμικά. Επίσης, παρατηρείται ότι για θέση του επιπέδου εστίασης στην επιφάνεια του δοκιμίου, η διάμετρος εισόδου έχει την μικρότερη τιμή, συγκρινόμενη με αυτές για θέσεις του επιπέδου εστίασης επάνω και κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η δέσμη έχει την μικρότερη διάμετρο στο επίπεδο εστίασης και κατά συνέπεια όταν αυτό τοποθετείται στην επιφάνεια του δοκιμίου έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της διαμέτρου εισόδου.

Σχήμα 3-11: Θέσεις επιπέδων εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου.

Επίσης, παρατηρείται, όπως και στην περίπτωση της διαμέτρου εισόδου των «τυφλών» οπών, ότι ο χρόνος δράσης της δέσμης έχει πολύ μικρή επίδραση. Όπως προαναφέρθηκε αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην μορφή της ενεργειακής κατανομής της δέσμης και την κρίσιμη τιμή της πυκνότητας ισχύος της δέσμης ικανή να προκαλέσει τήξη του υλικού.

3.3.2.2 ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ

Στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται αντίστοιχα η μεταβολή της διαμέτρου εξόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας για την περίπτωση διαμπερών οπών.

Και σε αυτή την περίπτωση, η διάμετρος εξόδου αυξάνει με την αύξηση της ισχύος εξαιτίας της μεγαλύτερης θερμικά επηρεαζόμενης περιοχής. Επίσης, παρατηρείται ότι η διάμετρος εξόδου αυξάνει καθώς η θέση του επιπέδου εστίασης μεταβαίνει από αρνητικές σε θετικές τιμές, γεγονός που οφείλεται στο γεγονός ότι αυξάνει η διάμετρος της δέσμης που αντιστοιχεί στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου. Και σε αυτή την περίπτωση, ο χρόνος δράσης της δέσμης δεν διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση της διαμέτρου εξόδου της οπής.

Σχήμα 3-12: Διάμετρος εξόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας.

3.3.2.3 ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ

Ένας από τους κύριους στόχους κατά την διάτρηση με δέσμη *Laser* είναι η παραλληλότητα της οπής, δηλαδή η μείωση της κωνικότητας η οποία σχηματίζεται κυρίως εξαιτίας της μεταβολή της διαμέτρου της δέσμης συναρτήσει της απόστασης από το επίπεδο εστίασης (που έχει ως συνέπεια την μεταβολή της πυκνότητας ισχύος) αλλά και εξαιτίας της ροής τους βοηθητικού αερίου και του μηχανισμού αφαίρεσης τους τήγματος από την κοιλότητα της οπής. Ένας τρόπος για την μείωση της κωνικότητας είναι η δημιουργία οπών χρησιμοποιώντας την τεχνική της διάτρησης με κοπή (*trepanning drilling*). Αλλά αυτή η τεχνική είναι πολύ πιο αργή σε σχέση με την κρουστική διάτρηση και χρησιμοποιείται για οπές αρκετά μεγάλης διαμέτρου ([7]). Είναι φανερό ότι στόχος κατά την διάτρηση με δέσμη *Laser*, εκτός της επίτευξης της επιθυμητής διαμέτρου, είναι η διατήρηση της κωνικότητας σε όσο το δυνατόν πιο χαμηλά επίπεδα, δηλαδή η δημιουργία οπών με ισοδύναμες διαμέτρους εισόδου και εξόδου.

Ένα μέτρο της κωνικότητας είναι ο λόγος της διαμέτρου εισόδου προς την διάμετρο εξόδου ($D_{ent.} / D_{exi.}$). Όσο αυτός ο λόγος πλησιάζει την μονάδα, τόσο μικρότερη είναι η κωνικότητα καθώς η διάμετρος εισόδου και εξόδου τείνουν να γίνουν ίσες. Επίσης, ο λόγος των δύο διαμέτρων είναι ένα πιο γενικευμένο μέτρο της κωνικότητας σε σχέση με την γωνία κωνικότητας καθώς η τελευταία εξαρτάται τόσο από τις διαμέτρους, όσο και από το πάχος του υλικού. Για αυτό τον λόγο, στην παρούσα εργασία ως μέτρο αξιολόγησης της κωνικότητας των διαμπερών οπών χρησιμοποιήθηκε ο λόγος των διαμέτρων.

Στα γραφήματα που ακολουθούν, απεικονίζεται η μεταβολή του λόγου των διαμέτρων συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας.

Σχετικά με τη κωνικότητα της οπής, παρατηρείται ότι οι υψηλότερες τιμές κωνικότητας, δηλαδή μεγάλος λόγος διαμέτρου εισόδου προς διάμετρο εξόδου, εμφανίζονται με το συνδυασμό του αρνητικού επιπέδου εστίασης και της υψηλής ισχύος. Όπως έχει αναφερθεί, με χρήση αρνητικού επιπέδου εστίασης μειώνεται η διάμετρος της δέσμης που αντιστοιχεί στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου και με ταυτόχρονη αύξηση ισχύος αυξάνεται η διάμετρος εισόδου της οπής σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι αυξάνεται η διάμετρος εξόδου. Η μικρότερη κωνικότητα παρατηρείται για θετικές τιμές της θέσης του επιπέδου εστίασης καθώς η διάμετρος εξόδου αυξάνει σημαντικά σε σχέση με την διάμετρο εισόδου.

Σχήμα 3-13: Αναλογία διαμέτρων εισόδου και εξόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας.

Μικρή κωνικότητα παρουσιάζουν επίσης ο συνδυασμός μικρής τιμής ισχύος και αρνητικού επιπέδου εστίασης, διότι σε αυτές τις συνθήκες είναι μικρότερη η διάμετρος εισόδου και μεγαλύτερη η διάμετρος εξόδου της οπής, όπως εξηγήθηκε προηγουμένα.

3.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Semak VV, R.J. Steele, P.W. Fuerschbach, B.K. Damkroger, (2000), “Role of beam absorption in plasma during laser welding”. Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 33, pp. 1179–1185, doi:10.1088/0022-3727/33/10/307.
- [2] Tsoukantas G, K. Salonitis, A. Stournaras, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris, (2005), “On optical design limitations of generalized two-mirror remote beam delivery laser systems: the case of remote welding”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 32/(9–10), pp. 932–941. doi:10.1007/s00170-005-0400-7.
- [3] LIA “Handbook of Laser materials processing”, Editor in chief: J.F. Ready, 2001, Magnolia Publishing, Inc.
- [4] A. Stournaras, K. Salonitis, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris, (2008), “Theoretical and experimental investigation of pulsed laser grooving process”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170-008-1818-5.
- [5] Salonitis, K., A. Stournaras, G. Tsoukantas, P. Stavropoulos and G.Chryssolouris, (2007), "A Theoretical and Experimental Investigation on Limitations of Pulsed Laser Drilling", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 183/1, pp. 96-103.
- [6] Grigoryants A. (1994), “Basics of Laser material processing”, Mir Publishers.
- [7] Li L., D.K.Y. Low, M. Ghoresi, J.R. Crookal, (2002), "Hole taper characterization and control in Laser percussion drilling", CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 51/1, pp. 153-156.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εμπειρική μοντελοποίηση της διεργασίας χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους ανάλυσης και επεξεργασίας των δεδομένων που προέκυψαν από την πειραματική διερεύνηση. Δημιουργήθηκαν εμπειρικά πρότυπα τόσο για το βάθος διάτρησης και την διάμετρο εισόδου για τις «τυφλές» οπές όσο και για την διάμετρο εισόδου και εξόδου για τις διαμπερείς οπές με απώτερο σκοπό την χρήση τους στο ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου της διεργασίας.

4.2 ΑΡΧΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Το αντικείμενο πολλών ερευνητικών δραστηριοτήτων είναι η κατανόηση και εξήγηση των σχέσεων μεταξύ μεταβλητών με κύριο ζητούμενο την πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας εξαρτημένης μεταβλητής (π.χ. αποτέλεσμα διεργασίας) σε σχέση με τις ανεξάρτητες μεταβλητές (π.χ. παράμετροι διεργασίας). Τα μοντέλα μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δύο γενικές κατηγορίες ανάλογα με την μεθοδολογία ανάπτυξης τους: σε αυτά που αναπτύσσονται με βάση τις φυσικές συσχετίσεις και σε αυτά που αναπτύσσονται με βάση εμπειρικά μέσα ([1]).

Τα φυσικά μοντέλα εξάγονται από την κατανόηση των βασικών φυσικών αρχών που διέπουν την διεργασία. Έχοντας προκαθορισμένους και συγκεκριμένους στόχους (π.χ. την μοντελοποίηση του θερμοκρασιακού πεδίου που αναπτύσσεται κατά την διάρκεια της διεργασίας), σχετικοί φυσικοί μηχανισμοί επιλέγονται ούτως ώστε να εξαχθεί ένα ποιοτικό μοντέλο. Έπειτα, το φυσικό μοντέλο αναπτύσσεται σε συμφωνία με τους φυσικούς νόμους, χρησιμοποιώντας μια μαθηματική μορφοποίηση του ποιοτικού μοντέλου. Τα φυσικά μοντέλα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω ανάλογα με την μέθοδο μοντελοποίησης που χρησιμοποιείτε σε αμιγώς φυσικά, σε αριθμητικά μοντέλα, σε μοντέλα που επιλύονται με την χρήση της μεθόδου μοριακής δυναμικής, κλπ.

Τα αμιγώς φυσικά μοντέλα βασίζονται στην επίλυση των εξισώσεων μέσω αναλυτικών μεθόδων. Παράδειγμα αμιγούς φυσικού μοντέλου είναι το μοντέλο κινούμενης πηγής θερμότητας των *Carslaw* και *Jaeger* (1959) ([3]) που χρησιμοποιείται κατά κόρων για την προσομοίωση του θερμοκρασιακού πεδίου σε διάφορες διεργασίες με δέσμη *Laser*.

Σχήμα 4-1: Φυσική και εμπειρική μοντελοποίηση ([2]).

Τα αριθμητικά μοντέλα από την άλλη πλευρά χρησιμοποιούν αριθμητικές μεθόδους (όπως η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Element Analysis* - *FEA*) και η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (*Finite Differences Analysis* - *FDA*)) για την επίλυση, γραμμικών και μη, μερικών διαφορικών εξισώσεων μέσω της διακριτοποίησης της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία και την απλοποίηση των μερικών διαφορικών εξισώσεων σε αριθμητικές ή συνήθεις διαφορικές εξισώσεις ([4]). Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται κατά κόρων στην μοντελοποίηση των διαφόρων κατεργασιών για τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού πεδίου, της κατανομής των εσωτερικών τάσεων του κατεργαζόμενου εξαρτήματος, των δυνάμεων αλληλεπίδρασης, των μετασχηματισμών της κρυσταλλικής δομής, κλπ. Σε πολλές όμως περιπτώσεις η δημιουργία τέτοιου είδους μοντέλων είναι πολύπλοκη, ειδικά όταν αυξάνεται ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών, δηλαδή των παραμέτρων που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της διεργασίας. Επίσης, η εισαγωγή πολλών παραδοχών είναι πολλές φορές αναπόφευκτη προκειμένου να απλοποιηθεί η διαδικασία επίλυσης, γεγονός που οδηγεί σε αποκλίσεις σε σχέση με την πραγματική απόκριση του φαινομένου/διεργασία που μοντελοποιείται.

Ένας άλλος τρόπος για την εξαγωγή σχέσεων μεταξύ των εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών είναι η προσέγγιση των σχέσεων αυτών και η δημιουργία μοντέλων τους τα οποία περιγράφουν τα χαρακτηριστικά τους. Αυτά τα μοντέλα δεν είναι πλέον «αιτιοκρατικά» αλλά στατιστικά. Η εξαρτημένη μεταβλητή, π.χ. Y , θεωρείται ότι είμαι μια τυχαία μεταβλητή η οποία διακυμαίνεται γύρω από μια μέση τιμή η οποία όμως εξαρτάται από τις τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών. Σε αντίθεση με τα φυσικά μοντέλα, τα εμπειρικά πρότυπα δημιουργούνται με βάση πειραματικά αποτελέσματα. Σύμφωνα με τους στόχους της μοντελοποίησης, διεξάγονται πειράματα και όλα τα σχετικά χαρακτηριστικά εισόδου και εξόδου καταγράφονται. Στην συνέχεια

τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων αξιολογούνται και επιλέγεται ένας τύπος πρότυπου για να προσδιοριστούν οι συσχετισμοί μεταξύ της εισόδου και της εξόδου. Οι συσχετισμοί αυτοί ουσιαστικά καθορίζονται από τους συντελεστές της εμπειρικής σχέσης, ο προσδιορισμός των οποίων πραγματοποιείται με την βοήθεια αναλυτικών μεθόδων σύγκλισης χρησιμοποιώντας πληθώρα μετρήσεων. Παραδείγματα εμπειρικής μοντελοποίησης αποτελούν εφαρμογές με χρήση νευρωνικών δικτύων (*Neural networks*), μεθόδων ασαφούς λογικής (*Fuzzy logic*) καθώς και επαναληπτικής σύγκλισης (*Regression*).

Ο σκοπός της ανάπτυξης των μοντέλων, όπως έχει είδη αναφερθεί, είναι η καλύτερη κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που διέπουν την εκάστοτε διεργασία. Πρώτη πιθανή εφαρμογή τους είναι η εξαγωγή συμβουλών για τον έλεγχο της διεργασίας, οι οποίες προκύπτουν από την κατανόηση της διεργασίας που αποκτήθηκε με τη βοήθεια των μοντέλων αυτών. Άλλη πιθανή εφαρμογή είναι η χρήση των μοντέλων για την προσομοίωση της διεργασίας.

Σχήμα 4-2: Εφαρμογή μοντέλου για τον έλεγχο της διεργασίας.

Σε αυτή την περίπτωση, το μοντέλο χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των ποσοτικών αποτελεσμάτων της διεργασίας (π.χ. βάθος διάτρησης, πλάτος κοπής, κτλ.) με βάση τις εισερχόμενες μεταβλητές (παράμετροι διεργασίας, ιδιότητες υλικού, κλπ.). Τέλος, τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων της διεργασίας, για την επίτευξη τόσο των ποιοτικών στόχων της διεργασίας όσο και για τον έλεγχο αυτής. Η βελτιστοποίηση αυτή της διεργασίας λαμβάνει χώρα με τη χρήση του μοντέλου.

4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ (REGRESSION ANALYSIS)

Η επαναληπτική σύγκλιση, είναι μια μέθοδος δημιουργίας προσεγγιστικών (εμπειρικών) σχέσεων μεταξύ των ανεξάρτητων και των εξαρτημένων μεταβλητών, δηλαδή των παραμέτρων της διεργασίας και των χαρακτηριστικών του αποτελέσματος της στην συγκεκριμένη περίπτωση. Η πιο απλή μορφή της επαναληπτικής σύγκλισης είναι το

απλό γραμμικό πρότυπο, σύμφωνα με το οποίο, για μια ανεξάρτητη και μια εξαρτημένη μεταβλητή, έχει την βασική μορφή ([5]):

$$Y_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_i + \varepsilon_i \quad \text{Εξίσωση 4-1}$$

Οι βασικές παραδοχές που διέπουν την Εξίσωση 4-1, είναι:

1. x_i είναι η i_{th} τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής, όπου $i=1,2,\dots,n$.
2. Y_i είναι η i_{th} τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής, η οποία αντιστοιχεί στην τιμή x_i της ανεξάρτητης μεταβλητής, όπου $i=1,2,\dots,n$.
3. α_0 , α_1 είναι οι συντελεστές της γραμμικής σχέσης, όπου α_0 είναι το σημείο εκκίνησης της ευθείας και α_1 είναι η κλίση της.
4. Οι τυχαίες μεταβλητές $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ είναι το σφάλμα για κάθε ζεύγος τιμών $(x_i, Y)_i$. και θεωρείται ότι αυτά τα σφάλματα είναι αμοιβαία ανεξάρτητα και κανονικά κατανομημένα με μέση τιμή μηδέν (0) και διασπορά σ^2 , δηλ. $E(\varepsilon_i)=0$ και $var(\varepsilon_i)=\sigma^2$ για $i=1,2,\dots,n$.

Όπως φαίνεται, η εξαρτημένη μεταβλητή είναι το άθροισμα δύο όρων. Ο πρώτος όρος είναι " $\alpha_0 + \alpha_1 x_i$ " ο οποίος δεν είναι τυχαίος εξαιτίας του γεγονότος ότι τα α_0 και α_1 είναι οι συντελεστές και το x_i είναι σταθερά. Ο δεύτερος όρος, " ε_i ," είναι τυχαία μεταβλητή και έτσι η εξαρτημένη μεταβλητή Y_i είναι τυχαία μεταβλητή. Από την παραδοχή (4), προκύπτει ότι η εξαρτημένη μεταβλητή ανήκει σε κανονική κατανομή με μέση τιμή $E(Y_i)$ και διασπορά $var(Y_i)$, όπου:

$$E(Y_i) = E(\alpha_0 + \alpha_1 x_i + \varepsilon_i) = \alpha_0 + \alpha_1 x_i = \mu_i \quad \text{Εξίσωση 4-2}$$

$$var(Y_i) = var(\alpha_0 + \alpha_1 x_i + \varepsilon_i) = var(\varepsilon_i) = \sigma^2 \quad \text{Εξίσωση 4-3}$$

Οι συντελεστές τις Εξίσωσης 4-1 μπορούν να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας της μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (*least-squares method*) όπου οι συντελεστές υπολογίζονται με βάση την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του τετραγώνου των αποκλίσεων:

$$\min[S(\alpha_0, \alpha_1)] = \min \left(\sum_{i=1}^n [y_i - (\alpha_0 + \alpha_1 x_i)]^2 \right) \quad \text{Εξίσωση 4-4}$$

όπου y_i είναι η πειραματική τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής.

Για την εύρεση του ελάχιστου της συνάρτησης $S(\alpha_0, \alpha_1)$, οι πρώτες παράγωγοι της συνάρτησης $S(\alpha_0, \alpha_1)$ ως προς α_0 και α_1 θέτονται ίσες με το μηδέν:

$$\frac{\partial S(\alpha_0, \alpha_1)}{\partial \alpha_0} = 2 \sum_{i=1}^n [y_i - (\alpha_0 + \alpha_1 x_i)](-1) = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \alpha_0 n + \alpha_1 \sum x_i = \sum y_i$$

Εξίσωση 4-5

$$\frac{\partial S(\alpha_0, \alpha_1)}{\partial \alpha_1} = 2 \sum_{i=1}^n [y_i - (\alpha_0 + \alpha_1 x_i)](-x_i) = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \alpha_0 \sum x_i + \alpha_1 \sum x_i^2 = \sum x_i y_i$$

Εξίσωση 4-6

Η επίλυση των παραπάνω εξισώσεων οδηγεί στον προσδιορισμό των συντελεστών:

$$\alpha_1 = \frac{\sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)/n}{\sum x_i^2 - (\sum x_i^2)/n}$$

Εξίσωση 4-7

$$\alpha_0 = \bar{y} - \alpha_1 \bar{x}$$

Εξίσωση 4-8

Γνωρίζοντας πλέον τους συντελεστές α_0 και α_1 , μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής Y_i για κάθε τιμή x_i της ανεξάρτητης μεταβλητής. Η διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής (y_i) και της υπολογιζόμενης τιμής (Y_i) της εξαρτημένης μεταβλητής, ονομάζεται υπόλοιπο/σφάλμα (*residuals*):

$$e_i = y_i - Y_i = y_i - (\alpha_0 + \alpha_1 x_i)$$

Εξίσωση 4-9

Η ίδια μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί και σε πιο πολύπλοκα πρότυπα, όπως π.χ. με παραπάνω από μια ανεξάρτητες μεταβλητές και μεγαλύτερου βαθμού ως προς την ανεξάρτητη μεταβλητή, όπως π.χ. η εξίσωση της μορφής:

$$Y_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_i + \dots + \alpha_k x_i^k + \varepsilon_i$$

Εξίσωση 4-10

η οποία συνεχίζει να λέγεται γραμμική, μιας και η γραμμικότητα αναφέρεται στους συντελεστές της εξίσωσης και όχι στις ανεξάρτητες μεταβλητές.

Το πόσο καλά προσεγγίζει η εξίσωση που προκύπτει από την στατιστική ανάλυση τα πραγματικά δεδομένα, καθορίζεται από τον συντελεστή προσδιορισμού (*coefficient of determination*) R^2 , ο οποίος υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$R^2 = \frac{SSR}{SSTO} \quad \text{Εξίσωση 4-11}$$

όπου:

$$SSTO = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad \text{Εξίσωση 4-12}$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{y})^2 \quad \text{Εξίσωση 4-13}$$

όπου SSR είναι το άθροισμα τετραγώνων σύγκλισης και $SSTO$ το συνολικό άθροισμα τετραγώνων.

Ο συντελεστής R^2 παίρνει τιμές μεταξύ μηδέν και ένα ($0 \leq R^2 \leq 1$) και όσο πιο κοντά στην μονάδα βρίσκεται τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση.

Ο προσδιορισμός των ανεξάρτητων μεταβλητών, οι οποίες θα συμπεριληφθούν στο μοντέλο επαναληπτικής σύγκλισης, μπορεί να γίνει μέσω στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων και του προσδιορισμού της επίδρασης της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής στο αποτέλεσμα. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη στατιστική μέθοδος ανάλυσης πειραματικών αποτελεσμάτων είναι η *Ανάλυση της Διακύμανσης (Analysis Of Variance – ANOVA)* ([5], [6]). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της διακύμανσης μπορούν να αξιοποιηθούν για την μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας στο αποτέλεσμα καθώς και για τον προσδιορισμό των κύριων όρων του εμπειρικού προτύπου ([7]-[9]). Η ανάλυση της διακύμανσης είναι μία στατιστική μέθοδος με την οποία η μεταβλητότητα που υπάρχει σ' ένα σύνολο δεδομένων διασπάται στις επιμέρους συνιστώσες της με στόχο την κατανόηση της σημαντικότητας των διαφορετικών πηγών προέλευσής της. Στην πραγματικότητα η *ANOVA* περιλαμβάνει μία ομάδα στατιστικών μεθόδων καταλλήλων για την ανάλυση δεδομένων που προκύπτουν από πειραματικούς σχεδιασμούς. Ο στατιστικός ερευνητής προσπαθεί να ελέγξει τα επίπεδα μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων (*independent*) μεταβλητών προκειμένου να προσδιορίσει την επίδραση που έχουν πάνω στην υπό μελέτη μεταβλητή που καλείται εξαρτημένη (*dependent*) ή απόκριση (*response*). Στόχος κάθε στατιστικού πειράματος είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών πάνω στην απόκριση. Οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται συνήθως σαν παράγοντες/παράμετροι (*factors*) και μπορεί να είναι είτε ποσοτικές είτε ποιοτικές. Οι τιμές του παράγοντα που προσδιορίζονται στο πείραμα λέγονται επίπεδα (*levels*). Ένας τυπικός πίνακας αποτελεσμάτων ανάλυσης της διακύμανσης περιλαμβάνει την πηγή της επιρροής στο αποτέλεσμα, δηλαδή την ανεξάρτητη

μεταβλητή (*Source/Factor*), τους βαθμούς ελευθερίας της ανεξάρτητης μεταβλητής, το άθροισμα των τετραγώνων, το μέσο τετράγωνο και το χαρακτηριστικό F ή F -statistic.

Το άθροισμα των τετραγώνων για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή δηλώνει την επιρροή της συγκεκριμένης παραμέτρου στο αποτέλεσμα. Δηλαδή, όσο μεγαλύτερη είναι η συνεισφορά του αθροίσματος των τετραγώνων μιας παραμέτρου στο συνολικό άθροισμα τετραγώνων, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση της συγκεκριμένης παραμέτρου στο αποτέλεσμα. Η μέση τιμή των τετραγώνων υπολογίζεται από τον λόγο του αθροίσματος των τετραγώνων προς τους βαθμούς ελευθερίας της παραμέτρου και αποτελεί εκτιμητή της διακύμανσης για την συγκεκριμένη ομάδα. Τέλος, το χαρακτηριστικό F ή αλλιώς λόγος των διακυμάνσεων (*variance ratio*) υπολογίζεται από τον λόγο του μέσου τετραγώνου για κάθε παράμετρο προς το μέσο τετράγωνο του σφάλματος και υποδηλώνει την επίδραση της παραμέτρου συγκρινόμενη με την διακύμανση του σφάλματος ([6]). Επίσης, από τον λόγο του αθροίσματος των τετραγώνων προς το συνολικό άθροισμα των τετραγώνων μπορεί να προσδιοριστεί η ποσοστιαία επίδραση της κάθε παραμέτρου στο συνολικό αποτέλεσμα.

4.3.1 «ΤΥΦΛΕΣ» ΟΠΕΣ

Με βάση την μεθοδολογία επαναληπτικής σύγκλισης, δημιουργήθηκαν εμπειρικά πρότυπα τόσο για το βάθος διάτρησης όσο και για την διάμετρο εισόδου και παρουσιάζονται στην συνέχεια.

4.3.1.1 ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

Στην ανάλυση της διακύμανσης για το βάθος διάτρησης συμπεριληφθήκαν οι τέσσερις παράμετροι (Ισχύς, Συχνότητα παλμών, Θέση επιπέδου εστίασης, Χρόνος διεργασίας) καθώς και οι συνδυασμοί μεταξύ των παραμέτρων. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης της διακύμανσης (Πίνακας 4-1, Σχήμα 4-3), η ισχύς, το επίπεδο εστίασης και ο χρόνος της διεργασίας καθώς και ο συνδυασμός της ισχύος και του επιπέδου εστίασης έχουν μεγάλη επίδραση στο αποτέλεσμα της διεργασίας, δηλαδή το βάθος διάτρησης.

Έχοντας ως βάση τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης και της ανάλυσης της διακύμανσης (*ANOVA*) για το βάθος διάτρησης, αναπτύχθηκε ένα εμπειρικό πρότυπο το οποίο λαμβάνει υπόψη του την επίδραση της ισχύος της δέσμης *Laser*, την θέση του επιπέδου εστίασης, του χρόνου της διεργασίας και την αλληλεπίδραση μεταξύ της ισχύος και της θέσης του επιπέδου εστίασης.

Παράμετρος	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο	F	Prob>F
Ισχύς	52.6629	2	26.3314	135.25	0
Συχνότητα Παλμών	2.9257	2	1.4628	7.51	0.001449
Θέση επιπέδου εστίασης	7.325	2	3.6625	18.81	9.28E-07
Χρόνος διεργασίας	5.6833	2	2.8416	14.6	1.12E-05
Ισχύς*Συχν. Παλμών	1.2381	4	0.3095	1.59	0.19226
Ισχύς*Θέση επιπ. Εστίασης	2.3652	4	0.5913	3.04	0.026021
Ισχύς*Χρόνος διεργασίας	2.1803	4	0.5451	2.8	0.036121
Συχν. Παλμών*Θέση επιπ. Εστίασης	0.5715	4	0.1429	0.73	0.57342
Συχν. Παλμών*Χρόνος διεργασίας	1.0588	4	0.2647	1.36	0.26192
Θέση επιπ. Εστίασης*Χρόνος διεργασίας	0.3855	4	0.0964	0.5	0.73936
Σφάλμα	9.345	48	0.1947		
Σύνολο	85.7412	80			

Πίνακας 4-1: Ανάλυση της διακύμανσης για το βάθος διάτρησης.

Σχήμα 4-3: Ποσοστιαία επίδραση παραμέτρων στο βάθος διάτρησης

Πραγματοποιήθηκαν διάφορες απόπειρες εύρεσης της κατάλληλης σχέσης μεταξύ των ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών ξεκινώντας από την πιο απλή μορφή, την γραμμική. Τελικά, διαπιστώθηκε ότι η καλύτερη προσέγγιση μπορεί να γίνει με μια σχέση η οποία λαμβάνει υπόψη της πρώτου και δεύτερου βαθμού επιδράσεις των τριών ανεξάρτητων μεταβλητών που έχουν την μεγαλύτερη επιρροή στο βάθος διάτρησης,

καθώς και την γραμμική αλληλεπίδραση μεταξύ της ισχύος και της θέσης του επιπέδου εστίασης.

Έτσι, το προτεινόμενο εμπειρικό πρότυπο για το βάθος διάτρησης έχει την μορφή:

$$Y_{depth} = a_0 + a_1 * LP + a_2 * LP^2 + a_3 * FP + a_4 * FP^2 + a_5 * IT + a_6 * IT^2 + a_7 * (LP * FP)$$

Εξίσωση 4-14

όπου LP είναι η ισχύς της δέσμης, FP είναι η θέση του επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου, IT είναι διάρκεια της διεργασίας, και $a_0 - a_7$, είναι οι συντελεστές.

Η εύρεση των συντελεστών έγινε αριθμητικά με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (*least-squares method*) χρησιμοποιώντας το λογισμικό *Mathworks Matlab*⁴ και παρατίθενται στον Πίνακα 4-2 που ακολουθεί.

Συντελεστές προτύπου			
	Συχνότητα παλμών: 10KHz	Συχνότητα παλμών: 5KHz	Συχνότητα παλμών: 1KHz
a₀	1.2496	0.49735	0.28294
a₁	0.0011835	0.0022406	0.0058918
a₂	3.4083e-007	-7.9833e-008	-1.9666e-006
a₃	-0.26716	-0.37553	0.10912
a₄	-0.15539	-0.090238	-0.16004
a₅	0.15291	0.33508	-0.31994
a₆	-0.0029952	-0.028687	0.062915
a₇	0.00012343	0.00028244	-0.00016517
R²	0.9102	0.8807	0.7662

Πίνακας 4-2: Συντελεστές εμπειρικού προτύπου για το βάθος διάτρησης και συντελεστής προσδιορισμού.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του εμπειρικού προτύπου για το βάθος διάτρησης καθώς και το σφάλμα (*Residuals*) για κάθε περίπτωση, δηλαδή η διαφορά μεταξύ των πειραματικών και των θεωρητικών αποτελεσμάτων.

Όπως φαίνεται, ο συντελεστής R^2 κυμαίνεται από **0.7662** έως και **0.9102** (Πίνακας 4-2) γεγονός που δηλώνει ότι η προτεινόμενη εμπειρική σχέση μεταξύ εξαρτημένης και ανεξάρτητων μεταβλητών προσεγγίζει αρκετά καλά τα πειραματικά δεδομένα με τον μέσο όρο σφάλματος, δηλαδή η διαφορά μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών

⁴ The Mathworks: URL: <http://www.mathworks.com/>

τιμών, κατά απόλυτη τιμή να προσεγγίζει τα 0.31mm και το μέγιστο σφάλμα να μην ξεπερνά τα -1.24mm.

(α)

(β)

Σχήμα 4-4: Αποτελέσματα εμπειρικού προτύπου για το βάθος διάτρησης στην περίπτωση "τυφλών" όπών συναρτήσει των παραμέτρων τις διεργασίας (α) για συχνότητα παλμών 10KHz, (β) για συχνότητα παλμών 5KHz και (γ) για συχνότητα παλμών 1KHz και τα αντίστοιχα σφάλματα (Residuals) προσδιοριζόμενα από την διαφορά μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών τιμών.

4.3.1.2 ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ

Σε αυτή την περίπτωση η ανάλυση της διακύμανσης (Πίνακας 4-3, Σχήμα 4-5) έδειξε ότι η ισχύς της δέσμης, το επίπεδο εστίασης καθώς και ο συνδυασμός τους έχουν σημαντική επιρροή στην διάμετρο εισόδου της οπής και σε μικρότερο βαθμό ο χρόνος της διεργασίας.

Όπως και με το βάθος διάτρησης, έτσι και με την διάμετρο εισόδου, με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα και την ανάλυση της διακύμανσης, επιλέχθηκε ένα εμπειρικό πρότυπο το οποίο λαμβάνει υπόψη του την ισχύ της δέσμης, την θέση του επιπέδου εστίασης, τον χρόνο δράσης της δέσμης καθώς και την αλληλεπίδραση μεταξύ της ισχύος και της θέσης του επιπέδου εστίασης. Και σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιήθηκαν διάφορες απόπειρες εύρεσης των κατάλληλων όρων του προτύπου ξεκινώντας από την πιο απλή, την γραμμική. Διαπιστώθηκε ότι η καλύτερη προσέγγιση μπορεί να γίνει με μια σχέση η οποία να λαμβάνει υπόψη της πρώτου και δεύτερου βαθμού επιδράσεις των τριών ανεξάρτητων μεταβλητών που έχουν την μεγαλύτερη επιρροή στο αποτέλεσμα, καθώς και την γραμμική αλληλεπίδραση μεταξύ της ισχύος και της θέσης του επιπέδου εστίασης.

Παράμετρος	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο	F	Prob>F
Ισχύς	5.1939	2	2.59695	37.76	1.41E-10
Συχνότητα Παλμών	0.0562	2	0.02811	0.41	0.66681
Θέση επιπέδου εστίασης	4.1358	2	2.06791	30.07	3.42E-09
Χρόνος διεργασίας	0.4889	2	0.24443	3.55	0.03636
Ισχύς*Συχν. Παλμών	0.2038	4	0.05095	0.74	0.56881
Ισχύς*Θέση επιπ. Εστίασης	1.9095	4	0.47738	6.94	0.000171
Ισχύς*Χρόνος διεργασίας	0.0457	4	0.01143	0.17	0.95452
Συχν. Παλμών*Θέση επιπ. Εστίασης	0.0363	4	0.00907	0.13	0.96997
Συχν. Παλμών*Χρόνος διεργασίας	0.2216	4	0.05541	0.81	0.5277
Θέση επιπ. Εστίασης*Χρόνος διεργασίας	0.0645	4	0.01613	0.23	0.91751
Σφάλμα	3.3012	48	0.06877		
Σύνολο	15.6574	80			

Πίνακας 4-3: Ανάλυση της διακύμανσης για την διάμετρο εισόδου.

Σχήμα 4-5: Ποσοστιαία επίδραση παραμέτρων στην διάμετρο εισόδου

Έτσι το προτεινόμενο εμπειρικό πρότυπο για την διάμετρο εισόδου, έχει την μορφή:

$$y_{D_{entrance}} = a_0 + a_1 * LP + a_2 * LP^2 + a_3 * FP + a_4 * FP^2 + a_5 * IT + a_6 * IT^2 + a_7 (LP * FP)$$

Εξίσωση 4-15

όπου LP είναι η ισχύς της δέσμης, FP είναι η θέση του επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου και $a_0 - a_7$, είναι οι συντελεστές, οι οποίοι υπολογίστηκαν με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Έτσι για την διάμετρο εισόδου των "τυφλών" οπών, οι συντελεστές του εμπειρικού προτύπου είναι:

Συντελεστές προτύπου			
	Συχνότητα παλμών: 10KHz	Συχνότητα παλμών: 5KHz	Συχνότητα παλμών: 1KHz
a_0	515.6846	323.1092	-377.5561
a_1	-0.9191	-0.2077	1.1041
a_2	0.0008	0.0004	-0.0002
a_3	-88.6833	-164.5833	-26.1472
a_4	38.8597	33.0111	18.6861
a_5	105.7582	-53.5658	61.9893
a_6	-12.9724	16.3084	-3.3369
a_7	0.2252	0.3073	0.1486
R^2	0.69616	0.81846	0.87114

Πίνακας 4-4: Συντελεστές εμπειρικού προτύπου για την διάμετρο εισόδου και συντελεστής προσδιορισμού

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του εμπειρικού προτύπου για την διάμετρο εισόδου καθώς και το σφάλμα (*Residuals*) για κάθε περίπτωση, δηλαδή η διαφορά μεταξύ των πειραματικών και των θεωρητικών αποτελεσμάτων.

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4-4, για την περίπτωση της διαμέτρου εισόδου, ο συντελεστής R^2 κυμαίνεται από **0.696** έως και **0.871**. Γενικά, το προτεινόμενο εμπειρικό πρότυπο για την διάμετρο εισόδου, προσεγγίζει αρκετά καλά τα πειραματικά δεδομένα με τον μέσο όρο σφάλματος κατά απόλυτη τιμή να προσεγγίζει τα 134.59μm και το μέγιστο σφάλμα να είναι -851μm.

Συχνότητα παλμών: 10KHz

(α)

Συχνότητα παλμών: 5KHz

(β)

Σχήμα 4-6: Αποτελέσματα εμπειρικού προτύπου για την διάμετρο εισόδου στην περίπτωση "τυφλών" όπών συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας (α) για συχνότητα παλμών 10KHz, (β) για συχνότητα παλμών 5KHz και (γ) για συχνότητα παλμών 1KHz και τα αντίστοιχα σφάλματα (Residuals) προσδιοριζόμενα από την διαφορά μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών τιμών.

4.3.2 ΔΙΑΜΠΕΡΕΙΣ ΟΠΕΣ

Όπως και στην περίπτωση των "τυφλών" όπών, δημιουργήθηκαν εμπειρικά πρότυπα για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διαμπερών όπών, δηλαδή για τις διαμέτρους εισόδου και εξόδου και την κωνικότητα της οπής.

4.3.2.1 ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ

Όπως και στις «τυφλές» οπές αρχικά πραγματοποιήθηκε ανάλυση της διακύμανσης με βάση τις πειραματικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό της σημαντικότητας της κάθε παραμέτρου στην διάμετρο εισόδου της οπής.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η διάμετρος εισόδου επηρεάζεται ισχυρά από την ισχύ της δέσμης και την θέση του επιπέδου εστίασης και σε μικρό βαθμό από τον χρόνο της διεργασίας και την αλληλεπίδραση του με την θέση του επιπέδου εστίασης (Πίνακας 4-5, Σχήμα 4-7).

Παράμετρος	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο	F	Prob>F
Ισχύς	630616.667	3	210205.556	15.1781	3.58E-05
Θέση επιπ. Εστίασης	360154.167	2	180077.083	13.0026	0.000321
Χρόνος διεργασίας	134866.667	3	44955.5556	3.2461	0.046272
Ισχύς *Θέση επιπ. Εστίασης	92595.8333	6	15432.6389	1.1143	0.39262
Ισχύς*Χρόνος διεργασίας	68850	9	7650	0.55237	0.8175
Θέση επιπ. Εστίασης* Χρόνος διεργασίας	124695.833	6	20782.6389	1.5006	0.23391
Σφάλμα	249287.5	18	13849.3056		
Σύνολο	1661066.67	47			

Πίνακας 4-5: Αποτελέσματα ανάλυσης διακύμανσης για την διάμετρο εισόδου στην περίπτωση διαμπερών οπών.

Σχήμα 4-7: Ποσοστιαία επίδραση παραμέτρων στην διάμετρο εισόδου.

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της ανάλυσης της διακύμανσης, στο εμπειρικό πρότυπο για την διάμετρο εισόδου περιελήφθησαν οι επιρροές της ισχύος, της θέσης του επιπέδου εστίασης και του χρόνου της διεργασίας καθώς και του συνδυασμού της θέσης του επιπέδου εστίασης και του χρόνου της διεργασίας, όπως φαίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Y_{D_{entrance}} = a_0 + a_1 * LP + a_2 * LP^2 + a_3 * FP + a_4 * FP^2 + a_5 * IT + a_6 * IT^2 + a_7 * (FP * IT)$$

Εξίσωση 4-16

όπου LP είναι η ισχύς της δέσμης, FP είναι η θέση του επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου, IT είναι διάρκεια της διεργασίας, και $a_0 - a_7$, είναι οι συντελεστές οι οποίο υπολογίστηκαν με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Συντελεστές προτύπου	
a_0	370.0
a_1	1.1042
a_2	-0.00033333
a_3	-71.333
a_4	5.0
a_5	-1.1264e-013
a_6	30.781
a_7	15.75
R^2	0.6914

Πίνακας 4-6: Συντελεστές εμπειρικού προτύπου για την διάμετρο εισόδου και ο συντελεστής προσδιορισμού.

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης επαναληπτικής σύγκλισης για την διάμετρο εισόδου καθώς και το σφάλμα μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών τιμών απεικονίζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.

Σχήμα 4-8: Αποτελέσματα εμπειρικού προτύπου για την διάμετρο εισόδου διαμπερών οπών.

Ο συντελεστής προσδιορισμού για την διάμετρο εισόδου και το προτεινόμενο μοντέλο αγγίζει το **70%**, όπως φαίνεται από τον πίνακα 4-6 ενώ το μέγιστο σφάλμα προσεγγίζει τα 228μm και ο μέσος όρος σφάλματος κατά απόλυτη τιμή τα 85μm, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα του σχήματος 4-8.

4.3.2.2 ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ

Για την διάμετρο εξόδου των διαμπερών οπών, η ανάλυση της διακύμανσης έδειξε ότι η θέση του επιπέδου εστίασης έχει πολύ ισχυρή επίδραση καθώς και η ισχύς της δέσμης (Πίνακας 4-7, Σχήμα 4-9).

Παράμετρος	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο	F	Prob>F
Ισχύς	98789.5833	3	32929.8611	6.957	0.002633
Θέση επιπ. Εστίασης	1021400	2	510700	107.8944	9.51E-11
Χρόνος διεργασίας	52356.25	3	17452.0833	3.6871	0.031393
Ισχύς *Θέση επιπ. Εστίασης	42866.6667	6	7144.4444	1.5094	0.23114
Ισχύς*Χρόνος διεργασίας	66718.75	9	7413.1944	1.5662	0.19956
Θέση επιπ. Εστίασης*Χρόνος διεργασίας	79800	6	13300	2.8099	0.041439
Σφάλμα	85200	18	4733.3333		
Σύνολο	1447131.25	47			

Πίνακας 4-7: Αποτελέσματα ανάλυσης της διακύμανσης για την διάμετρο εξόδου στην περίπτωση διαμπερών οπών.

Σχήμα 4-9: Ποσοστιαία επίδραση παραμέτρων στην διάμετρο εξόδου.

Στην περίπτωση της διαμέτρου εξόδου των διαμπερών οπών, στο εμπειρικό πρότυπο συμπεριελήφθησαν η ισχύς, η θέση του επιπέδου εστίασης καθώς και η αλληλεπίδραση μεταξύ της θέσης του επιπέδου εστίασης και του χρόνου της διεργασίας:

$$Y_{D_{exit}} = a_0 + a_1 * LP + a_2 * LP^2 + a_3 * FP + a_4 * FP^2 + a_5 * (FP * IT) \quad \text{Εξίσωση 4-17}$$

όπου LP είναι η ισχύς της δέσμης, FP είναι η θέση του επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου, IT είναι διάρκεια της διεργασίας, και $a_0 - a_5$, είναι οι συντελεστές.

Συντελεστές προτύπου	
a_0	303.88
a_1	-0.28104
a_2	0.00026563
a_3	90.313
a_4	30.937
a_5	-3.375
R^2	0.7752

Πίνακας 4-8: Συντελεστές εμπειρικού προτύπου για την διάμετρο εξόδου και ο συντελεστής προσδιορισμού.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το πρότυπο της διαμέτρου εξόδου.

Χρόνος διεργασίας: 1sec

Χρόνος διεργασίας: 2sec

Σχήμα 4-10: Αποτελέσματα εμπειρικού προτύπου για την διάμετρο εξόδου διαμερών οπών.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η προτεινόμενη εμπειρική σχέση για την διάμετρο εξόδου προσεγγίζει αρκετά καλά τα πειραματικά δεδομένα καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού αγγίζει την τιμή **0.78** και το μέγιστο σφάλμα είναι σχεδόν 356μm ενώ η τιμή του μέσου απόλυτου σφάλματος είναι σχεδόν 132μm.

Επίσης, παρατηρείται ότι το εμπειρικό πρότυπο για την διάμετρο εξόδου προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα σε σύγκριση με το αντίστοιχο πρότυπο για την διάμετρο εισόδου ($R^2_{Dentr} \approx 0.7$, $R^2_{Dexitr} \approx 0.78$). Αυτό κατά κανόνα οφείλεται στο γεγονός ότι η μέτρηση των διαμέτρων εισόδου ήταν πιο δύσκολη εξαιτίας της εναπόθεσης τήγματος στην περιφέρεια της οπής αλλά και στο γεγονός ότι σε πολλές περιπτώσεις η είσοδος της οπής παρουσιάζει ένα ελλειψοειδές σχήμα, γεγονός που συμβάλει σημαντικά στην εισαγωγή σφάλματος κατά τις μετρήσεις (Σχήμα 4-11).

Σχήμα 4-11: Φωτογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου επιφανειών (α) εισόδου και (β) εξόδου διαμπερών οπών.

4.3.2.3 ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑ

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.3.2.3, η κωνικότητα λήφθηκε υπόψη μέσω του λόγου των διαμέτρων εισόδου και εξόδου, ως ένα πιο γενικό κριτήριο, ανεξάρτητο από το πάχος του υλικού.

Όπως και στις περιπτώσεις των διαμέτρων εισόδου και εξόδου, πραγματοποιήθηκε ανάλυση της διακύμανσης και για τον λόγο των διαμέτρων.

Παράμετρος	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο	F	Prob>F
Ισχύς	1.925	3	0.64167	0.67996	0.57566
Θέση επιπ. Εστίασης	49.4668	2	24.7334	26.2095	4.66E-06
Χρόνος διεργασίας	3.3966	3	1.1322	1.1998	0.33816
Ισχύς *Θέση επιπ. Εστίασης	2.1286	6	0.35477	0.37594	0.88475
Ισχύς*Χρόνος διεργασίας	10.609	9	1.1788	1.2491	0.32743
Θέση επιπ. Εστίασης*Χρόνος διεργασίας	3.6874	6	0.61456	0.65124	0.68892
Σφάλμα	16.9863	18	0.94368		
Σύνολο	88.1998	47			

Πίνακας 4-9: Αποτελέσματα ανάλυσης διακύμανσης για τον λόγο των διαμέτρων εισόδου και εξόδου στην περίπτωση διαμπερών οπών.

Σχήμα 4-12: Ποσοστιαία επίδραση παραμέτρων στον λόγο των διαμέτρων.

Όπως ήταν αναμενόμενο, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο λόγος των διαμέτρων εξαρτάται ισχυρά από την κοινή παράμετρο επιρροής τους, την θέση του επιπέδου εστίασης, καθώς και από την γραμμική αλληλεπίδραση μεταξύ της ισχύος και του χρόνου της διεργασίας, δηλαδή της ενέργειας που προσφέρεται στο υλικό (Πίνακας 4-9, Σχήμα 4-12).

Για την περίπτωση του λόγου των διαμέτρων εισόδου και εξόδου της οπής, το εμπειρικό πρότυπο έχει την μορφή:

$$Y_{Ratio} = a_0 + a_1 * LP + a_2 * LP^2 + a_3 * FP + a_4 * FP^2 + a_5 * IT + a_6 * IT^2 + a_7 * (LP * IT)$$

Εξίσωση 4-18

όπου LP είναι η ισχύς της δέσμης, FP είναι η θέση του επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου, IT είναι διάρκεια της διεργασίας, και $a_0 - a_7$, είναι οι συντελεστές.

Συντελεστές προτύπου	
a_0	3.3687
a_1	0.0029216
a_2	-1.4051e-006
a_3	-0.70309
a_4	0.21704
a_5	-0.61801
a_6	-0.058254
a_7	-0.00050084
R^2	0.6200

Πίνακας 4-10: Συντελεστές εμπειρικού προτύπου για τον λόγο των διαμέτρων και ο συντελεστής προσδιορισμού.

Στην συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα του εμπειρικού προτύπου για τον λόγο των διαμέτρων εισόδου και εξόδου των διαμπερών οπών που περιγράφεται από την εξίσωση 4-18 καθώς και τα αντίστοιχα σφάλματα.

Χρόνος διεργασίας: 1sec

Χρόνος διεργασίας: 2sec

Χρόνος διεργασίας: 3sec

Χρόνος διεργασίας: 4sec

Σχήμα 4-13: Αποτελέσματα εμπειρικού προτύπου για τον λόγο των διαμέτρων εισόδου και εξόδου των διαμερών οπών.

Το προτεινόμενο εμπειρικό πρότυπο για τον χαρακτηρισμό της κωνικότητας της οπής, όπως φαίνεται, δεν προσεγγίζει αρκετά καλά την πραγματική συμπεριφορά του συγκεκριμένου χαρακτηριστικού καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι **0.62**. Επίσης, το μέγιστο σφάλμα είναι περίπου -3.33 και η μέση τιμή του απόλυτου σφάλματος αγγίζει την τιμή 0.56. Η απόκλιση αυτή οφείλεται κυρίως στην δυναμική συμπεριφορά της διεργασίας, καθώς η κωνικότητα επηρεάζεται από πληθώρα παραγόντων, όπως είναι οι μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας, οι μηχανισμοί εκτίναξης του τήγματος, η ροή του βοηθητικού αερίου, κ.α., που είναι δύσκολο να προβλεφθούν.

Παρά το γεγονός ότι τα εμπειρικά πρότυπα που παρουσιάστηκαν αναπτύχθηκαν με βάση πειραματικά δεδομένα για διάτρηση μαλακού χάλυβα *St37*, η χρησιμότητα τους μπορεί να επεκταθεί και για άλλα μεταλλικά υλικά της ίδιας «οικογένειας», χρησιμοποιώντας συντελεστές προσαρμογής. Οι διορθωτικοί αυτοί συντελεστές μπορούν να προσδιοριστούν σχετικά εύκολα χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα.

4.4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΟΠΗΣ.

Χρησιμοποιώντας τα πρότυπα επαναληπτικής σύγκλισης που αναπτύχθηκαν, είναι δυνατή η εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των οπών συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας. Έτσι, για συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων της διεργασίας, μπορεί να υπολογιστεί το βάθος καθώς και η διάμετρος εισόδου της οπής για την περίπτωση «τυφλών» οπών και η διάμετρος εισόδου και εξόδου για την περίπτωση διαμερών οπών. Με αυτό τον τρόπο, για διάφορες τιμές παραμέτρων,

αναπτύχθηκαν βάσεις δεδομένων υπολογισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών για συνδυασμούς των παραμέτρων της διεργασίας με την μορφή πινάκων (Παράρτημα Δ).

Η χρήση των βάσεων δεδομένων είναι διπλή και αμφίδρομη. Χρησιμοποιώντας τις βάσεις δεδομένων μπορεί κανείς να εκτιμήσει την τιμή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών για συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων ή έχοντας ως δεδομένο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής, μπορεί να γίνει προσδιορισμός των τιμών των παραμέτρων προκειμένου να επιτευχθεί οπή με συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει ένας αρχικός προγραμματισμός της διεργασίας χωρίς να είναι απαραίτητη η διενέργεια προκαταρκτικών δοκιμών για τον προσδιορισμό των παραμέτρων, συμβάλλοντας τόσο στην μείωση του συνολικού χρόνου, όσο και στην μείωση του κόστους.

Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα, οι δυνατές λύσεις μπορεί να είναι παραπάνω από μια. Σε αυτή την περίπτωση η επιλογή της βέλτιστης γίνεται θέτοντας κάποια κριτήρια, όπως είναι ελάχιστος χρόνος διεργασίας, ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, ελάχιστη ροή θερμότητας στο υλικό, κτλ.

The figure displays a series of data tables organized by hole depth (500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200, 1250, 1300, 1350, 1400, 1450, 1500). Each depth has a corresponding table with columns for parameters (0, 1, 2, -2, -1, 0, 1, 2, -2, -1, 0, 1, 2) and a final column for the result (IT). Red and green circles highlight specific data points and trends across the tables.

Σχήμα 4-14: Παράδειγμα εκτίμησης βάθους οπής για συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων καθώς και προσδιορισμού παραμέτρων για συγκεκριμένο βάθος οπής μέσω της βάσης δεδομένων.

Παραδείγματα εφαρμογής και χρήσης των βάσεων δεδομένων που αναπτύχθηκαν, παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6.

4.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Profos P., (1977), "Modellbildung und ihre Bedeutung in der regelungstechnik", VDI Berichte, Vol. 276, pp. 5 – 12.
- [2] Toenshoff H.K., J. Peters, I. Inasaki, T. Paul, (1992), "Modelling and simulation of grinding processes", Annals of the CIRP, Vol. 41/2, pp. 677 – 688.
- [3] Carlslaw H.S., J.C. Jager, (1959), "Conduction of heat in solids", 2nd Ed., Clarendon Press, Oxford.
- [4] Chryssolouris G., (2005), "Manufacturing Systems: Theory and Practice", 2nd Ed., Springer Verlag
- [5] Hogg R., J. Ledolter, (1987), Engineering Statistics, Macmillan Publishing Company.
- [6] Phadke, S. M., (1989), Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall.
- [7] Li L., D.K.Y. Low, M. Ghoreishi, J.R. Crookal, (2002), "Hole taper characterization and control in Laser percussion drilling", CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 51/1, pp. 153-156.
- [8] Ghoreisi M., D.K.Y. Low, L. Li, (2002), "Comparative statistical analysis of hole taper and circularity in Laser percussion drilling", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, pp. 985-995.
- [9] Stournaras, A., P. Stavropoulos and G. Chryssolouris, (2006), "Investigation of Laser cutting quality of Aluminium", Proceedings of the 25th International Congress on Applications of Lasers and Electro-optics (ICALEO), Arizona, USA, (October 2006), pp. 233-239.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΠΑΛΜΟΥΣ ΔΕΣΜΗΣ LASER

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο καθορισμός των απαιτήσεων του συστήματος παρακολούθησης της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser*, η επιλογή των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν, ο καθορισμός της διάταξης τους και η επιλογή των περιφερειακών του συστήματος, όπως είναι η κάρτα συλλογής των δεδομένων και του λογισμικού για την καταγραφή και ανάλυση τους. Επίσης, παρουσιάζεται η θεωρητική ανάλυση συσχέτισης της απόκρισης των αισθητήρων με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής και τα αποτελέσματα που προέκυψαν καθώς και η σύγκριση τους με τα πειραματικά δεδομένα.

5.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο τομέας των διεργασιών με δέσμη *Laser* έχει αναπτυχθεί ταχύτητα τα τελευταία χρόνια. Νέα υλικά καθώς και νέες πηγές δέσμης *Laser* έχουν αυξήσει σημαντικά τις προοπτικές χρήσης αυτής της κατηγορίας διεργασιών. Απευθείας μέτρηση των χαρακτηριστικών της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser* όπως η διάμετρος ή το βάθος της οπής, σε πραγματικό χρόνο ταυτόχρονα με την διεργασία είναι δύσκολο εξαιτίας της αντιξοότητας του περιβάλλοντος την ώρα που λαμβάνει χώρα η διεργασία αλλά και της φύσης των οπών (π.χ. διαστάσεις σε τάξεις χιλιοστών ή και μικρομέτρων). Παράλληλα, η ανάπτυξη αυτή των συγκεκριμένων διεργασιών έχει οδηγήσει στην ανάγκη για υψηλή ποιότητα και παραγωγικότητα. Προκειμένου να ικανοποιηθεί αυτές οι απαιτήσεις έχουν διενεργηθεί σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες για την ανάπτυξη τεχνολογιών παρακολούθησης των διεργασιών με χρήση αισθητήρων ([1]).

Όπως έχει προαναφερθεί στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, πληροφορίες σχετικά με την διεργασία μπορούν να αποκομισθούν μετρώντας και χαρακτηρίζοντας τις διάφορες μορφές ενέργειας που είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της δέσμης *Laser* στο υλικό και απορρέουν από την περιοχή κατεργασίας. Οι χαρακτηριστικές αυτές μορφές ενέργειας είναι αρκετές. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προέρχεται από μερικώς ιονισμένο

νέφος (πλάσμα) και το τηγμένο υλικό αλλά και από την αντανάκλαση της δέσμης από το υλικό. Ακουστικά κύματα μεταδιδόμενα μέσω του αέρα αλλά και την δομής δημιουργούνται από την άτακτη μετατόπιση του περιβάλλοντα αέρα, την εξάτμιση, την θέρμανση και την διαστολή του υλικού. Με βάση το γεγονός ότι όλες αυτές οι χαρακτηριστικές μορφές ενέργειας δημιουργούνται και εξαρτώνται από τα διάφορα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή δράσης της δέσμης, τα χαρακτηριστικά τους (π.χ. εύρος, μορφή, συχνότητα, κτλ.) μπορούν να συσχετιστούν έμμεσα με ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της διεργασίας τα οποία επίσης συνδέονται με τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή κατεργασίας.

Όπως προέκυψε και από την ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, υπάρχουν αρκετοί μέθοδοι παρακολούθησης για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών κατά τις διεργασίες με δέσμη *Laser*, όπως είναι η μέτρηση της διακύμανσης της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την περιοχή κατεργασίας, η μέτρηση της ποσότητας των σωματιδίων που ρέει από την κάτω επιφάνεια του κατεργαζόμενου υλικού, η μέτρηση του ήχου που δημιουργείται και επεξεργασία εικόνων της κατεργαζόμενης περιοχής. Όσον αφορά την διεργασία διάτρησης, εκτός από καθαρά ποιοτικά κριτήρια, όπως π.χ. εάν έχει επιτευχθεί διαμπερή διάτρηση ή όχι, η εναπόθεση τήγματος, κτλ., η διασφάλιση των διαστάσεων εντός των επιθυμητών απαιτήσεων αποτελεί ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής εξαρτώνται από τις παραμέτρους της διεργασίας, π.χ. την ισχύ της δέσμης *Laser*, την πίεση του αερίου, την θέση του επιπέδου εστίασης, το εστιακό μήκος, την συχνότητα των παλμών στην περίπτωση της διάτρησης με παλμούς δέσμης *Laser*, κτλ., αλλά και από το ίδιο το υλικό.

Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος παρακολούθησης είναι:

1. **Αισθητήρες:** Με τους αισθητήρες γίνεται συλλογή των σημάτων και στην συνέχεια τροφοδοτούνται στην μονάδα καταγραφής.
2. **Μονάδα καταγραφής σημάτων:** Στην μονάδα καταγραφής τα σήματα που στέλνονται από τους αισθητήρες μετατρέπονται από αναλογικά σε ψηφιακά προκειμένου να επεξεργαστούν και στην συνέχεια τροφοδοτούνται στην μονάδα επεξεργασίας των σημάτων.
3. **Μονάδα ανάλυσης και αξιολόγησης σημάτων:** Στην μονάδα επεξεργασίας, τα ψηφιακά πλέον σήματα επεξεργάζονται και αναλύονται, π.χ. στο πεδίο του χρόνου, είτε στο πεδίο των συχνοτήτων και αξιολογούνται με βάση τα κριτήρια που έχει θέσει ο χρήστης του συστήματος.

Σχήμα 5-1: Βήματα κατά την παρακολούθηση της διεργασίας και δομή του συστήματος.

5.2.1 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER

Οι αισθητήρες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επιτευχθούν οι στόχοι της ανάπτυξης και εφαρμογής τεχνολογιών παρακολούθησης των διεργασιών με δέσμη *Laser* μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες ([1]):

- Αισθητήρες για την παρακολούθηση των παραμέτρων της διεργασίας.** Οι αισθητήρες αυτοί μετρούν τις εξωτερικές παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν την διεργασία, όπως π.χ. τα χαρακτηριστικά της δέσμης *Laser*, την απόσταση του ακροφυσίου από την επιφάνεια του κομματιού, το βοηθητικό αέριο, την ποιότητα του υλικού του κατεργαζόμενου κομματιού, κτλ. Όλες αυτές οι παράμετροι επιδρούν στο αποτέλεσμα της διεργασίας και μπορούν να ελεγχθούν χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους αισθητήρες. Εάν οι παράμετροι αυτοί παρακολουθούνται και ελέγχονται τότε, θεωρητικά, δεν θα παρατηρείται μείωση της ποιότητας της διεργασίας. Αισθητήρες που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας του κατεργαζόμενου υλικού, της ποιότητας του υλικού, την ανάλυση της δέσμης *Laser*, τον προσδιορισμό της θέσης του επιπέδου εστίασης και της πίεσης του αερίου, κτλ.
- Αισθητήρες για την παρακολούθηση των χαρακτηριστικών της διεργασίας.** Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της διεργασίας, παρακολουθώντας το αποτέλεσμα της διεργασίας. Μια κοινή προσέγγιση είναι η παρακολούθηση των εκπομπών ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας οπτικούς αισθητήρες. Άλλες μέθοδοι περιλαμβάνουν την παρακολούθηση των κραδασμών, των θερμικών επιδράσεων ή των δυναμικών χαρακτηριστικών της περιοχής τήξης. Συσχετίζοντας τα σήματα που λαμβάνονται με χαρακτηριστικά της διεργασίας, τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την

απευθείας παρακολούθηση του αποτελέσματος της διεργασίας. Η ανάπτυξη και χρήση τέτοιων συστημάτων θα ελαχιστοποιήσει την ανάγκη για εφαρμογή μεθόδων *off-line* καταστροφικού ελέγχου. Οι τύποι των αισθητήρων που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι οπτικοί, ακουστικοί και αισθητήρες που βασίζονται στην λήψη εικόνων.

5.2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Υπάρχουν δύο βασικά κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser*. Το πρώτο βασικό κριτήριο σχετίζεται με την ίδια την διεργασία και το περιβάλλον που γίνεται η διεργασία και το δεύτερο με τις τεχνικές προδιαγραφές των αισθητήρων. Στην Σχήμα 5-2 φαίνεται η γενική σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος κατεργασίας με δέσμη *Laser* τύπου «γέφυρας» (*Gantry type*).

Σχήμα 5-2: Σχηματική απεικόνιση συστήματος κατεργασίας με δέσμη *Laser* τύπου «γέφυρας».

Παρακολούθηση της διεργασίας μπορεί να γίνει είτε από την πάνω πλευρά του κατεργαζόμενου υλικού, είτε από την κάτω. Εάν η παρακολούθηση γίνει από την πάνω πλευρά, προκύπτουν δυσκολίες σχετικά με τον περιορισμένο χώρο που υπάρχει επάνω από την περιοχή κατεργασίας. Σε αυτή την περίπτωση ο αισθητήρας πρέπει να τοποθετηθεί είτε περιφερειακά της κεφαλής κατεργασίας αλλά όσο το δυνατόν πιο κοντά στην περιοχή κατεργασίας, είτε εσωτερικά της κεφαλής κατεργασίας και η αναγκαιότητα για αυτόματη ρύθμιση του φακού εστίασης και ρυθμιζόμενο ακροφύσιο κάνουν περισσότερο πολύπλοκο τον σχεδιασμό του συστήματος παρακολούθησης.

Στην περίπτωση που η παρακολούθηση γίνεται από την κάτω πλευρά του κατεργαζόμενου κομματιού, εμφανίζονται δυσκολίες εξαιτίας της μεγάλης σχετικά ποσότητας του τηγμένου υλικού που ρέει από την κάτω πλευρά της οπής στην περίπτωση διαμπερούς διάτρησης αλλά και δυσκολίες τοποθέτησης των αισθητήρων.

Για την δημιουργία ενός συστήματος παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο (*real-time monitoring system*) για τον έλεγχο του αποτελέσματος κατά την διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser* πρέπει να ληφθούν υπόψη και ορισμένες τεχνικές φύσεως προϋποθέσεις, όπως π.χ. το γεγονός ότι το σύστημα διάγνωσης δεν πρέπει να έχει καμία επίδραση στο ίδιο το σύστημα κατεργασίας, π.χ. στην ποιότητα της δέσμης *Laser*, καθώς επίσης και το ότι οι πληροφορίες που θα αποκομίζονται από το σύστημα παρακολούθησης θα πρέπει να είναι αξιόπιστες προκειμένου να μην επηρεάζεται αρνητικά η αξιοπιστία και η αποδοτικότητα της διεργασίας.

Από τις μεθόδους παρακολούθησης που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, οι τεχνικές που χρησιμοποιούν φωτοδιόδους και μικρόφωνα παρουσιάζουν ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα:

- ✓ Δεν απαιτείται επαφή των αισθητήρων με το υπό κατεργασία υλικό και έχουν μεγάλο βαθμό ευελιξίας όσον αφορά την τοποθέτηση των αισθητήρων.
- ✓ Παρουσιάζουν γρήγορο ρυθμό απόκρισης και είναι κατάλληλα για έλεγχο της διεργασίας σε πραγματικό χρόνο.
- ✓ Χαμηλό κόστος αισθητήρων, συγκρινόμενες με άλλες μεθόδους (π.χ. τεχνικές που χρησιμοποιούν *CCD* και *CMOS* κάμερες).

5.2.3 ΟΠΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι σημαντικές πληροφορίες σε σχέση με την ποιότητα της διεργασίας μπορούν να εξαχθούν από την παρατήρηση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την περιοχή κατεργασίας καθώς συνδέεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής κατεργασίας.

Τα συστήματα παρακολούθησης αποτελούνται από έναν οπτικό αισθητήρα, συνήθως σχεδιασμένο να λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο οπτικό φάσμα, ένα σύστημα συλλογής δεδομένων και ένα σύστημα επεξεργασίας των σημάτων.

Ο τύπος οπτικού αισθητήρα που χρησιμοποιείται πιο συχνά σε είδη υπάρχοντα συστήματα παρακολούθησης αλλά και σε ερευνητικό επίπεδο είναι ο φώτο-ανιχνευτής (*photodetector*), που συνήθως είναι μια φωτοδίοδος με περιορισμένο εύρος απόκρισης ανάλογα με το υλικό κατασκευής. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτού του είδους ανιχνευτή

είναι η υψηλή χρονική ανάλυση του καταγραφόμενου σήματος και το χαμηλό κόστος συγκρινόμενος με άλλες συσκευές, όπως είναι κάμερες ή φασματογράφοι. Το βασικό μειονέκτημα του φωτό-ανιχνευτή είναι η δυνατότητα παρακολούθησης της διεργασίας μόνο στην μία διάσταση (*one-dimensional view of process*), περιορίζοντας τις πληροφορίες που αποκομίζονται ([2]).

5.2.4 ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ

Κατά την επεξεργασία υλικών με δέσμη *Laser*, ακουστικά κύματα μπορούν να δημιουργηθούν με τρεις τρόπους ([3]):

- Ακουστικά κύματα μπορούν να δημιουργηθούν εντός του κατεργαζόμενου υλικού εξαιτίας των αλλαγών φάσης του υλικού από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε αέριο.
- Επίσης, ακουστικές εκπομπές μπορούν να δημιουργηθούν εξαιτίας των θερμικών τάσεων εντός του κατεργαζόμενου υλικού ή σε εξαρτήματα που είναι εκτεθειμένα στην ακτινοβολία της δέσμης (π.χ. το κάτοπτρο κατεύθυνσης της δέσμης, το ακροφύσιο).
- Τέλος, ακουστικά σήματα μπορούν να παραχθούν εξαιτίας της αλλαγής πίεσης και των δονήσεων που δημιουργούνται γύρω από την περιοχή τήξης.

Στην πρώτη περίπτωση τα σήματα που δημιουργούνται συλλέγονται με την τοποθέτηση ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου στο κατεργαζόμενο υλικό. Αυτή είναι μια μέθοδος συλλογής δεδομένων «επαφής» και έχει το μειονέκτημα ότι τα ακουστικά κύματα εξαρτώνται από την απόσταση μεταξύ της πηγής του σήματος και του αισθητήρα αλλά και από το ίδιο το υλικό. Στην δεύτερη περίπτωση, τα ακουστικά σήματα συλλέγονται με την τοποθέτηση ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου στο υλικό αλλά και σε διάφορα εξαρτήματα της μηχανής κατεργασίας, όπως τα κάτοπτρα κατεύθυνσης της δέσμης τα οποία και είναι εκτεθειμένα στις αντανakλάσεις που προέρχονται από το κατεργαζόμενο κομμάτι ([4]). Ο τρίτος τύπος ακουστικών σημάτων μπορεί να αξιοποιηθεί με την τοποθέτηση ενός μικροφώνου (δεν υφίσταται επαφή μεταξύ αισθητήρα και υλικού) κοντά στην περιοχή κατεργασίας. Οι δύο τελευταίες μέθοδοι παρουσιάζουν το μειονέκτημα ότι οι αισθητήρες είναι εκτεθειμένοι στην έντονη θερμότητα που δημιουργείται εξαιτίας της διεργασίας και στην αντανakλώμενη ακτινοβολία της δέσμης *Laser*.

Η δημιουργία ακουστικών σημάτων που μεταφέρονται μέσω του περιβάλλοντα αέρα (*airborne acoustic waves*) οφείλονται στις μεταβολές της αδράνειας του αέρα εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας καθώς και σε μεταβολές της πίεσης του αέρα εξαιτίας

της πρόσκρουσης του βοηθητικού αερίου στο κατεργαζόμενο υλικό και την περιοχή κατεργασίας ([5], [6]).

5.2.5 ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Για την συλλογή των συγκεκριμένων σημάτων (ακουστικών και οπτικών) θα χρησιμοποιηθούν αισθητήρες τοποθετημένοι κοντά στην περιοχή κατεργασίας. Συγκεκριμένα, για την συλλογή των εκπομπών ακτινοβολίας θα χρησιμοποιηθεί φωτοδίοδος και για την συλλογή των ακουστικών σημάτων θα χρησιμοποιηθεί μικρόφωνο. Όπως έχει αναφερθεί στην βιβλιογραφία, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την περιοχή κατεργασίας κατά τις κατεργασίες με δέσμη *Laser* έχει μήκος κύματος που βρίσκεται στην περιοχή του φάσματος από το ορατό μέχρι το σχεδόν υπέρυθρο πεδίο (*visual to near-IR region*), δηλ. 300-1000nm ([1],[7],[8]) ενώ τα ακουστικά κύματα έχουν εύρος συχνοτήτων απόκρισης μεταξύ 20Hz και 20KHz ([7]). Κατά συνέπεια, θα πρέπει οι αισθητήρες που θα επιλεγούν να τηρούν τις απαιτήσεις που προαναφέρθηκαν, δηλ. ο οπτικός αισθητήρας θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να λαμβάνει σήματα τα οποία βρίσκονται στο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεταξύ 300-1000nm και ο ακουστικός αισθητήρας σήματα με συχνότητα απόκρισης μεταξύ 20Hz-20KHz.

Βασικά, οι εκπομπές σημάτων κατά τις κατεργασίες με δέσμη *Laser* μπορούν να ληφθούν με δύο τρόπους, **ομοαξονικά με την δέσμη (*coaxial arrangement*)** και **μη-ομοαξονικά (*off-axial arrangement*)**.

Σχήμα 5-3: Διάταξη αισθητήρων (α) ομοαξονικά με την δέσμη *Laser* και (β) μη-ομοαξονικά με την δέσμη *Laser*

Οι μέθοδοι που βασίζονται σε ομοαξονική μέτρηση της ακτινοβολίας έχουν κάποια πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις μη-ομοαξονικές μεθόδους. Για παράδειγμα, ο αισθητήρας δεν επηρεάζεται από κομμάτια υλικού που εκτοξεύονται από την περιοχή κατεργασίας, δεν καταλαμβάνει χώρο κοντά στην κεφαλή κατεργασίας έτσι ώστε να περιορίζει την διεργασία και «κοιτά» απευθείας την περιοχή κατεργασίας.

Η δεύτερη εναλλακτική λύση είναι η τοποθέτηση των αισθητήρων όσο πιο κοντά στην περιοχή κατεργασίας αλλά μη-ομοαξονικά με την δέσμη *Laser*. Οι μέθοδοι που βασίζονται σε μη-ομοαξονική μέτρηση της ακτινοβολίας, χρησιμοποιούν έναν οπτικό αισθητήρα ο οποίος έχει κατεύθυνση προς την περιοχή κατεργασίας (Σχήμα 5-3(β)) και αυτή η λύση είναι πιο εύκολα πραγματοποιήσιμη καθώς δεν απαιτείται παρέμβαση στα οπτικά στοιχεία καθοδήγησης της δέσμης αλλά η παρακολούθηση της διεργασίας γίνεται υπό κάποια γωνία, οπότε λαμβάνεται ένα μέρος του σήματος. Σε αυτήν την περίπτωση η τοποθέτηση των αισθητήρων πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μην επηρεάζονται από την θερμότητα που αναπτύσσεται καθώς και από το τηγμένο υλικό που εκτοξεύεται από την περιοχή κατεργασίας ενώ ταυτόχρονα να μην εμποδίζει την πραγματοποίηση της διεργασίας.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, προκειμένου να αποφευχθεί η παρέμβαση στο σύστημα κατόπτρων της δέσμης η διάταξη των αισθητήρων θα γίνει μη-ομοαξονικά με την δέσμη *Laser*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-3(β).

5.2.6 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΩΝ

Ένα σήμα είναι μια ποσότητα/χαρακτηριστικό που μπορεί να μετρηθεί στην διάρκεια του χρόνου και μπορεί να είναι τάση, ένταση ρεύματος, θερμοκρασία, πίεση, κτλ. Προκειμένου να γίνει επεξεργασία των αναλογικών σημάτων με ψηφιακές τεχνικές, είναι απαραίτητο να γίνει πρώτα μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό. Κατά την μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό (*analog/digital – A/D*), γίνεται δειγματοληψία του αναλογικού σήματος περιοδικά έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα διακριτό χρονικό σήμα. Ο χρόνος στο οποίο γίνεται η δειγματοληψία του σήματος ονομάζεται χρόνος δειγματοληψίας (*sampling period or interval*). Η περιοδική δειγματοληψία του σήματος οδηγεί στην δημιουργία μια σχέσης μεταξύ της μεταβλητής του χρόνου και των διακριτών χρονικών σημάτων. Ένα σημαντικός παράγοντας κατά την συλλογή σημάτων είναι η επιλογή του κατάλληλου χρόνου δειγματοληψίας. Ένα φαινόμενο το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε σφάλμα κατά την ανάλυση είναι το «*Aliasing*», κατά το οποίο ένα στοιχείο του σήματος με υψηλή συχνότητα αντικαθιστά ένα στοιχείο με χαμηλότερη συχνότητα εξαιτίας του γεγονότος ότι ο ρυθμός δειγματοληψίας δεν είναι επαρκής. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιώντας το θεώρημα της δειγματοληψίας σύμφωνα με το οποίο ο ρυθμός

δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιος από την υψηλότερη συχνότητα. Ο ρυθμός δειγματοληψίας με βάση αυτό το θεώρημα είναι γνωστός και ως ρυθμός *Nyquist (Nyquist rate)*.

Κατά συνέπεια η μονάδα συλλογής δεδομένων θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να συλλέγει δύο τουλάχιστον σήματα ταυτόχρονα, να έχει δηλαδή τουλάχιστον δύο εισόδους (*inputs*) και ο ρυθμός δειγματοληψίας να είναι τουλάχιστον διπλάσιος από την υψηλότερη συχνότητα των σημάτων, δηλ. ίσος ή μεγαλύτερος από 40KHz ($S_{rate} \geq 40.000 \text{ samples/second}$).

Σήματα που απεικονίζονται στο πεδίο του χρόνου εμπεριέχουν σημαντικές πληροφορίες όχι μόνο όσον αφορά την τιμή του σήματος μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή αλλά και πως το σήμα μεταβάλλεται σε σχέση με τον χρόνο. Οι πληροφορίες αυτές εμπεριέχονται στην μορφή που έχει το σήμα, δηλ. την κλίση, την θέση και το σχήμα των «κορυφών» του (*peaks*), κτλ. Η εφαρμογή φίλτρων σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητη για την επεξεργασία του σήματος. Επίσης, χρονικοί παράγωγοι του σήματος μπορεί να είναι χρήσιμοι για περαιτέρω αξιολόγηση. Η ολοκλήρωση ως προς τον χρόνο μπορεί να γίνει για χρονικές περιόδους από μικρές διαδοχικές ή επιλεγμένες χρονικές περιόδους ή ακόμα και για όλη την χρονική διάρκεια της διεργασίας ([7]).

Η απεικόνιση των σημάτων στο πεδίο των συχνοτήτων είναι ισοδύναμη με αυτήν στο πεδίο του χρόνου, αλλά βασίζεται στις συχνότητες του σήματος. Ενώ μερικά σήματα αποτελούνται από μια μόνο μια συχνότητα, άλλα χαρακτηρίζονται από ένα εύρος, δηλ. ένα φάσμα συχνοτήτων (*spectrum*). Το φάσμα συχνοτήτων είναι μια απεικόνιση της χρονικής διάστασης του σήματος και αυτές οι δύο εκφράσεις του σήματος είναι ισοδύναμες, όπως προαναφέρθηκε. Μερικές φορές είναι πιο χρήσιμη η ανάλυση του σήματος στο πεδίο των συχνοτήτων παρά στο πεδίο του χρόνου. Οι σειρές *Fourier* καθώς και ο μετασχηματισμός *Fourier* είναι μαθηματικά εργαλεία με τα οποία μπορεί να γίνει ανάλυση των χαρακτηριστικών του σήματος στο πεδίο των συχνοτήτων. Οι σειρές *Fourier* χρησιμοποιούνται ειδικά για την αποσύνθεση ενός περιοδικού σήματος σε ένα άθροισμα ημιτονοειδών στοιχείων.

Κατά την ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων, η σθεναρότητα των σημάτων που βρίσκονται μέσα σε ένα επιλεγμένο εύρος συχνοτήτων συγκρίνονται με μεταξύ τους ή ακόμα και με προκαθορισμένα όρια συχνοτήτων. Επίσης, για ορισμένες εφαρμογές, η ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της ανίχνευσης σφαλμάτων λόγω π.χ. του γεγονότος ότι η αναλογία «Σήμα/Θόρυβος» (*Signal-to-Noise ratio*) είναι αυξημένη. Παρ' όλα αυτά, η ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων είναι χρονοβόρα εξαιτίας των πολύπλοκων μαθηματικών εφαρμογών (π.χ. *Fast Fourier Transformation-FFT*, εκτίμηση του φάσματος ισχύς του σήματος (*signal power spectrum*), κτλ.) ([7]).

5.3 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

5.3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

5.3.1.1 ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την περιοχή κατεργασία κατά τις διεργασίες με δέσμη *Laser*, βρίσκονται κατά κύριο λόγο στην περιοχή 300nm – 1000nm. Για τον λόγο αυτό κατά την υλοποίηση του συστήματος έγιναν δοκιμές με φωτοδιόδους με διαφορετικά εύρη φάσματος λειτουργίας μέσα σε αυτό το πεδίο.

Φωτοδιόδοι	Φάσμα λειτουργίας
EPD-525-5/0.5	410-580 nm
EPD-660-5/0.5	605-705 nm
EPD-740-5/0.9	680-770 nm
EPD-1300-5-0.22	800-1750 nm
BPX65	350-1100 nm

Πίνακας 5-1: Φωτοδιόδοι που χρησιμοποιήθηκαν.

Κατά την διάρκεια προκαταρκτικών πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, από τις παραπάνω αναφερόμενες φωτοδιόδοι, οι τύποι *EPD740*, *EPD1300* και *BPX65*, ανταποκρίθηκαν κατά την διεργασία διάτρησης και η απόκριση των φωτοδίοδων *EPD1300* και *BPX65* ήταν παρόμοια.

(β)

(γ)

Σχήμα 5-4: Απόκριση φωτοδιόδων (α) EPD740, (β) EPD1300 και (γ) BPX65 κατά την διάτρηση "τυφλής" οπής σε χάλυβα St37 με ισχύ 1000 Watt, συχνότητα παλμών 10KHz, το επίπεδο εστίασης τοποθετημένο στην επιφάνεια του δοκιμίου και για χρόνο 3.5 sec.

Έτσι, προσδιορίστηκε ότι ακτινοβολία που προέρχεται από την περιοχή κατεργασίας κατά την διάτρηση με δέσμη Laser βρίσκεται στο πεδίο 700nm – 1100nm. Προκειμένου να καλυφθεί όλο αυτό το πεδίο ενδιαφέροντος, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η φωτοδίοδος OSRAM BPX65 με εύρος λειτουργίας 350nm – 1100nm και έχει την μέγιστη ευαισθησία στα 850nm.

Σχήμα 5-5: Εύρη λειτουργίας φωτοдиодων και περιοχή ενδιαφέροντος του οπτικού φάσματος.

Σχήμα 5-6: Φωτοδιόδος OSRAM BPX65.

5.3.1.2 ΜΙΚΡΟΦΩΝΟ

Όσον αφορά τις ακουστικές εκπομπές, όπως προέκυψε από την βιβλιογραφία, τα ακουστικά σήματα μεταδιδόμενα μέσω του αέρα που παράγονται κατά τις διεργασίες με δέσμη *Laser*, βρίσκονται στο φάσμα συχνοτήτων από 20Hz – 20KHz.

(α)

(β)

Σχήμα 5-7: (α) Μικρόφωνο PCB TMS130D10 και (β) προενισχυτής PCB TMS130P10

Έτσι ο ακουστικός αισθητήρας που επιλέχθηκε για την συλλογή των ακουστικών εκπομπών είναι ένα *ICP (Integrated Circuit Piezoelectric)* πιεζο-ηλεκτρικό μικρόφωνο *PCB PIEZOTRONIC TMS 130D10* με απόκριση συχνοτήτων στο πεδίο 15Hz – 20KHz, ευαισθησία 45mV/Pa στο 1KHz συνοδευόμενο από έναν προενισχυτή *TMS130P10*.

5.3.2 ΙΔΙΟΣΥΣΚΕΥΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Λόγω του γεγονότος ότι η διάταξη των αισθητήρων θα είναι μη-ομοαξονική σε σχέση με την δέσμη *Laser*, κρίθηκε απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν τέσσερις φωτοδίοδοι, περιφερειακά τοποθετημένοι επάνω από την περιοχή κατεργασίας έτσι ώστε να αντισταθμιστεί το γεγονός της μη-ομοαξονικής τοποθέτησης τους. Για τον λόγο αυτό, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια ιδιοσυσκευή για την τοποθέτηση των αισθητήρων. Η ιδιοσυσκευή σχεδιάστηκε λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς τοποθέτησης καθώς και κίνησης της κεφαλής κατεργασίας και έτσι ώστε να τοποθετείται εύκολα και το βασικότερο να μην επηρεάζει ούτε την διεργασία αλλά ούτε και τα σήματα τα οποία πρόκειται να συλλεχθούν.

Σχήμα 5-8: Τρισδιάστατες απόψεις της κεφαλής κατεργασίας και της ιδιοσυσκευής τοποθέτησης των αισθητήρων.

Η ιδιοσυσκευή κατασκευάστηκε από αλουμίνιο, προκειμένου να έχει όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος έτσι ώστε να μην επηρεάζει την κίνηση της κεφαλής κατεργασίας και συγκρατείται στην κεφαλή κατεργασίας μέσω δύο κοχλίων στο κάτω μέρος της .

Σχήμα 5-9: (α) Τρισδιάστατο μοντέλο CAD και (β) κατασκευαστικό σχέδιο ιδιοσυσκευής.

Σχήμα 5-10: Φυσικό πρωτότυπο ιδιοσυσκευής.

5.3.3 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Για την καταγραφή των δεδομένων και την μετατροπή τους από αναλογικά σε ψηφιακά χρησιμοποιήθηκε η κάρτα *PXI-4472* της *National Instruments*⁵.

(α)

(β)

Σχήμα 5-11: (α) Υπολογιστής συλλογής δεδομένων και (β) κάρτα συλλογής δεδομένων NI PXI-4472.

Η συγκεκριμένη κάρτα συλλογής δεδομένων διαθέτει οχτώ αναλογικές εισόδους οι οποίες μπορούν να συλλέγουν δεδομένα ταυτόχρονα με ανάλυση 24bits και ρυθμό δειγματοληψίας έως 102.4 KS/sec . Η κάρτα τοποθετήθηκε σε έναν υπολογιστή βιομηχανικού τύπου με επεξεργαστή *Intel Celeron* στα 847MHz , μνήμη 512MB και λογισμικό *Windows XP*. Όλοι οι αισθητήρες συνδέθηκαν στην ίδια κάρτα και η καταγραφή των σημάτων πραγματοποιήθηκε με ρυθμό δειγματοληψίας 40KHz , δηλαδή $40.000\text{ Samples/sec}$, ο οποίος είναι διπλάσιος από την μεγαλύτερη συχνότητα του ακουστικού αισθητήρα, προκειμένου να είναι σε συμφωνία με το θεώρημα των *Nyquist-Shannon*. Σύμφωνα με το θεώρημα των *Nyquist-Shannon* ένα αναλογικό σήμα το οποίο καταγράφεται με ένα συγκεκριμένο ρυθμό δειγματοληψίας, μπορεί να ανακατασκευαστεί πλήρως από τα δείγματα εάν ο ρυθμός δειγματοληψίας ήταν τουλάχιστον διπλάσιος από την υψηλότερη συχνότητα του σήματος.

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η διάταξη και συνδεσμολογία των αισθητήρων με την μονάδα καταγραφής καθώς και το διάγραμμα ροής του προγράμματος που δημιουργήθηκε για την καταγραφή των σημάτων.

⁵ *National Instruments*: URL: www.ni.com

Σχήμα 5-12: Διάταξη και συνδεσμολογία αισθητήρων με την μονάδα καταγραφής.

Σχήμα 5-13: Διάγραμμα ροής προγράμματος για την καταγραφή των σημάτων

Το λογισμικό *LabVIEW Version 8.5* της *National Instruments* χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό του συστήματος συλλογής σημάτων από τις φωτοдиодοις και το μικρόφωνο κατά την διεργασία διάτρησης και την αποθήκευση των δεδομένων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή καθώς και για την περαιτέρω επεξεργασία τους.

Το λογισμικό *LabVIEW* χρησιμοποιεί τυποποιημένα προγράμματα τα οποία ονομάζονται "*Virtual Instruments - VIs*" και τα οποία εκτελούν συγκεκριμένες εργασίες στις οποίες μπορεί άμεσα να παρέμβει ο χρήστης και τα οποία συνδεδεμένα μεταξύ τους καθορίζουν τις διάφορες λειτουργίες και την ροή των πληροφοριών και δεδομένων.

(α)

(β)

Σχήμα 5-14: Απεικόνιση (α) της οθόνης ελέγχου και (β) του διαγράμματος ελέγχου του προγράμματος συλλογής των σημάτων στο *LabVIEW*.

5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ

5.4.1 «ΤΥΦΛΕΣ» ΟΠΕΣ

5.4.1.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

Η βασική ιδέα για την διερεύνηση των ακουστικών σημάτων που δημιουργούνται κατά την διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser*, βασίστηκε στο γεγονός ότι κατά την διάτρηση το βοηθητικό αέριο ρέει ομοαξονικά με την δέσμη *Laser* στην κοιλότητα της οπής και κατά συνέπεια η οπή θα μπορούσε να δρα ως πηγή ήχου, τα χαρακτηριστικά του οποίου θα μπορούσαν να συνδέονται με τα χαρακτηριστικά της οπής. Όπως προαναφέρθηκε, για την συλλογή των ακουστικών σημάτων χρησιμοποιήθηκε ένα μικρόφωνο με εύρος συχνοτήτων από $15\text{Hz} - 20\text{KHz}$. Το μικρόφωνο τοποθετήθηκε όσο το δυνατόν πιο κοντά στην περιοχή κατεργασίας προκειμένου να μειωθεί η επίδραση των εξωτερικών πηγών θορύβου, όπως π.χ. από τα υποσυστήματα της μηχανής κατεργασίας. Παρόλα αυτά, ειδική επεξεργασία των ακουστικών σημάτων είναι απαραίτητη προκειμένου να αποκλειστούν αυτές οι πηγές θορύβου.

Διαπιστώθηκε, ότι εφαρμόζοντας ένα υψίσυχο φίλτρο με συχνότητα αποκοπής $f_{\text{cut-off}} = 500\text{ Hz}$ και με επεξεργασία του σήματος με την τεχνική της Μέσης Τιμής Μικρού Χρόνου (*Short Time Mean Value - STMV*) ήταν δυνατή η εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών σχετικά με την διεργασία. Η τεχνική *STMV*, χρησιμοποιείται για την μείωση του θορύβου του σήματος και τον προσδιορισμό των διακυμάνσεων του σήματος ([9]).

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται το ακουστικό σήμα κατά την διεργασία διάτρησης. Αρχικά, το σήμα είναι σταθερό και με μικρό πλάτος. Κατά την διεργασία, γενικά το πλάτος του σήματος ($\text{Ampl}^{\text{PIP}} = \text{Signal_Level}_{\text{high}} - \text{Signal_Level}_{\text{low}}$) φαίνεται να αυξάνει και όταν η διεργασία σταματήσει, το πλάτος μειώνεται σημαντικά και γίνεται πιο σταθερό.

Σχήμα 5-15: Σήμα μικροφώνου κατά την διάτρηση με δέσμη *Laser*.

Προκειμένου να αξιοποιηθεί αυτό το χαρακτηριστικό του σήματος και να γίνει πιο ξεκάθαρο, υπολογίστηκε ο μέσος όρος του πλάτους του σήματος ανά τακτά μικρά χρονικά διαστήματα των 10msec , σύμφωνα με την τεχνική Μέσης Τιμής Μικρού Χρόνου (*Short Time Mean Value - STMV*). Από το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5-16) φαίνεται ξεκάθαρα η μεταβολή του ακουστικού σήματος κατά την διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser*.

Σχήμα 5-16: (α) Μέγιστη και ελάχιστη τιμή και (β) πλάτος του επεξεργασμένου ακουστικού σήματος (STMV για χρονικά διαστήματα των 10msec)

Προκειμένου να αξιολογηθεί η εξάρτηση των ακουστικών σημάτων από την γεωμετρία της οπής και λαμβάνοντας υπόψη ότι η βασική ιδέα της διερεύνησης των ακουστικών σημάτων είναι η δημιουργία ηχητικού σήματος από την ροή του αερίου στην κοιλότητα της οπής αλλά και ότι η απόκριση του μικροφώνου εξαρτάται από την μεταβολή της πίεσης που ασκείται στο διάφραγμα εξαιτίας των πυκνωμάτων και αραιωμάτων του περιβάλλοντα αέρα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση της κίνησης του αερίου στην κοιλότητα της οπής.

Προκειμένου να απλοποιηθεί η ανάλυση οι παρακάτω βασικές παραδοχές λήφθηκαν υπόψη:

- Η οπή θεωρείται ότι είναι κωνικού σχήματος με τις δύο επιφάνειες να είναι κυκλικές, δηλαδή αποτελεί έναν κόλουμε κώνο.
- Η κίνηση του αερίου γίνεται μόνο ως προς μια κατεύθυνση, ως προς τον z -άξονα και δεν υπάρχει τριβή στα τοιχώματα της οπής.
- Η κάτω επιφάνεια της οπής θεωρείται ότι είναι επίπεδη και κάθετη ως προς τον z -άξονα.
- Ο όγκος του αερίου μπορεί να χωριστεί σε πεπερασμένα στοιχεία με σταθερή πυκνότητα και συμπιεστότητα.

Σχήμα 5-17: Μοντέλο ροής του αερίου στην κοιλότητα της οπής.

Υποθέτοντας μια σχηματισμένη οπή με ακτίνα εισόδου R_0 και βάθους z , η μεταβολή της ακτίνας συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του δοκιμίου μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\left. \begin{aligned} R_z &= R_0 - w = R_0 - \sin(\varphi)s \\ \cos(\varphi) &= \frac{z}{s} \end{aligned} \right\} R_z(z) = R_0 - \tan(\varphi)z \quad \text{Εξίσωση 5-1}$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις δυνάμεις που ασκούνται σε έναν στοιχειώδες όγκο αερίου που κινείται στο εσωτερικό της οπής:

$$\begin{aligned} \Sigma F = ma \Rightarrow P_r A(z) - \left(P_r A(z) - \frac{\partial P_r A(z)}{\partial z} dz \right) &= \rho_0 (A(z) dz) \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{\partial P_r A(z)}{\partial z} dz &= \rho_0 (A(z) dz) \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση 5-2}$$

όπου P_r είναι η πίεση και ρ_0 είναι η πυκνότητα του αερίου.

ή σε ποιο απλοποιημένη μορφή η εξίσωση 5-2 μπορεί να γραφτεί:

$$\frac{\partial P_r}{\partial z} = \rho_0 \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad \text{Εξίσωση 5-3}$$

Για μικρή μετατόπιση του αερίου, η μεταβολή της πίεσης στον στοιχειώδες όγκο μπορεί να συσχετιστεί με την μεταβολή της πυκνότητας ([10], [11]) και προκύπτει μια σχέση μεταξύ της πίεσης και της μετατόπισης:

$$dP_r = \left(\frac{\partial P_r}{\partial \rho} \right)_{\rho_0} d\rho \Rightarrow P_r = c^2 \rho_0 \frac{\partial f}{\partial z} \quad \text{Εξίσωση 5-4}$$

όπου c είναι η ταχύτητα του ήχου.

Από τις εξισώσεις 5-2 και 5-4 προκύπτει:

$$c^2 \frac{\partial^2 f A(z)}{\partial z^2} = A(z) \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \Rightarrow c^2 \frac{\partial^2 f A(z)}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 f A(z)}{\partial t^2} \quad \text{Εξίσωση 5-5}$$

Θεωρώντας τον μετασχηματισμό $H(z,t)=f(z,t)*A(z)$, η εξίσωση 5-5 γίνεται:

$$c^2 \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad \text{Εξίσωση 5-6}$$

Η εξίσωση 5-6 αποτελεί την διαφορική εξίσωση που περιγράφει την κίνηση του στοιχειώδους όγκου αερίου στην κοιλότητα της οπής και μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας διαχωρισμό μεταβλητών.

Υποθέτοντας μια γενική λύση της μορφής $H(z,t)=H_1(z)*H_2(t)$, η εξίσωση 5-6 γράφεται:

$$c^2 \frac{\partial^2 H_1}{\partial z^2} \frac{1}{H_1} = \frac{\partial^2 H_2}{\partial t^2} \frac{1}{H_2} = -\lambda^2 \quad \text{Εξίσωση 5-7}$$

η οποία διασπάται σε δύο συνήθεις μερικές διαφορικές εξισώσεις 2^{ας} τάξης:

$$c^2 \frac{\partial^2 H_1}{\partial z^2} \frac{1}{H_1} = -\lambda^2 \Rightarrow \frac{\partial^2 H_1}{\partial z^2} + \frac{\lambda^2}{c^2} H_1 = 0 \quad \text{Εξίσωση 5-8}$$

$$\frac{\partial^2 H_2}{\partial t^2} \frac{1}{H_2} = -\lambda^2 \Rightarrow \frac{\partial^2 H_2}{\partial t^2} + \lambda^2 H_2 = 0 \quad \text{Εξίσωση 5-9}$$

Οι λύσεις των εξισώσεων 5-8 και 5-9 είναι της μορφής ([10]):

$$H_1(z) = A \cos\left(\frac{\lambda}{c} z + \Phi_2\right) \quad \text{Εξίσωση 5-10}$$

$$H_2(t) = B \cos(\lambda t + \Phi_1) = B \cos(\omega_0 t + \Phi_1) \quad \text{Εξίσωση 5-11}$$

Και η γενική λύση της εξίσωσης 5-6 γίνεται:

$$\begin{aligned} H(z, t) &= A \cos\left(\frac{\omega_0}{c} z + \Phi_2\right) * B \cos(\omega_0 t + \Phi_1) \Rightarrow \\ f(z, t) &= \frac{C}{A_z(z)} \cos\left(\frac{\omega_0}{c} z + \Phi_2\right) \cos(\omega_0 t + \Phi_1) \Rightarrow \\ f(z, t) &= Ampl * \cos\left(\frac{\omega_0}{c} z + \Phi_2\right) \cos(\omega_0 t + \Phi_1) \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση 5-12}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το αέριο προσκρούει στην κάτω επιφάνεια της οπής και ότι στην επιφάνεια εισόδου το αέριο κινείται ελεύθερα, οι συνοριακές συνθήκες περιγράφονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{z=D} = 0, \text{ για οποιαδήποτε χρονική στιγμή} \quad \text{Εξίσωση 5-13}$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \text{ για οποιαδήποτε χρονική στιγμή} \quad \text{Εξίσωση 5-14}$$

Από την δεύτερη συνοριακή συνθήκη (εξίσωση 5-14) και θεωρώντας ότι η οπή έχει βάθος D :

$$\frac{C}{A_z(D)} \cos(\omega_0 t + \Phi_1) \left[-\sin\left(\frac{\omega_0}{c} z + \Phi_2\right) \frac{\omega_0}{c} \right] \Bigg|_{\substack{\text{για } z=0 \\ \text{για όλα τα } t}} = 0 \Rightarrow \sin(\Phi_2) = 0 \Rightarrow \Phi_2 = 0 \quad \text{Εξίσωση 5-15}$$

και από την πρώτη συνοριακή συνθήκη (εξίσωση 5-13):

$$\left. \frac{C}{A_z(z)} \cos\left(\frac{\omega_0}{c} z\right) \left[-\sin(\omega_0 t + \Phi_1) \omega_0 \right] \right|_{\substack{\text{για } z=D \\ \text{για όλα τα } t}} = 0 \Rightarrow \cos\left(\frac{\omega_0}{c} D\right) = 0 \Rightarrow \frac{\omega_0}{c} D = \frac{\pi}{2} \quad \text{Εξίσωση 5-16}$$

Θεωρώντας ότι η πίεση του αερίου που εξέρχεται από το ακροφύσιο είναι ίση με την πίεση στην επιφάνεια εισόδου της οπής, ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα για $z=0$ είναι:

$$\begin{aligned} P_{z=0} A_0 &= -m \frac{\partial^2 f(z,t)}{\partial t^2} \Rightarrow P_{z=0} A_0 = -m \left[-\frac{C}{A_z(D)} \cos(\omega_0 t + \Phi_1) \omega_0^2 \right] \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{C}{A_z(D)} = \frac{P_{ass.gas} A_0}{m \cos(\omega_0 t + \Phi_1) \omega_0^2} \quad \text{Εξίσω. 5-16} \\ &\frac{C}{A_z(D)} = Ampl = \frac{P_{ass.gas} A_0 4D^2}{m \pi^2 c^2 \cos\left(\frac{\pi c}{2D} t + \Phi_1\right)} \quad \text{Εξίσωση 5-17} \end{aligned}$$

Θεωρώντας ότι η μάζα του αερίου που ασκεί την πίεση στην επιφάνεια εισόδου είναι ίση με την μάζα ενός κυλίνδρου ακτίνας R_0 και ύψους H_N ($m = \rho * A_0 H_N$) (Σχήμα 5-18) και απαλείφοντας τον χρονικό όρο, η εξίσωση 5-17 γίνεται:

$$Ampl_{gas}^P(D) = \frac{P_{ass.gas} 4D^2}{\rho H_N \pi^2 c^2} = \frac{Ampl_{gas}^{PlP}(D)}{2} \quad \text{Εξίσωση 5-18}$$

Όπου H_N είναι η απόσταση της επιφάνειας του δοκιμίου από το ακροφύσιο, $Ampl_{gas}^P$ είναι το πλάτος κορυφής και $Ampl_{gas}^{PlP}$ είναι το πλάτος από κορυφή σε κορυφή.

Σχήμα 5-18: Σχηματική απεικόνιση της εισόδου του αερίου στην κοιλότητα της οπής.

Η εξίσωση 5-18 περιγράφει το πλάτος ταλάντωσης του αερίου στην κοιλότητα της οπής και φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος τόσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος της ταλάντωσης της κίνησης του αερίου.

Σχήμα 5-19: Πλάτος ταλάντωσης αερίου συναρτήσει του βάθους της οπής.

Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του μικροφώνου και θεωρώντας ότι η ταλάντωση του αερίου προκαλεί πυκνώματα και αραιώματα του αέρα που περιβάλλει το μικρόφωνο και τα οποία σχετίζονται με την αλλαγή του όγκου του αέρα που προσπίπτει στην επιφάνεια του μικροφώνου, η απόκριση του μικροφώνου μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Ampl_{mic}^{PiP}(D) = \frac{P_{ass.gas} 8D^2}{\rho H_N \pi^2 c^2} M_{gas} * A_{Mic} * S_{Mic} \quad \text{Εξίσωση 5-19}$$

όπου M_{gas} είναι ο συντελεστής συμπίεστότητας (*bulk modulus*) του αερίου ανά μονάδα όγκου, A_{Mic} είναι η επιφάνεια του διαφράγματος του μικροφώνου και S_{Mic} είναι η ευαισθησία του μικροφώνου.

Σχήμα 5-20: Θεωρητική τιμή πλάτους σήματος συναρτήσει του βάθους της οπής.

Η τάση αυτή αύξησης του πλάτους του σήματος με το βάθος διάτρησης μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη ότι λόγω αλλαγής της διαμέτρου της δέσμης *Laser* καθώς μεγαλώνει το βάθος, η οπή που σχηματίζεται έχει κωνική μορφή με την διάμετρο εισόδου να είναι μεγαλύτερη από την διάμετρο στο μέγιστο βάθος της οπής. Καθώς το βοηθητικό αέριο ρέει στην κοιλότητα της οπής, η ταχύτητα του αυξάνει εξαιτίας της κωνικότητας με συνέπεια την αύξηση της κινητικής ενέργεια του. Το αέριο προσκρούει στο κάτω μέρος τα οπής και επιστρέφει προς τα επάνω. Το πλάτος του ακουστικού σήματος αντιπροσωπεύει την δύναμη που ασκείται λόγω μεταβολής της πίεσης εξαιτίας των πυκνωμάτων και αραιωμάτων του αέρα, σε μια επιφάνεια (το διάφραγμα του μικροφώνου) και συνδέεται άμεσα με την ταχύτητα των σωματιδίων του αέρα που προκαλούν την ταλάντωση του διαφράγματος και με την ενέργεια του ακουστικού σήματος που καταγράφεται. Κατά συνέπεια, η αύξηση της κινητικής ενέργειας του αερίου καθώς προσκρούει στο κάτω μέρος της οπής και επιστρέφει προς το μικρόφωνο αποτυπώνεται στο πλάτος του ακουστικού σήματος.

5.4.1.1.1 Θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ των ακουστικών σημάτων και του βάθους της οπής για τα πειραματικά αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν από την πειραματική διερεύνηση που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.

Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να μειωθεί ο θόρυβος του σήματος και να γίνει πιο ξεκάθαρη και να αξιοποιηθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η συμπεριφορά των ακουστικών σημάτων που κατεγράφησαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων που διεξήχθησαν, για την επεξεργασία τους εφαρμόστηκε η τεχνική της Μέσης Τιμής Μικρών Χρόνων (*Short Time Mean Value-STMV*) για χρονικά διαστήματα των *10msec* ([9]).

Όπως φαίνεται από τα παρακάτω διαγράμματα, αύξηση του πλάτους του ακουστικού σήματος αντιστοιχεί σε αύξηση του βάθους διάτρησης και η συσχέτιση τους ακολουθεί μια δευτεροβάθμια τάση, γεγονός που ήταν αναμενόμενο με βάση τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης των ακουστικών σημάτων, και με τον συντελεστή R^2 να κυμαίνεται από 0.6927 έως και 0.7473.

(α)

(β)

(γ)

Σχήμα 5-21: Συσχέτιση πλάτους ακουστικού σήματος και βάθους οπής με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα για θέση του επιπέδου εστίασης (α) 2mm κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου (β) 2mm πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου και (γ) στην επιφάνεια του δοκιμίου

Από την εξίσωση 5-19 μπορεί να υπολογιστεί το βάθος της οπής με βάση το πλάτος του ακουστικού σήματος που καταγράφεται κατά την διεργασία.

$$D = \sqrt{\frac{Ampl_{mic}^{PtP} * \rho * H_N * \pi^2 * c^2}{8 * P_{ass, gas} * M * A_{Mic} * S_{Mic}}} \quad \text{Εξίσωση 5-20}$$

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα θεωρητικά αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ του πλάτους του ακουστικού σήματος και του μέγιστου βάθους διάτρησης καθώς και η σύγκριση τους με τα θεωρητικά αποτελέσματα.

Από την σύγκριση των πειραματικών με τα θεωρητικά αποτελέσματα φαίνεται ότι ακολουθούν την ίδια τάση αλλά το θεωρητικό μοντέλο υπερεκτιμά το βάθος της οπής, γεγονός που κατά κανόνα οφείλεται στις παραδοχές και απλοποιήσεις που έγιναν κατά την θεωρητική ανάλυση.

Εξαιτίας της μορφής της κατανομής ισχύος της δέσμης (*Gaussian profile*), το κάτω μέρος της οπής δεν είναι επίπεδο αλλά έχει κωνική μορφή. Επίσης, κατά την εκτίναξη του τήγματος από την κοιλότητα της οπής, υλικό επικολλάται στα τοιχώματα της οπής δημιουργώντας μια τραχιά και ακανόνιστη επιφάνεια, γεγονός που επηρεάζει την ροή του αερίου στην κοιλότητα της οπής και κατά συνέπεια τα ακουστικά σήματα που δημιουργούνται εξαιτίας της ροής. Όλα τα παραπάνω επηρεάζουν την δημιουργία των ακουστικών σημάτων κατά την διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser* και συμβάλουν στις αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ των πειραματικών και των θεωρητικών αποτελεσμάτων.

(β)

(γ)

Σχήμα 5-22: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων της συσχέτισης του πλάτους του ακουστικού σήματος και βάθους οπής για θέση του επιπέδου εστίασης (α) 2mm κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου (β) 2mm πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου και (γ) στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Προκειμένου να αντισταθμιστούν αυτές οι αποκλίσεις, χρησιμοποιήθηκε ένας γραμμικός διορθωτικός συντελεστής:

$$y_{theor}^{Corrected} = y_{theor.} * \beta \quad \text{Εξίσωση 5-21}$$

Ο διορθωτικός συντελεστής προσδιορίστηκε μέσω της προσαρμογής του θεωρητικού μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα και βρέθηκε ότι η τιμή $\beta=0.7$ έχει σαν αποτέλεσμα τα θεωρητικά αποτελέσματα να προσεγγίζουν τα πειραματικά πάρα πολύ καλά.

Σχήμα 5-23: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών (με συντελεστή διόρθωσης $\beta=0.7$) και πειραματικών αποτελεσμάτων της συσχέτισης του πλάτους του ακουστικού σήματος και βάθους οπής για θέση του επιπέδου εστίασης (α) 2mm κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου (β) 2mm πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου και (γ) στην επιφάνεια του δοκιμίου.

5.4.1.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3, γινόταν καταγραφή και των οπτικών σημάτων που εκπέμπονται κατά την διεργασία από ένα σύστημα τεσσάρων φωτοδιόδων τοποθετημένων περιφερειακά επάνω από την περιοχή κατεργασίας, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 5.3.2.

Σχήμα 5-24: Σήμα του συστήματος φωτοδιόδων κατά την διάτρηση μαλακού χάλυβα St37, με ισχύ 1500 Watt, συχνότητα παλμών 10KHz, το επίπεδο εστίασης στην επιφάνεια του δοκιμίου και για χρόνο 3.5sec.

Κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των σημάτων παρατηρήθηκε ότι στην αρχή της διεργασίας υπάρχει μια αύξηση του σήματος και στο τέλος της διεργασίας η απόκριση του σήματος μειώνεται και γίνεται πιο σταθερό (Σχήμα 5-24).

Παρατηρώντας το σήμα των φωτοδιόδων με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, φαίνεται ότι στην αρχή της διεργασίας το σήμα αυξάνει σημαντικά και στην συνέχεια ακολουθεί μια πτωτική τάση (Σχήμα 5-25).

(α)

(β)

Σχήμα 5-25 (α) Λεπτομερής άποψη του σήματος των φωτοδιόδων για διάρκεια 20msec, (β) λεπτομερής άποψη του STMV σήματος των φωτοδιόδων (για χρονικά διαστήματα των 0.5msec) για διάρκεια 20msec.

Στην αρχή της διεργασίας, πριν αρχίσει η αφαίρεση υλικού, το υλικό θερμαίνεται εξαιτίας της δέσμης *Laser*. Η αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή απορροφητικότητας του υλικού ([12], [13]) και κατά συνέπεια την μείωση της ακτινοβολίας που αντανακλάται προς την περιοχή των φωτοδιόδων, γεγονός που προκαλεί μείωση του σήματος των φωτοδιόδων.

Γενικώς, από την συμπεριφορά του σήματος των φωτοδιόδων διαφαίνεται ότι τα οπτικά σήματα προερχόμενα από την περιοχή κατεργασία **εμπεριέχουν πληροφορίες** σχετικά με την διεργασία και μπορούν να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της διεργασίας.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η συσχέτιση του σήματος των φωτοδιόδων με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής και λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η απόκριση αυτού του τύπου αισθητήρων εξαρτάται από την ποσότητα της ακτινοβολίας που φτάνει σε αυτούς, πραγματοποιήθηκε ανάλυση με βάση την γεωμετρία της οπής και την γεωμετρία όλου του συστήματος. Οι βασικές παραδοχές που έγιναν κατά την θεωρητική ανάλυση της απόκρισης των φωτοδιόδων ήταν οι εξής:

- Η οπή θεωρείται ότι είναι κωνικού σχήματος με τις δύο επιφάνειες να είναι κυκλικές, δηλαδή αποτελεί έναν κόλουρο κώνο.
- Η κάτω επιφάνεια της οπής είναι επίπεδη.
- Ιδιότητες του υλικού, όπως είναι ο συντελεστής απορροφητικότητας της ακτινοβολίας θεωρείται ότι είναι σταθερές καθ' όλη την διάρκεια της διεργασίας και ανεξάρτητες από την θερμοκρασία.
- Οι επιφάνειες της οπής θεωρείται ότι είναι λείες.

Με βάση τον ορισμό της στερεής γωνίας και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των φωτοдиодων που χρησιμοποιήθηκαν, η ακτίνα χ της μέγιστης επιφάνειας που μπορεί να «δει» κάθε φωτοδιόδος στην επιφάνεια του δοκιμίου μπορεί να υπολογιστεί (Σχήμα 5-26):

$$\omega_{PHD} = \frac{A_3}{(S + x_1)^2} \Rightarrow \pi R_3^2 = \omega_{PHD} (S + x_1)^2 \Rightarrow R_3 = \sqrt{\frac{\omega_{PHD}}{\pi}} (S + x_1)$$

$$S = \sqrt{H^2 + L^2}$$

$$x = R_3 \cos(\theta)$$

Εξίσωση 5-22

Κατά συνέπεια, οι αισθητήρες υπερκαλύπτουν την περιοχή ενδιαφέροντος στην επιφάνεια του δοκιμίου, δηλαδή την οπή, καθώς η διάμετρος της είναι απίθανο να υπερβεί την μέγιστη ακτίνα x που με βάση την Εξίσωση 5-22 και τα γεωμετρικά δεδομένα προσεγγίζει τα **46mm**.

Σχήμα 5-26: Γεωμετρική απεικόνιση ορατής περιοχής από την φωτοδιόδο.

Με βάση των ορισμό της στερεάς γωνίας και την γεωμετρία της διάταξης των αισθητήρων (Σχήμα 5-27) η επιφάνεια που αντιστοιχεί στην προβολή της επάνω διαμέτρου της οπής στην επιφάνεια της φωτοδιόδου μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{eff}^{PHD} &= \frac{A_{eff}}{(S+x_1)^2} = \frac{\pi R_{A_{eff}}^2}{(S+x_1)^2} = \frac{\pi R_A^2 \cos^2(\theta)}{(S+x_1)^2} \\ \omega_{eff}^{PHD} &= \frac{A_{eff}^{PHD}}{(x_2)^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow A_{eff}^{PHD} = \frac{\pi R_A^2 \cos^2(\theta)}{(S+x_1)^2} x_2^2 \quad \text{Εξίσωση 5-23}$$

όπου A_{eff} είναι η επιφάνεια που αντιστοιχεί στην προβολή της επάνω διαμέτρου της οπής στο επίπεδο $A-A$, R_A είναι ακτίνα εισόδου της οπής, S είναι η απόσταση του επιπέδου $A-A$ από την επιφάνεια της φωτοδιόδου και x_1 , x_2 είναι γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φωτοδιόδου.

Σχήμα 5-27: Γεωμετρική απεικόνιση θέσης φωτοδιόδου σε σχέση με την οπή.

Με την παραδοχή ότι δεν υπάρχουν απώλειες ακτινοβολίας στα τοιχώματα της οπής και θεωρώντας ότι η ακτινοβολία που αντανακλάται στο κάτω μέρος της οπής είναι ισοδύναμη με πηγή ακτινοβολίας επιφάνειας A' και της ίδιας ενεργειακής πυκνότητας, η ποσότητα της ακτινοβολίας (*radiance*) που διέρχεται από την επιφάνεια A' μπορεί να υπολογιστεί:

$$\left. \begin{aligned} L_A &= \frac{P_{Re f}^{Laser}}{A * \omega} \\ L_{A'} &= \frac{P_{A'}^{Laser}}{A' * \omega} \end{aligned} \right\} \Rightarrow P_{A'}^{Laser} = \frac{P_{Re f}^{Laser} * A'}{A} \quad \text{Εξίσωση 5-24}$$

όπου ω είναι η στερεή γωνία που περιγράφει τον κώνο που αποτελεί την οπή, A είναι η επιφάνεια του κάτω μέρους της οπής, A' είναι η επιφάνεια που αντιστοιχεί στο πάνω μέρος της οπής, $P_{Re f}^{Laser} (= P^{Laser} * R_{Mater}^{Re f})$ είναι η ισχύς του μέρους της ακτινοβολίας που δεν απορροφάται από το υλικό και αντανακλάται, $R_{Mater}^{Re f}$ είναι ο συντελεστής αντανάκλασης του υλικού και $P_{A'}^{Laser}$ είναι η ισχύς της ακτινοβολίας που διέρχεται από την επιφάνεια A' .

Αντίστοιχα, η ποσότητα της ακτινοβολίας που περνάει από την επιφάνεια A_{eff} που αντιστοιχεί στην προβολή του επάνω μέρους της οπής στο επίπεδο $A-A$:

$$\left. \begin{aligned} L_{A_{eff}} &= \frac{P_{A_{eff}}^{Laser}}{A_{eff} \omega_{eff}^{PHD}} \\ L_{A'} &= \frac{P_{A'}^{Laser}}{A' \omega_{eff}^{PHD} \cos(\theta)} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &A_{eff} = A' \cos^2(\theta) \\ &\Rightarrow P_{A'}^{Laser} = \frac{P_{A_{eff}}^{Laser}}{\cos(\theta)} \Rightarrow \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση 5-25}$$

$$P_{A_{eff}}^{Laser} = \frac{P_{Re f}^{Laser} A' \cos(\theta)}{A}$$

Επίσης, με βάση την ποσότητα της ακτινοβολίας που διέρχεται από την επιφάνεια A_{eff} και την ποσότητα της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην φωτοευαίσθητη επιφάνεια της φωτοδιόδου, η ισοδύναμη οπτική ενέργεια που καταλήγει στην φωτοδίοδο μπορεί να υπολογιστεί:

$$\left. \begin{aligned} L_{PHD} &= \frac{P_{PHD}^{Laser}}{A_{eff}^{PHD} * \omega_{eff}^{PDHD}} \\ L_{A_{eff}} &= \frac{P_{A_{eff}}^{Laser}}{A_{eff} * \omega_{eff}^{PHD}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow P_{PHD}^{Laser} = P_{A_{eff}}^{Laser} \frac{A_{eff}^{PHD}}{A_{eff}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{PHD}^{Laser} = \frac{P_{Re f}^{Laser} * \cos(\theta) * x_2^2 * \pi * R_{A'}^2}{A * (x_1 + S)^2} \quad \text{Εξίσωση 5-26}$$

Κατά την πρόσπτωση ακτινοβολίας στην επιφάνεια της φωτοδιόδου, δημιουργούνται ζεύγη «οπών-ηλεκτρονίων», δηλαδή η ενέργεια των φωτονίων απορροφάται από το υλικό και ελευθερώνονται ηλεκτρόνια τα οποία αποτελούν το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το ηλεκτρικό κύκλωμα της φωτοδιόδου.

Σχήμα 5-28: Δημιουργία ζευγους «οπών-ηλεκτρονίων» και ηλεκτρικού ρεύματος από την πρόσπτωση ακτινοβολίας στην επιφάνεια της φωτοδιόδου ([14],[15]).

Το ρεύμα που δημιουργείται λόγω της πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στην φωτοδίοδο (*photocurrent*) μπορεί να προσδιοριστεί με βάση των αριθμό των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνεια της φωτοδιόδου λαμβάνοντας υπόψη το ποσοστό της ακτινοβολίας που δεν αντανακλάται από την επιφάνεια της φωτοδιόδου καθώς και τον οπτικό συντελεστή απορρόφησης της ακτινοβολίας (*optical absorption coefficient*):

$$PC_{PHD} = q \frac{P_{PHD}^{Laser}}{h\nu} (1 - R_{PHD}^{Ref}) (1 - e^{-a_{PHD}L}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow PC_{PHD} = \frac{q}{h\nu} * \frac{P_{Ref}^{Laser} * \cos(\theta) * x_2^2 * \pi * R_{A'}^2}{A * (x_1 + S)^2} * (1 - R_{PHD}^{Ref}) (1 - e^{-a_{PHD}L}) \quad \text{Εξίσωση 5-27}$$

όπου q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, h είναι σταθερά του *Plank*, ν είναι η συχνότητα της ακτινοβολίας, R_{PHD}^{Ref} και a_{PHD} είναι ο συντελεστής αντανάκλασης της επιφάνειας της φωτοδιόδου και ο οπτικός συντελεστής απορρόφησης του υλικού, αντίστοιχα.

Σχήμα 5-29: Απορροφούμενη ακτινοβολία.

Το συνολικό ρεύμα που δημιουργείται από την ακτινοβολία που απορροφάται, μπορεί να υπολογιστεί ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση για όλο το φάσμα απόκρισης της φωτοδιόδου και λαμβάνοντας υπόψη ότι η συχνότητα της ακτινοβολίας συνδέεται με το μήκος κύματος με την σχέση $\nu = c_0/\lambda$:

$$PC_{PHD}^{Total} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{q}{h \frac{c_0}{\lambda}} * \frac{P_{Ref}^{Laser} * \cos(\theta) * x_2^2 * \pi * R_{A'}^2}{A * (x_1 + S)^2} * (1 - R_{PHD}^{Ref}) (1 - e^{-a_{PHD}L}) d\lambda \Rightarrow$$

$$PC_{PHD}^{Total} = \frac{q * [\lambda_1^2 - \lambda_2^2]}{2hc_0} * \frac{P_{Ref}^{Laser} * \cos(\theta) * x_2^2 * \pi * R_{A'}^2}{A * (x_1 + S)^2} * (1 - R_{PHD}^{Ref}) (1 - e^{-a_{PHD}L}) \quad \text{Εξίσωση 5-28}$$

όπου c_0 είναι η ταχύτητα του φωτός και λ_1 - λ_2 είναι το φάσμα απόκρισης της φωτοδιόδου

Θεωρώντας ένα απλοποιημένο ηλεκτρικό κύκλωμα και με βάση τα χαρακτηριστικά της φωτοδιόδου, η τάση που δημιουργείται στα άκρα της μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{PHD}^{Total} = \frac{q * [\lambda_1^2 - \lambda_2^2]}{2hc_0} * \frac{P_{Ref}^{Laser} * \cos(\theta) * x_2^2 * \pi * R_{A'}^2}{\pi * R_A^2 * (x_1 + S)^2} * (1 - R_{PHD}^{Ref}) * (1 - e^{-a_{PHD}L}) * R_{Resistance}^{PHD} \quad \text{Εξίσωση 5-29}$$

όπου $R_{Resistance}^{PHD}$ είναι αντίσταση του απλοποιημένου ηλεκτρικού κυκλώματος της φωτοδιόδου.

5.4.1.2.1 Ανάλυση ευαισθησίας οπτικών σημάτων (Sensitivity analysis)

Από την εξίσωση 5-30, φαίνεται ότι η τάση που δημιουργείται στα άκρα της φωτοδιόδου εξαρτάται τόσο από την ακτίνα εισόδου της οπής, όσο και από την ακτίνα της κάτω επιφάνειας της, η οποία εξαρτάται από το βάθος της οπής λαμβάνοντας υπόψη την εξασθένιση της έντασης της δέσμης με την αύξηση του βάθους. Για αυτό τον λόγο, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity Analysis) προκειμένου να διαπιστωθεί ποιος παράγοντας έχει την μεγαλύτερη επίδραση. Η ανάλυση (Nominal range sensitivity analysis technique) που πραγματοποιήθηκε περιλαμβάνει την μεταβολή μίας παραμέτρου κάθε φορά, ενώ οι άλλες παραμένουν σταθερές. Η μεταβολή του αποτελέσματος εξαιτίας της μεταβολής της παραμέτρου καθορίζει την ευαισθησία του μοντέλου στην συγκεκριμένη παράμετρο ([16]).

⇒ **Περίπτωση 1^η: Σταθερή ακτίνα της κάτω επιφάνειας οπής και μεταβολή της ακτίνας εισόδου της οπής**

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 5-29 και διατηρώντας την διάμετρο της κάτω επιφάνειας της οπής σταθερή, μπορεί να υπολογιστεί η απόκριση της φωτοδιόδου για μεταβολή της διαμέτρου εισόδου της οπής.

Σχήμα 5-30: Θεωρητική απόκριση φωτοδιόδου συναρτήσει της ακτίνας εισόδου της οπής

Η διάμετρος της κάτω επιφάνειας της οπής υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την κρίσιμη τιμή της πυκνότητας ισχύος της δέσμης ικανή να προκαλέσει τήξη του υλικού, για δεδομένο βάθος οπής όπως προέκυψε από πείραμα με ισχύ δέσμης 1500W, συχνότητα παλμών 10KHz, το επίπεδο εστίασης στην επιφάνεια του δοκιμίου και χρόνος διεργασίας 1sec (βάθος διάτρησης: 3.54mm, ακτίνα εισόδου οπής: 444.5μm).

⇒ **Περίπτωση 2^η: Σταθερή ακτίνα εισόδου της οπής και μεταβολή της ακτίνας της κάτω επιφάνειας της οπής**

Αντίστοιχα με την πρώτη περίπτωση, από την εξίσωση 5-29, για σταθερή τιμή της ακτίνας εισόδου της οπής, μπορεί να προσδιοριστεί η απόκριση της φωτοδιόδου για μεταβολή της ακτίνας της κάτω επιφάνειας της οπής. Η εκτίμηση της ακτίνας της κάτω επιφάνειας της οπής έγινε για μεταβολή του βάθους της οπής και χρησιμοποιώντας την κρίσιμη τιμή της πυκνότητας ισχύος της δέσμης ικανή να προκαλέσει τήξη του υλικού. Η τιμή της ακτίνας εισόδου της οπής που χρησιμοποιήθηκε προέκυψε από πείραμα με ισχύ δέσμης 1500W, συχνότητα παλμών 10KHz, το επίπεδο εστίασης στην επιφάνεια του δοκιμίου και χρόνος διεργασίας 1sec (βάθος διάτρησης: 3.54mm, ακτίνα εισόδου οπής: 444.5μm).

Από τα διαγράμματα 5-30 και 5-31, διαπιστώνεται ότι για μεταβολή της ακτίνας εισόδου από 0.05mm-1mm, δηλαδή αύξηση κατά 20 φορές, η θεωρητική απόκριση της φωτοδιόδου αυξάνει από σχεδόν 0.0025Volt σε περίπου 1Volt, δηλαδή υπάρχει αύξηση περίπου κατά 400 φορές (Σχήμα 5-30). Αντίστοιχα, για αύξηση του βάθους διάτρησης από 0.2mm-4mm (αύξηση κατά 20 φορές) η οποία αντιστοιχεί σε αύξηση της εκτιμώμενης ακτίνας της κάτω επιφάνειας της οπής από 0.1mm-0.21mm, η απόκριση

της φωτοδιόδου μειώνεται από 0.75Volt έως 0.19Volt, δηλαδή περίπου κατά 4 φορές (Σχήμα 5-31).

Σχήμα 5-31: Θεωρητική απόκριση φωτοδιόδου συναρτήσει του βάθους διάτρησης και της ακτίνας της κάτω επιφάνειας της οπής.

Είναι εμφανές λοιπόν, ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας εισόδου της οπής έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στην απόκριση της φωτοδιόδου, και κατά συνέπεια το μοντέλο αισθητήρα που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ακτίνας εισόδου της οπής κατά την διεργασία διάτρησης.

5.4.1.2.2 Θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ των οπτικών σημάτων και της διαμέτρου εισόδου της οπής για τα πειραματικά αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν από την πειραματική διερεύνηση που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.

Προκειμένου να αξιοποιηθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η συμπεριφορά των οπτικών σημάτων που κατεγράφησαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων που διεξήχθησαν, για την επεξεργασία τους εφαρμόστηκε η τεχνική της Μέσης Τιμής Μικρών Χρόνων (*Short Time Mean Value-STMV*) για χρονικά διαστήματα των *10msec*. Με την τεχνική *STMV* λαμβάνεται η μέση τιμή του σήματος για μικρά χρονικά διαστήματα και χρησιμοποιείται για την μείωση του θορύβου του σήματος και τον προσδιορισμό των διακυμάνσεων του σήματος ([9]).

Από τα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται ότι αύξηση του σήματος των φωτοδiodών αντιστοιχεί σε αύξηση της διαμέτρου εισόδου της οπής και η συσχέτιση τους ακολουθεί μια δευτεροβάθμια τάση, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο με βάση την θεωρητική ανάλυση, και ο συντελεστής R^2 κυμαίνεται από 0.6007 έως και 0.8219.

(α)

(β)

Σχήμα 5-32: Συσχέτιση σήματος συστήματος φωτοδιόδων και διαμέτρου εισόδου της οπής με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα για χρόνο διεργασίας (α) 1sec, (β) 3.5sec και (γ) 6sec

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 5-29, η διάμετρος εισόδου της οπής μπορεί να υπολογιστεί με βάση την τιμή του σήματος που καταγράφεται κατά την διεργασία διάτρησης με δέσμη *Laser* και εκτιμώντας της διάμετρο της κάτω επιφάνειας της οπής με βάση το βάθος διάτρησης όπως προέκυψε από την πειραματική διερεύνηση και χρησιμοποιώντας της κρίσιμη τιμή της πυκνότητας ισχύος ικανή να προκαλέσει τήξη του υλικού.

$$D_{A'} = 2 * \sqrt{\frac{V_{PHD}^{Output}}{R_{Re sis tan ce}^{PHD}} * \frac{2hc_0 * A * (x_1 + S)^2}{q * [\lambda_1^2 - \lambda_2^2] * P_{Re f}^{Laser} * \cos(\theta) * x_2^2 * \pi * (1 - R_{PHD}^{ref}) * (1 - e^{-a_{PHD}L})}} \quad \text{Εξίσωση 5-30}$$

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα θεωρητικά αποτελέσματα της συσχέτισης του σήματος των φωτοδιόδων και της διαμέτρου εισόδου της οπής καθώς και η σύγκριση τους με τα πειραματικά δεδομένα.

Από την σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα θεωρητικά αποτελέσματα φαίνεται ότι βρίσκονται σε καλή συμφωνία, ειδικά για τις περιπτώσεις που η διάμετρος εισόδου της οπής είναι σχετικά μικρή (έως 1000μm). Εξαιτίας της μορφής της κατανομής ισχύος της δέσμης *Laser* (*Gaussian profile*), το κάτω μέρος της οπής δεν είναι επίπεδο, όπως θεωρήθηκε στην θεωρητική ανάλυση, αλλά έχει κωνικό σχήμα. Επίσης, οι ιδιότητες του υλικού, όπως η απορροφητικότητα της ακτινοβολίας, εξαρτώνται σημαντικά από μια πληθώρα παραγόντων, όπως είναι η θερμοκρασία, η δημιουργία πλάσματος, κτλ.

(α)

(β)

(γ)

Σχήμα 5-33: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων της συσχέτισης του σήματος του συστήματος φωτοδιόδων και της διαμέτρου εισόδου της οπής για χρόνο διεργασίας (α) 1sec, (β) 3.5sec και (γ) 6sec.

Όπως αναφέρθηκε και στην θεωρητική ανάλυση των οπτικών σημάτων, η απόκριση της φωτοδιόδου εξαρτάται από την ποσότητα της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της. Μεγαλύτερη διάμετρος εισόδου έχει σαν αποτέλεσμα την διεύρυνση της περιοχής κατεργασίας και κατά συνέπεια την αύξηση της ποσότητας ακτινοβολίας που κατευθύνεται προς κάθε φωτοδίοδο, γεγονός που αποτυπώνεται στην απόκριση των φωτοδίοδων.

Σχήμα 5-34: Σχηματική απεικόνιση επίδρασης διαμέτρου εισόδου στα οπτικά σήματα που λαμβάνονται από την φωτοδίοδο.

Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων είναι αποτέλεσμα κυρίως των παραδοχών και απλοποιήσεων που έγιναν κατά την θεωρητική ανάλυση. Επιπλέον, κατά την αντανάκλαση της ακτινοβολίας από το κάτω μέρος της οπής και την επιστροφή της προς την επάνω επιφάνεια, απώλεια ακτινοβολίας λαμβάνει χώρα λόγω απορρόφησης από τα τοιχώματα της οπής. Όλοι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν τον τρόπο που αντανάκλαται η ακτινοβολία από το κάτω μέρος της οπής και συμβάλουν στις αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων.

Επιπρόσθετα, η ακτίνα της κάτω επιφάνειας της οπής μπορεί να υπολογιστεί από την γεωμετρία της οπής συναρτήσει της ακτίνας εισόδου, του βάθους και της γωνίας κωνικότητας (Σχήμα 5-35):

$$R_A = R_A' - \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)z \quad \text{Εξίσωση 5-31}$$

Με εφαρμογή της εξίσωσης 5-31 στην εξίσωση 5-30, τα βάθος της οπής μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει του σήματος των φωτοδίοδων και της ακτίνας εισόδου R_A' :

$$z = \frac{R_{A'} - \sqrt{\frac{q(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)P_{Ref}^{Laser} \cos(\theta)x_2^2 \pi R_{A'}^2 (1 - R_{PHD}^{Ref}) (1 - e^{-a_{PHD}L}) R_{PHD}^{PHD}}{2hc_0 \pi (x_1 + S)^2 V_{PHD}^{Output}}}}{\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)}$$

Εξίσωση 5-32

Με βάση την κατανομή ισχύος της δέσμης κατά *Gauss* και λαμβάνοντας υπόψη την κρίσιμη τιμή της πυκνότητας ισχύος ικανή να προκαλέσει τήξη του υλικού, η ακτίνα R_y της διατομής της οπής μπορεί να υπολογιστεί για δεδομένο βάθος z_y από την επιφάνεια του υλικού, και κατά συνέπεια μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της γωνίας κωνικότητας φ της οπής.

Σχήμα 5-35: Γεωμετρία της οπής

Με βάση τα πειραματικά δεδομένα για την ακτίνα εισόδου της οπής και την εκτίμηση της γωνίας κωνικότητας όπως περιγράφηκε προηγούμενα, γίνεται εκτίμηση του βάθους της οπής χρησιμοποιώντας την εξίσωση 5-32 και η σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα παρουσιάζεται στα διαγράμματα που ακολουθούν.

(α)

(β)

(γ)

Σχήμα 5-36: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων της συσχέτισης του σήματος του συστήματος φωτοδιόδων και του βάθους διάτρησης για χρόνο διεργασίας (α) 1sec, (β) 3.5sec και (γ) 6sec

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα, υπάρχει ασθενής συσχέτιση μεταξύ του σήματος των φωτοδίοδων και του βάθους διάτρησης. Κατά συνέπεια, διαφαίνεται ότι τα οπτικά σήματα που λαμβάνονται από τις φωτοδιόδους μπορούν να αξιοποιηθούν για την εκτίμηση της διαμέτρου εισόδου της οπής αλλά όχι για την εκτίμηση του βάθους διάτρησης, χρησιμοποιώντας την παρούσα διάταξη και το προτεινόμενο σύστημα παρακολούθησης.

5.4.1.3 ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ «ΤΥΦΛΩΝ» ΟΠΩΝ ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Με βάση την θεωρητική ανάλυση των οπτικών και ακουστικών εκπομπών και την άμεση σύνδεση τους με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, στην συνέχεια παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης της διεργασίας διάτρησης «τυφλών» οπών.

Σχήμα 5-37: Διάγραμμα ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διεργασίας διάτρησης «τυφλών οπών» μέσω ακουστικών και οπτικών εκπομπών.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5-37), η συσχέτιση των ακουστικών και οπτικών σημάτων προερχόμενων από την περιοχή κατεργασίας μπορούν να αξιοποιηθούν και να συνδυαστούν για την εξαγωγή μιας ολοκληρωμένης εικόνας σχετικά με την γεωμετρία της οπής.

Συγκεκριμένα, η αλληλουχία που ακολουθείται έχει ως εξής:

Αρχικά γίνεται συλλογή των ακουστικών εκπομπών και των εκπομπών ακτινοβολίας μέσω του συστήματος των αισθητήρων, όπως έχει περιγραφεί προηγούμενα, και στην συνέχεια πραγματοποιείται η ανάλυση τους. Έπειτα, αρχικά με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης των ακουστικών σημάτων και το θεωρητικό μοντέλο σύνδεσης του πλάτους του σήματος με το βάθος διάτρησης γίνεται εκτίμηση του βάθους της οπής. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση που περιγράφει την μεταβολή της διαμέτρου της δέσμης συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του δοκιμίου (Εξίσωση 3-2) υπολογίζεται η κατανομή ισχύος της δέσμης σε οποιοδήποτε σημείο ακινικά στο επίπεδο που αντιστοιχεί στην κάτω επιφάνεια της οπής (Εξίσωση 3-1), δηλαδή για βάθος z , και με βάση την κρίσιμη τιμή της πυκνότητας ισχύος ικανή να προκαλέσει τήξη του υλικού, γίνεται εκτίμηση της ακτίνας της κάτω επιφάνειας της οπής. Η τιμή αυτή στην συνέχεια τροφοδοτείται στο θεωρητικό μοντέλο συσχέτισης της διαμέτρου εισόδου με το σήμα των φωτοδιόδων και με βάση την απόκριση των φωτοδιόδων γίνεται εκτίμηση της διαμέτρου εισόδου.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την συσχέτιση μεταξύ του πλάτους του ακουστικού σήματος και του βάθους διάτρησης με συντελεστή διόρθωσης $\beta=0.7$ καθώς και η σύγκριση τους με τα πειραματικά δεδομένα.

(β)

(γ)

Σχήμα 5-38: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών (με συντελεστή διόρθωσης $\beta=0.7$) και πειραματικών αποτελεσμάτων της συσχέτισης του πλάτους του ακουστικού σήματος και βάθους οπής για χρόνο διεργασίας (α) 1 sec (β) 3.5 sec και (γ) 6 sec.

Με βάση τα αποτελέσματα εκτίμησης του βάθους διάτρησης, όπως παρουσιάστηκαν στα παραπάνω διαγράμματα, για κάθε πείραμα γίνεται εκτίμηση της διαμέτρου εισόδου της οπής με βάση την εξίσωση 5-30 και τα αποτελέσματα καθώς και η σύγκριση τους με τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.

(α)

(β)

(γ)

Σχήμα 5-39: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών (υπολογιζόμενα με βάση το θεωρητικό βάθος οπής με συντελεστή διόρθωσης $\beta=0.7$) και πειραματικών αποτελεσμάτων της συσχέτισης του σήματος του συστήματος φωτοδιόδων και της διαμέτρου εισόδου της οπής για χρόνο διεργασίας (α) 1sec, (β) 3.5sec και (γ) 6sec.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα 5-38 και 5-39, η εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οπής μέσω των θεωρητικών μοντέλων συσχέτισης τους με τα αντίστοιχα ακουστικά και οπτικά σήματα, βρίσκεται σε καλή συμφωνία με τα

πειραματικά δεδομένα, ιδιαίτερα όσον αφορά το βάθος διάτρησης (μέσο σφάλμα κατ' απόλυτη τιμή 15.4% για το βάθος διάτρησης και 35.1% για την διάμετρο εισόδου). Όσον αφορά την διάμετρο εισόδου της οπής, από τα αποτελέσματα διαφαίνεται ότι υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για οπές με διάμετρο εισόδου έως 1000μm, κάτι το οποίο έχει επισημανθεί και προηγούμενα (παράγραφος 5.4.1.2.2).

Γενικά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το προτεινόμενο σύστημα παρακολούθησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οπής μέσω της συνδυασμένης αξιοποίησης ακουστικών εκπομπών και εκπομπών ακτινοβολίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την εκτίμηση του βάθους διάτρησης και της διαμέτρου εισόδου της οπής σε πραγματικό χρόνο.

5.4.2 ΔΙΑΜΠΕΡΕΙΣ ΟΠΕΣ

5.4.2.1 ΟΠΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ

Όπως και στην περίπτωση των «τυφλών» οπών, έτσι και στις διαμπερείς τα οπτικά σήματα που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά.

Δηλαδή, κατά την αρχή της διεργασίας υπάρχει μια σημαντική αύξηση του σήματος ενώ όταν η οπή γίνεται διαμπερής το επίπεδο του σήματος μειώνεται αισθητά και γίνεται πιο σταθερό. Οπότε και σε αυτή την περίπτωση είναι φανερό ότι τα οπτικά σήματα εμπεριέχουν πληροφορίες σχετικά με την διάτρηση και μπορούν να αξιοποιηθούν για την παρακολούθηση της διεργασίας.

(β)

Σχήμα 5-40: (α) Σήματα συστήματος φωτοδιόδων και (β) μέση τιμή σημάτων φωτοδιόδων για διάτρηση χάλυβα St37 με ισχύ 1200 Watt και το επίπεδο εστίασης 2mm κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου και χρόνο διεργασίας 1sec.

Συγκεκριμένα, κατά την ανάλυση των σημάτων παρατηρήθηκε ότι στην αρχή της διεργασίας το σήμα ανεβαίνει απότομα (σημείο Α), στην συνέχεια πέφτει (σημείο Β) και έπειτα αρχίζει να αυξάνει σταδιακά και σταθεροποιείται.

(α)

(β)

Σχήμα 5-41: Μεγέθυνση σήματος (α) των τεσσάρων φωτοδιόδων και (β) της μέσης τιμής των σημάτων των φωτοδιόδων για διάτρηση χάλυβα St37 με ισχύ 1200 Watt και το επίπεδο εστίασης 2mm κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου και χρόνο διεργασίας 1sec.

Προκειμένου να αξιοποιηθεί αυτό το χαρακτηριστικό του σήματος και να μειωθεί ο θόρυβος και να γίνει πιο ξεκάθαρο, και σε αυτήν την περίπτωση, υπολογίστηκε ο μέσος όρος του σήματος ανά τακτά μικρά χρονικά διαστήματα των 10msec (*Short Time Mean Value - STMV*) για την μείωση του θορύβου του σήματος και τον προσδιορισμό των διακυμάνσεων του σήματος ([9]).

Σχήμα 5-42: Επεξεργασμένο σήμα φωτοδιόδων (STMV για χρονικά διαστήματα των 10msec) για διάτρηση χάλυβα St37 με ισχύ 1200 Watt, το επίπεδο εστίασης 2mm κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου και χρόνο διεργασίας 1sec.

5.4.2.1.1 Θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 5-40, Σχήμα 5-42), την στιγμή που η οπή γίνεται διαμπερής, το επίπεδο του σήματος μειώνεται σημαντικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το σύστημα των φωτοδιόδων λαμβάνει την ακτινοβολία που αντανακλάται από την περιοχή κατεργασίας, δηλαδή το κάτω μέρος της οπής, και κατά συνέπεια την στιγμή που η οπή γίνεται διαμπερής το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας χάνεται. Αυτό το χαρακτηριστικό θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σαν κριτήριο για το εάν και πότε έχει γίνει η οπή διαμπερής προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος της διεργασίας καθώς επίσης και να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του υλικού, γεγονός που έχει συνέπειες στα μεταλλουργικά χαρακτηριστικά του υλικού. Επίσης, μια άλλη εφαρμογή του θα μπορούσε να είναι στην διεργασία κοπής με δέσμη *Laser* για την μείωση του χρόνου διάτρησης (*piercing*) πριν την κοπή.

Επίσης, στην περίπτωση των διαμπερών οπών, διαπιστώθηκε ότι το σύστημα των φωτοδιόδων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την εναπόθεση τήγματος στο κάτω μέρος της οπής (*dross attachment*). Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται τα σήματα των φωτοδιόδων για την περίπτωση όπου δεν υπάρχει εναπόθεση τήγματος στο κάτω μέρος της οπής και στην περίπτωση που υπάρχει εναπόθεση τήγματος.

Σχήμα 5-43: Σήματα φωτοδιόδων για οπή με εναπόθεση τήγματος στο κάτω μέρος της και χωρίς εναπόθεση τήγματος.

Στην περίπτωση εναπόθεσης τήγματος το σήμα των φωτοδιόδων μειώνεται λόγω της μερικής διάτρησης αλλά παραμένει σε υψηλά επίπεδα, συγκρινόμενο με το σήμα για την περίπτωση μη εναπόθεσης τήγματος, εξαιτίας της αντανάκλασης της ακτινοβολίας από το τήγμα που βρίσκεται στο κάτω μέρος της οπής.

Όσον, αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής και την συσχέτιση τους με τα οπτικά σήματα, και σε αυτή την περίπτωση, όπως ήταν αναμενόμενο, τα αποτελέσματα της ανάλυσης των σημάτων των φωτοδιόδων έδειξαν ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της διαμέτρου εισόδου της οπής και της τιμής του σήματος. Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζεται η συσχέτιση των σημάτων των φωτοδιόδων με την διάμετρο εισόδου της οπής για τα πειραματικά αποτελέσματα, όπως αυτά προέκυψαν από την πειραματική διερεύνηση που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.

(α)

(β)

(γ)

(δ)

Σχήμα 5-44: Συσχέτιση σήματος συστήματος φωτοδιόδων και διαμέτρου εισόδου της οπής με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα για χρόνο διεργασίας (α) 1sec, (β) 2sec, (γ) 6sec και (δ) 4sec.

Όπως φαίνεται από τα παρακάτω διαγράμματα, αύξηση του σήματος των φωτοδιόδων αντιστοιχεί σε αύξηση της διαμέτρου εισόδου της οπής και η συσχέτιση τους προσεγγίζεται αρκετά ικανοποιητικά με μια δευτεροβάθμια σχέση με τον συντελεστή R^2 να κυμαίνεται από 0.7433 έως και 0.8156. Η αύξηση της τιμής του σήματος των φωτοδιόδων με την αύξηση της διαμέτρου μπορεί να εξηγηθεί, όπως και στην περίπτωση των «τυφλών» οπών, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι φωτοδιόδοι λαμβάνουν την ακτινοβολία που αντανακλάται και εξέρχεται από την οπή. Μεγαλύτερη διάμετρος εισόδου έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας ακτινοβολίας που λαμβάνεται

από τις φωτοδιόδους εξαιτίας της διεύρυνσης της περιοχής κατεργασίας, γεγονός που αποτυπώνεται στην αύξηση του επιπέδου του σήματος.

Όπως και στην περίπτωση των «τυφλών» οπών, χρησιμοποιώντας την εξίσωση 5-30 που προέκυψε από την ανάλυση των οπτικών σημάτων σε συνάρτηση με την γεωμετρία της οπής και την γεωμετρία του συστήματος των φωτοδiodων, η διάμετρος εισόδου της οπής μπορεί να υπολογιστεί με βάση την τιμή του σήματος που καταγράφεται κατά την διεργασία. Σε αντίθεση με την περίπτωση των «τυφλών» οπών, για την διάμετρο της κάτω επιφάνειας της οπής χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα θεωρητικά αποτελέσματα της συσχέτισης του σήματος των φωτοδiodων και της διαμέτρου εισόδου της οπής καθώς και η σύγκριση τους με τα πειραματικά δεδομένα.

(α)

(β)

Σχήμα 5-45: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων της συσχέτισης του σήματος του συστήματος φωτοδιόδων και της διαμέτρου εισόδου της οπής για χρόνος διεργασίας (α) 1sec, (β) 2sec και (γ) 3sec και (δ) 4sec.

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι τα θεωρητικά αποτελέσματα είναι σε αρκετά καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα με εξαίρεση ορισμένες περιπτώσεις. Διαπιστώθηκε ότι αυτές οι περιπτώσεις είναι εκείνες που η θέση του επιπέδου εστίασης ήταν +2mm πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα πειραματικά αποτελέσματα (παράγραφος 3.3.2, Σχήμα 3-12, σελ. 63) υποδεικνύουν ότι η διάμετρος εξόδου είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις αντίστοιχες περιπτώσεις όπου το επίπεδο εστίασης βρίσκεται στην επιφάνεια του δοκιμίου ή -2mm κάτω από αυτήν. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι ενώ υπάρχει ομαλή αύξηση της διαμέτρου για μετάβαση της θέσης του επιπέδου εστίασης από -2mm σε 0mm σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου, όταν η θέση του επιπέδου εστίασης τοποθετείται +2mm πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου, η αύξηση είναι σημαντικά μεγαλύτερη και απότομη. Καθώς η διάμετρος εξόδου της οπής λαμβάνεται υπόψη από

το μοντέλο προσδιορισμού της διαμέτρου εισόδου (Εξίσωση 5-30), ενώ για τις περιπτώσεις όπου το επίπεδο εστίασης βρίσκεται -2mm κάτω από την επιφάνεια ή πάνω σε αυτήν, οι θεωρητικές προβλέψεις είναι σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα, για τις περιπτώσεις όπου το επίπεδο εστίασης βρίσκεται +2mm πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου, τα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου εκτίμησης της διαμέτρου εισόδου με βάση το σήμα των φωτοδίοδων, παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις συγκρινόμενα με τα πειραματικά δεδομένα.

Συμπερασματικά, η καταγραφή και ανάλυση της ακτινοβολίας που προέρχεται από την περιοχή κατεργασίας μπορεί να παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την διάνοιξη διαμπερών οπών με δέσμη *Laser* τόσο για γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής, όπως είναι η διάμετρος εισόδου, όσο και για ποιοτικά, όπως είναι η εναπόθεση τήγματος στο κάτω μέρος της οπής καθώς και για τον εάν έχει επιτευχθεί διαμπερής διάτρηση ή όχι.

5.4.2.2 ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ

Όπως προαναφέρθηκε, κατά την διάρκεια των πειραμάτων διαμπερών οπών, εκτός από τις εκπομπές ακτινοβολίας από την περιοχή κατεργασίας, γινόταν καταγραφή και των ακουστικών εκπομπών με την βοήθεια του μικροφώνου. Κατά την ανάλυση των ακουστικών σημάτων δεν προέκυψε κάποιο χαρακτηριστικό που να συνδέεται με τα χαρακτηριστικά των διαμπερών οπών.

Όπως έχει αναφερθεί και στις παραγράφους 5.4.1.1 και 5.4.1.1.1, στην περίπτωση των «τυφλών» οπών, βρέθηκε ότι τα ακουστικά σήματα συσχετίζονται σημαντικά με το βάθος διάτρησης ως αποτέλεσμα της ροής του βοηθητικού αερίου στην κοιλότητα της οπής. Στην περίπτωση διαμπερών οπών, το βάθος διάτρησης είναι πεπερασμένο και κατά συνέπεια ήταν αναμενόμενο να μην υπάρξει συσχέτιση των ακουστικών σημάτων με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διαμπερών οπών. Παρόλα αυτά, δεν καθέσται δυνατή ούτε η σύνδεση των ακουστικών σημάτων με κάποιο άλλο χαρακτηριστικό των διαμπερών οπών.

5.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] “Sensors in manufacturing”, (2001), Editor: H.K. Tonshoff, I. Inasaki, Willey-VCH Verlag, GmbH, ISBN: 3-527-29558-5, (Chapter 4: Sensors for process monitoring, 4.5: Laser processing, V. Kral, O. Hillers, Laser Zentrum Hannover, Germany).
- [2] Tonshoff H.K., A. Ostenforf, V. Karal, O. Hillers, (1999), ”Process and condition monitoring features incorporated in Laser heads”, Proceedings of International Congress of Lasers and Electro-Opticis (ICALEO), 15-18 November, San Diego, USA, pp. E109-E118.
- [3] Li L., W.M. Steen, (1992), “Non contact acoustic emission monitoring during Laser processing”, Proceedings of International Congress of Lasers and Electro-Opticis (ICALEO), pp. 719-727.
- [4] Steen W.M., (1991), “Laser material processing”, Springer-Verlag London Limited, Germany.
- [5] Chryssolouris G., P. Sheng, (1991), “Process control of Laser grooving using acoustic sensing”, Transactions of ASME, vol. 13, pp. 268-275.
- [6] Sheng P., G. Chryssolouris, (1994), “Investigation of acoustic sensing for Laser machining processes Part 1: Laser drilling, Journal of materials Processing, Vol. 43, pp. 125-144.
- [7] “Laser Physics and Applications”, (2004), Editors: R. Poprawe, H. Weber, G. Herziger,, Sub-volume C: Laser Applications”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN: 3-540-00105, (Chapter 2.8: Process monitoring and closed-loop control”, W. Weismann).
- [8] Keuster J. De, J. R. Dyflou, J. P. Kruth, (2006), “Monitoring high-power CO₂ Laser cutting by means of an acoustic microphone and photodiodes”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI: 10.1007/s0170-006-0695-z.
- [9] Tonshoff H.K., A. Ostendorf, K. Korber, O. Hillers, "Principles of reference-free process monitoring for Laser material processing based on a multiple sensor system", International Congress of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), Jacksonville, Florida, (USA), October, 15-18, 2001.
- [10] Kinsler, L., A. Frey, A. Coppens, J. Sanders, (2000) “Fundamentals of acoustics”, 4th Edition, John Willey & Sons, USA.
- [11] G. Cryssolouris, P. Sheng, (1994), “Investigation of acoustic sensing for laser machining processes-Part 2: Laser grooving and cutting”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 43, pp. 145-163.
- [12] Ready J.F. (Editor in Chief), (2002) LIA Handbook of laser materials processing, Laser Institute of America, Magnolia Publishing, Inc.
- [13] Grigoryants A., (1994), “Basics of laser material processing”, Mir Publishers.

- [14] Dervos, C., P. Skafidas, J. Mergos, P. Vassiliou, (2004), “p-n Junction photocurrent modelling evaluation under optical and electrical excitation”, Sensors, Vol. 5, pp. 58-70.
- [15] Sandia National Laboratories Program, “Photovoltaic Systems Research and Technology”,
URL:<http://photovoltaics.sandia.gov/docs/PVFEffIntroduction.htm>
- [16] H. C. Frey, S. Patil, (2001), "Identification and Review of Sensitivity Analysis Methods", In Proceedings of NCSU/USDA Workshop on Sensitivity Analysis, June 11-12, North Carolina State University.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΠΑΛΜΟΥΣ ΔΕΣΜΗΣ LASER

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στον σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης *Laser* με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν και παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια με σκοπό την μελλοντική βιομηχανική εφαρμογή του. Παρατίθενται η γενική ιδέα ελέγχου των διεργασιών, τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένα τέτοιου είδους σύστημα και παρουσιάζεται η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου της διεργασίας διάτρησης με δέσμη *Laser* αξιοποιώντας οπτικές και ακουστικές εκπομπές.

6.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

6.2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΙΔΕΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε ένα σύστημα παρακολούθησης οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την συλλογή κάποιων δεδομένων, όπως είναι οι ακουστικές εκπομπές και οι εκπομπές ακτινοβολίας, θερμοκρασία, κτλ. και την μετατροπής τους σε μετρούμενες μεταβλητές, όπως π.χ. εύρος ή συχνότητα. Αυτές οι μετρούμενες μεταβλητές σχετίζονται με μεταβλητές της διεργασίας (π.χ. το βάθος διάτρησης, την διάμετρο της οπής, κτλ.) μέσω «μοντέλων αισθητήρων» (*sensor models*).

Σχήμα 6-1: Γενική ιδέα για έλεγχο κλειστού κυκλώματος της διεργασίας (closed-loop control) (1).

Η σύγκριση μεταξύ των ονομαστικών τιμών και των πραγματικών τιμών των μεταβλητών της διεργασίας έχει σαν αποτέλεσμα ένα σφάλμα, το οποίο και μπορεί να αποτελέσει την πληροφορία εισόδου (*input*) σε ένα σύστημα ελέγχου (*controller*) το οποίο με τις κατάλληλες εντολές αλλάζει τις παραμέτρους της διεργασίας προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα, δηλαδή η διαφορά μεταξύ επιθυμητών και μετρούμενων\εκτιμώμενων τιμών ([1]).

Όπως δείχτηκε από τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας, τα οπτικά και ακουστικά σήματα που δημιουργούνται κατά την διεργασία διάτρησης με παλμούς δέσμης *Laser* μπορούν να συνδεθούν με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής και κατά συνέπεια να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με αυτά και να χρησιμοποιηθούν επίσης και για έλεγχο της διεργασίας. Παρόλα αυτά η εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος σε βιομηχανικό επίπεδο πρέπει να ικανοποιεί αρκετές προδιαγραφές.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, η δομή ενός συστήματος παρακολούθησης διαφέρει ανάλογα με την περίπτωση και για την εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος σε βιομηχανικό περιβάλλον πρέπει να τηρούνται προϋποθέσεις όπως αυξημένη ταχύτητα επεξεργασίας και αξιολόγησης των δεδομένων, αξιοπιστία, αυτοματισμός και εξειδίκευση.

- **Ταχύτητα:** Η ταχύτητα καταγραφής και επεξεργασίας\ανάλυσης των δεδομένων πρέπει να είναι υψηλή σε τέτοιο βαθμό ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση και κατά συνέπεια ο έλεγχος της διεργασίας σε πραγματικό χρόνο. Μεγάλη υπολογιστική ισχύ, σε πολλές περιπτώσεις, καθώς και εξοπλισμός καταγραφής με χαρακτηριστικά που να καλύπτουν τις ανάγκες του συστήματος είναι απαραίτητα.
- **Αξιοπιστία:** Η αξιοπιστία του συστήματος πρέπει να είναι μεγάλη και διασφαλισμένη έτσι ώστε και η συνολική αξιοπιστία της διεργασίας να βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα. Απαραίτητη είναι η δημιουργία αξιόπιστων συστημάτων επεξεργασίας και ανάλυσης των σημάτων καθώς και μοντέλων εκτίμησης του υπό επίβλεψη χαρακτηριστικού.
- **Αυτοματισμός:** Υψηλός αυτοματισμός απαιτείται έτσι ώστε να διενεργούνται όλες οι απαραίτητες λειτουργίες του συστήματος γρήγορα και αξιόπιστα, όπως π.χ αυτόματη ανάλυση και αξιολόγηση των σημάτων, αυτόματη κατάταξη του «σφάλματος» καθώς και άμεση\αυτόματη λήψη αποφάσεων για τις ενέργειες διόρθωσης του.
- **Εξειδίκευση:** Συχνά απαιτείται και υψηλού βαθμού εξειδίκευση όσον αφορά την επίβλεψη του συστήματος από την χρήστη καθώς και για τις διαδικασίες διόρθωσης του συνολικού συστήματος σε περίπτωση βλάβης ή αποτυχίας.

Σχήμα 6-2: Δομές συστημάτων παρακολούθησης ανάλογα με τον σκοπό ([3]).

6.3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΠΑΛΜΟΥΣ ΔΕΣΜΗΣ LASER

Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 5, σήματα σχετικά με την ακτινοβολία προερχόμενα από την περιοχή κατεργασίας καθώς και ακουστικά σήματα μεταδιδόμενα με τον αέρα περιέχουν πληροφορίες και σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής. Συγκεκριμένα τα ακουστικά σήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση του βάθους διάτρησης στην περίπτωση των «τυφλών» οπών και τα οπτικά σήματα για την παρακολούθηση της διαμέτρου εισόδου για την περίπτωση «τυφλών» και διαμπερών οπών αλλά και για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το πότε η οπή γίνεται διαμπερής και την εναπόθεση τήγματος στο κάτω μέρος της οπής.

Με βάση τα «μοντέλα αισθητήρων» (*sensor models*), δηλαδή τα μοντέλα τα οποία συνδέουν τα χαρακτηριστικά των σημάτων με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά θα γίνεται εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών κατά την διεργασία και η σύγκρισή τους με τις ονομαστικές τιμές τους θα χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της μεταβολής των παραμέτρων της διεργασίας έτσι ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια που έχει θέσει ο χρήστης (Σχήμα 6-3).

Σχήμα 6-3: Έλεγχος κλειστού βρόγχου για την διεργασία διάτρησης με παλμούς δέσμης Laser.

Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου της διεργασίας μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας απευθείας ψηφιακό έλεγχο της διεργασίας, δηλαδή έλεγχος μέσω ενός ψηφιακού συστήματος.

Σχήμα 6-4: Δομή ψηφιακού ελέγχου διεργασίας.

Ένα πολύ σημαντικό θέμα στον απευθείας ψηφιακό έλεγχο είναι η διασφάλιση της ασφάλειας του συστήματος. Η τοποθέτηση του ψηφιακού συστήματος (ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ-ΕΛΕΓΚΤΗΣ (Controller)) στον βρόγχο ανατροφοδοσίας μειώνει την ασφάλεια του συστήματος αφού σε περίπτωση δυσλειτουργίας τους η μηχανή θα εκτελεί της ανάλογες εντολές που θα λαμβάνει. Ένα τρόπος για την αύξηση της ασφάλειας του συστήματος είναι ο περιορισμός της απόκρισης του ψηφιακού συστήματος. Αυτό μπορεί να γίνει προγραμματίζοντας το ψηφιακό σύστημα να δίνει εντολές περιορισμένης βηματικής αλλαγής των παραμέτρων ελέγχου (*incremental changes*) στις διάφορες υπομονάδες ελέγχου. Οι υπομονάδες ελέγχου είναι υποσυστήματα μηχανικά ή ηλεκτρονικά τα οποία μεταβάλλουν τις παραμέτρους ελέγχου, όπως π.χ. ο κινητήρας κίνησης των φακών εστίασης για την αλλαγή της θέσης του επιπέδου εστίασης. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας έναν προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή (Programmable Logic Controller- PLC) οποίος θα εφαρμόζει την ευρέως γνωστή Αναλογική-Ολοκληρωτική-Διαφορική (*Proportional+Integral+Derivative - PID*) τεχνική ελέγχου.

Ο *PID* έλεγχος βρίσκει εφαρμογές σε πάρα πολλές βιομηχανικές διεργασίες εξαιτίας του γεγονότος ότι οι ελεγκτές αυτού του τύπου είναι απλοί, τόσο από άποψη σχεδιασμού του ελεγκτή όσο και από την άποψη προσδιορισμού των παραμέτρων του ελεγκτή. Οι ελεγκτές *PID* εκτελούν διάφορες εργασίες εκ των οποίων δύο πολύ σημαντικές είναι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος σταθερής κατάστασης και η αντιστάθμιση της απόκλισης και η δημιουργία διορθωτικών σημάτων/εντολών μέσω του διαφορικού στοιχείου ([2]).

Σχήμα 6-5: Βασικό διάγραμμα *PID* αλγόριθμου.

Όπως προαναφέρθηκε, ο *PID* έλεγχος αποτελείται από τρία στοιχεία:

Το **αναλογικό στοιχείο** εξαρτάται μόνο από την διαφορά μεταξύ της επιθυμητής τιμής του χαρακτηριστικού και της εκτιμώμενης τιμής, δηλαδή το σφάλμα. Το *αναλογικό κέρδος* (*proportional gain*) καθορίζει τον ρυθμό της απόκρισης της εξόδου του συστήματος σε σχέση με το σφάλμα.

$$u_p(t) = K_c * e(t)$$

Εξίσωση 6-1

όπου e είναι το σφάλμα.

Το **ολοκληρωτικό στοιχείο**, ουσιαστικά αθροίζει το σφάλμα στο πέρασμα του χρόνου με αποτέλεσμα ακόμα και ένα μικρό σφάλμα να ωθήσει το ολοκληρωτικό στοιχείο να αυξηθεί αργά. Το ολοκληρωτικό στοιχείο θα αυξάνει συνεχώς με το πέρασμα του χρόνου έως να μηδενιστεί στο σφάλμα, **δηλαδή η κύρια επίδραση του είναι ο μηδενισμός του σφάλματος σταθερής κατάστασης**. Το σφάλμα σταθερής κατάστασης (*steady-state error*) είναι η τελική διαφορά μεταξύ της επιθυμητής τιμής του χαρακτηριστικού και της εκτιμώμενης τιμής.

$$u_i(t) = \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

Εξίσωση 6-2

Το **διαφορικό στοιχείο** προκαλεί την έξοδο του συστήματος να μειωθεί στην περίπτωση που το χαρακτηριστικό αυξάνει με πολύ γρήγορο ρυθμό και είναι ανάλογο του ρυθμού αλλαγής του χαρακτηριστικού. **Αύξηση του χρόνου διαφόρησης T_d (derivative time) θα ωθήσει το σύστημα ελέγχου να «αντιδράσει» πιο έντονα στις αλλαγές του σφάλματος και θα αυξήσει την ταχύτητα απόκρισης του συνολικού συστήματος**. Επίσης, σημαντικό είναι το γεγονός ότι το διαφορικό στοιχείο, είναι πολύ ευαίσθητο στον «θόρυβο» της εισόδου του συστήματος και για αυτό τον λόγο η τιμή του χρόνου διαφόρησης δεν παίρνει μεγάλες τιμές π.χ. εάν το σήμα περιέχει πολύ θόρυβο ή εάν ο επαναληπτικός βρόγχος είναι πολύ αργός η απόκριση του διαφορικού στοιχείου μπορεί να κάνει το σύστημα ασταθές.

$$u_D(t) = K_c T_D \frac{de(t)}{dt}$$

Εξίσωση 6-3

Οπότε η συνολική έξοδος του ελεγκτή *PID* είναι:

$$u(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Εξίσωση 6-4

Ένα πολύ σημαντικό θέμα είναι ο προσδιορισμός των συντελεστών του ελεγκτή έτσι ώστε να ικανοποιεί τις απαραίτητες προδιαγραφές του χρήστη.

Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης *Laser*, αποτελείται από τέσσερις κύριες μονάδες, την **μονάδα προγραμματισμού**, την **μονάδα εκτέλεσης διεργασίας**, την **μονάδα παρακολούθησης και ανάλυσης**, την **μονάδα αξιολόγησης** και την **μονάδα ελέγχου** (Σχήμα 6-6).

Σχήμα 6-6: Δομή συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου κλειστού βρόγχου της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης Laser.

- **M1: Μονάδα προγραμματισμού.** Η μονάδα αυτή αποτελεί την αρχή του συστήματος στην οποία με βάση τις απαιτήσεις που έχει θέση ο χρήστης (διαμπερής ή «τυφλή» διάτρηση, επιθυμητό βάθος, διάμετρο, κτλ.). Με βάση αυτές τις απαιτήσεις γίνεται ο καθορισμός των αρχικών παραμέτρων της διεργασίας μέσω των εμπειρικών μοντέλων και ορίζονται οι στόχοι οι οποίοι τροφοδοτούνται στην μονάδα παρακολούθησης και ελέγχου της διεργασίας.
- **M2: Μονάδα εκτέλεσης διεργασίας.** Είναι η μονάδα στην οποία ανήκει η ίδια η μηχανή κατεργασίας καθώς και όλα τα υποσυστήματα της, π.χ. υπομονάδα δημιουργίας δέσμης, κεφαλή κατεργασίας, κάτοπτρα καθοδήγησης, κτλ, και εκτελεί την διεργασία διάτρησης με βάση τον προγραμματισμό που έχει πραγματοποιηθεί.
- **M3: Μονάδα παρακολούθησης και ανάλυσης.** Είναι η μονάδα στην οποία γίνεται η συλλογή των σημάτων μέσω των αισθητήρων, η ανάλυση τους και η εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οπής μέσω των μοντέλων αισθητήρων, δηλαδή των σχέσεων σύνδεσης των χαρακτηριστικών των σημάτων με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής.
- **M4: Μονάδα αξιολόγησης.** Είναι το τμήμα του συστήματος στο οποίο γίνεται η αξιολόγηση των εκτιμώμενων χαρακτηριστικών με βάση τις επιθυμητές τιμές τους τις οποίες ορίζει ο χρήστης. Η σύγκριση μεταξύ των εκτιμώμενων και των επιθυμητών τιμών των μεταβλητών οδηγεί στον υπολογισμό του σφάλματος το οποίο στην συνέχεια χρησιμοποιείται για την μεταβολή των παραμέτρων ελέγχου από την μονάδα ελέγχου.
- **M5: Μονάδα ελέγχου.** Είναι η μονάδα στην οποία πραγματοποιούνται οι αλλαγές των παραμέτρων ελέγχου της διεργασίας με βάση το σφάλμα μεταξύ εκτιμώμενων και επιθυμητών τιμών των γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Οι νέες τιμές των παραμέτρων τροφοδοτούνται στην μονάδα “**M1:Μονάδα διεργασίας**” και η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

6.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Στην συνέχεια παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε. Γίνετε χρήση των βάσεων δεδομένων για τον προσδιορισμό των αρχικών παραμέτρων της διεργασίας καθώς και των μοντέλων αισθητήρων για την εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, τόσο για την περίπτωση «τυφλών» όσο και διαμπερών οπών.

I. «Τυφλές» οπές

Αρχικά, ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός των παραμέτρων της διεργασίας προκειμένου να είναι δυνατή η δημιουργία συστοιχίας «τυφλών» οπών με συγκεκριμένες γεωμετρικές προδιαγραφές (Πίνακας 6-1).

Προδιαγραφές «τυφλών» οπών	
Βάθος οπής H_b	3.9mm – 4.0mm
Διάμετρος εισόδου $D_{entr.}$	560μm – 570μm
Άλλα	Ελάχιστη θερμική καταπόνηση υλικού

Πίνακας 6-1: Τεχνικές προδιαγραφές για την δημιουργία συστοιχίας «τυφλών» οπών.

Χρησιμοποιώντας την βάση δεδομένων τόσο για το βάθος όσο και την διάμετρο εισόδου, αρχικά προσδιορίζονται οι συνδυασμοί των παραμέτρων που έχουν σαν αποτέλεσμα οπές με βάθος που να βρίσκεται εντός των προδιαγραφών. Στην συνέχεια, με τον ίδιο τρόπο, προσδιορίζονται οι συνδυασμοί των παραμέτρων για οπές με διάμετρο εισόδου που να πληρεί τις τεχνικές προδιαγραφές και έπειτα εντοπίζονται οι κοινοί συνδυασμοί που έχουν σαν αποτέλεσμα οπές με βάθος και διάμετρο εισόδου εντός των ορισμένων προδιαγραφών. Από τους πίνακες 8-1 και 8-2, οι λύσεις που προκύπτουν είναι δύο και φαίνονται στον πίνακα 6-2.

Όπως φαίνεται, και οι δύο συνδυασμοί έχουν σαν αποτέλεσμα οπές με βάθος και διάμετρο εισόδου εντός των προδιαγραφών. Σαν βέλτιστη λύση επιλέγεται ο πρώτος συνδυασμός καθώς ο χρόνος διεργασίας και η ισχύς της δέσμης έχουν τις μικρότερες τιμές και κατά συνέπεια η ροή θερμότητας στο υλικό είναι μικρότερη, ικανοποιώντας έτσι την απαίτηση για ελάχιστη θερμική καταπόνηση του υλικού.

A.A	Ισχύς LP (Watt)	Θέση επιπ. Εστίασης FPP (mm)	Χρόνος διεργασίας IT (sec)	Συχνότητα παλμών PF (Hz)
1.	1000	0	1	1000
2.	1100	-1	2	1000

Πίνακας 6-2: Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων διεργασίας.

Για την επιβεβαίωση της μεθοδολογίας πραγματοποιήθηκαν πειράματα με τις προτεινόμενες παραμέτρους τις διεργασίας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Βάθος H_b (mm)	Διάμετρος εισόδου $D_{entr.}$ (μm)
Εμπειρικό πρότυπο	
3.95	567.92
Μοντέλο αισθητήρα	
4.30	680.99
Πειραματικά	
3.84	398.5

Πίνακας 6-3: Αποτελέσματα εμπειρικών προτύπων, μοντέλων αισθητήρων και πειράματος για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά «τυφλής» οπής.

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6-3, η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των εμπειρικών προτύπων και των πειραματικών δεδομένων υποδεικνύει μια απόκλιση της τάξεως του 2.71% για το βάθος διάτρησης και 29.83% για την διάμετρο εισόδου. Επίσης, τα θεωρητικά μοντέλα συσχέτισης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών με τα ακουστικά και οπτικά σήματα υπερεκτιμούν το βάθος διάτρησης και την διάμετρο εισόδου κατά 10.69% και 41.48%, αντίστοιχα, σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα. Κατά συνέπεια, σε αυτή την περίπτωση το σύστημα ελέγχου, θα έδινε την κατάλληλη εντολή στην μονάδα εκτέλεσης της διεργασίας να σταματήσει η διεργασία όταν η εκτιμώμενη τιμή του ενός από τα δύο παραπάνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά γινόταν ίση με την επιθυμητή τιμή.

II. Διαμπερείς οπές

Αρχικό ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός των παραμέτρων της διεργασίας προκειμένου να είναι δυνατή η δημιουργία συστοιχίας διαμπερών οπών με συγκεκριμένες γεωμετρικές προδιαγραφές (Πίνακας 6-4).

Προδιαγραφές διαμπερών οπών	
Διάμετρος εισόδου $D_{entr.}$	1000 μm – 1100 μm
Διάμετρος εξόδου D_{exit}	500 μm – 600 μm
Άλλα	Ελάχιστος χρόνος διεργασίας

Πίνακας 6-4: Τεχνικές προδιαγραφές για την δημιουργία συστοιχίας διαμπερών οπών

Χρησιμοποιώντας την βάση δεδομένων τόσο για την διάμετρο εισόδου όσο και την διάμετρο εξόδου, αρχικά προσδιορίζονται οι συνδυασμοί των παραμέτρων που έχουν σαν αποτέλεσμα οπές με διάμετρο εισόδου που να βρίσκονται εντός προδιαγραφών. Στην συνέχεια, με τον ίδιο τρόπο, προσδιορίζονται οι συνδυασμοί των παραμέτρων για οπές με διάμετρο εξόδου που να πληροί τις τεχνικές προδιαγραφές και εντοπίζονται οι κοινοί συνδυασμοί που έχουν σαν αποτέλεσμα οπές με διάμετρο εισόδου και εξόδου εντός των ορισμένων προδιαγραφών.

Από τους πίνακες 8-3 και 8-4, οι λύσεις που προκύπτουν είναι αρκετές και φαίνονται στον πίνακα 6-5.

A.A	Ισχύς <i>LP</i> (Watt)	Θέση επιπ. εστίασης <i>FPP</i> (mm)	Χρόνος διεργασίας <i>IT</i> (sec)
1.	600	2	1
2.	650	2	1
3.	700	2	1
4.	750	2	1
5.	650	2	2
6.	700	2	2
7.	750	2	2
8.	700	2	3
9.	750	2	3
10.	800	2	3
11.	850	2	3
12.	700	2	4
13.	750	2	4
14.	800	2	4

Πίνακας 6-5: Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων διεργασίας.

Όπως φαίνεται, όλοι οι συνδυασμοί έχουν σαν αποτέλεσμα οπές με διαμέτρους εισόδου και εξόδου εντός των προδιαγραφών. Σαν βέλτιστη λύση επιλέγεται ο πρώτος συνδυασμός καθώς ο χρόνος διεργασίας είναι μικρότερος, ικανοποιώντας έτσι την απαίτηση για ελάχιστο χρόνο διεργασίας.

Όπως στην περίπτωση «τυφλής» οπής, για την επιβεβαίωση της μεθοδολογίας πραγματοποιήθηκαν πειράματα με τις προτεινόμενες παραμέτρους τις διεργασίας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6-6.

Διάμετρος εισόδου $D_{entr.}$ (μm)	Διάμετρος εξόδου $D_{exit.}$ (μm)
Εμπειρικό πρότυπο	
1000.8	528.50
Μοντέλο αισθητήρα	
1697.62	-
Πειραματικά	
1130.0	550.0

Πίνακας 6-6: Αποτελέσματα εμπειρικών προτύπων, μοντέλων αισθητήρων και πειράματος για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά διαμερούς οπής.

Η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των εμπειρικών προτύπων για τις διαμέτρους εισόδου-εξόδου και των πειραματικών δεδομένων υποδεικνύει αποκλίσεις της τάξεως του 12.90% για την διάμετρο εισόδου και 4.07% για την διάμετρο εξόδου. Επίσης, και σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου συσχέτισης του σήματος των φωτοδίοδων με την γεωμετρία της οπής, υπερεκτιμά την διάμετρο εισόδου, συγκρινόμενη με τα πειραματικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, υπάρχει μια απόκλιση της τάξεως του 33.43%. Όπως στην περίπτωση «τυφλής» οπής, το σύστημα ελέγχου της διεργασίας, θα έδινε την κατάλληλη εντολή στην μονάδα εκτέλεσης να σταματήσει η διεργασία όταν η εκτιμώμενη τιμή της διαμέτρου εισόδου γινόταν ίση με την επιθυμητή.

Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται, όπως έχει ήδη αναφερθεί και κατά την ανάλυση των σημάτων, είναι κυρίως απόρροια των παραδοχών και απλοποιήσεων που έγιναν κατά την θεωρητική προσέγγιση. Η εναπόθεση τήγματος στα τοιχώματα της οπής, η κίνηση του αερίου όχι μόνο κατά τον άξονα ροής, η γεωμετρία του κάτω μέρους της οπής, η απορρόφηση ακτινοβολίας από τα τοιχώματα καθώς και πολλαπλές αντανakλάσεις στην κοιλότητα της οπής, συμβάλουν στην διαφοροποίηση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.

6.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Chryssolouris G., (1992), “Laser machining – Theory and practice”, Springer-Verlag, ISBN: 0-387-97498-9.
- [2] "PID Theory explained", National Instruments LabView software tutorial:
URL: ftp://ftp.ni.com/pub/devzone/pdf/tut_3782.pdf.
- [3] “Laser Physics and Applications”, (2004), Editors: R. Poprawe, H. Weber, G. Herziger,, Sub-volume C: Laser Applications”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN: 3-540-00105, (Chapter 2.8: Process monitoring and closed-loop control”, W. Weismann).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο αναφέρονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα της διατριβής καθώς και θέματα τα οποία παραμένουν ανοιχτά για περαιτέρω διερεύνηση. Ο βασικός σκοπός της διατριβής, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, ήταν η διερεύνηση της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης *Laser* και η ανάπτυξη μεθόδου παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο των χαρακτηριστικών των οπών. Στα πλαίσια της ανάπτυξης της μεθόδου και του συστήματος παρακολούθησης της διεργασίας, θεωρητική ανάλυση της απόκρισης των αισθητήρων συναρτήσει της γεωμετρίας της οπής έλαβε χώρα και τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν πειραματικά. Επίσης, πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση της διεργασίας και αναπτύχθηκαν εμπειρικά πρότυπα συσχέτισης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών με τις παραμέτρους της διεργασίας.

Ανακεφαλαιώνοντας, τα σημαντικότερα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής παρουσιάζονται στην συνέχεια:

- ✓ Ακουστικά σήματα μεταδιδόμενα μέσω του αέρα καθώς και εκπομπές ακτινοβολίας από την περιοχή κατεργασίας συνδέονται με την εξέλιξη της διεργασίας και τα χαρακτηριστικά των οπών. Η παρακολούθηση της διεργασίας σε πραγματικό χρόνο μπορεί να γίνει με ένα σύστημα το οποίο συνδυάζει ένα μικρόφωνο και συστοιχία φωτοδιόδων για την συλλογή των σημάτων. Χαμηλό κόστος, ευελιξία και ευκολία χρήσης είναι βασικά χαρακτηριστικά της προτεινόμενης μεθόδου και του συστήματος παρακολούθησης της διεργασίας.
- ✓ Η θεωρητική ανάλυση των ακουστικών σημάτων έδειξε ότι το πλάτος του ακουστικού σήματος που δημιουργείται εξαιτίας της ροής του βοηθητικού αερίου στην κοιλότητα της οπής, συνδέεται ισχυρά με το βάθος της οπής. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων υποδεικνύει ότι οι θεωρητικές προβλέψεις βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.
- ✓ Η θεωρητική ανάλυση των οπτικών σημάτων, προερχόμενα από την αντανάκλαση της δέσμης *Laser* από την περιοχή κατεργασίας, υποδεικνύει ότι το επίπεδο του σήματος συνδέεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής και συγκεκριμένα

με την διάμετρο εισόδου. Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών προβλέψεων και πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξε ότι υπάρχει καλή συμφωνία, ειδικά για οπές με διάμετρο εισόδου έως και 1000μm.

- ✓ Όσον αφορά την περίπτωση διαμερών οπών, τα αποτελέσματα έδειξαν και σε αυτή την περίπτωση ότι οι εκπομπές ακτινοβολίας συνδέονται με την διάμετρο εισόδου της οπής, ενώ δεν καθέσται δυνατή η συσχέτιση των ακουστικών σημάτων με κάποιο γεωμετρικό ή και ποιοτικό χαρακτηριστικό των διαμερών οπών.
- ✓ Επίσης, στην περίπτωση διαμερών οπών, τα οπτικά σήματα καταγραφόμενα από το σύστημα των φωτοδίοδων παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με καθαρά ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως είναι το εάν έχει επιτευχθεί διαμερής οπή ή όχι και προσδιορισμός της χρονικής στιγμής που συμβαίνει αυτό, καθώς και το εάν υπάρχει εναπόθεση τηγμένου υλικού στην έξοδο της οπής.
- ✓ Η συσχέτιση μεταξύ των σημάτων και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών βασίζεται κατά κανόνα στην γεωμετρία της οπής, οπότε εν δυνάμει το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με μικρές διαφοροποιήσεις (π.χ. φωτοδιόδοι διαφορετικού φάσματος απόκρισης), για διάφορα μεταλλικά υλικά αλλά και πηγές δέσμης *Laser*.
- ✓ Το βάθος διάτρησης για την περίπτωση «τυφλών» οπών εξαρτάται σημαντικά από την ισχύ της δέσμης και την θέση του επιπέδου εστίασης αλλά και τον χρόνο δράσης της δέσμης, ενώ η διάμετρος εισόδου επηρεάζεται κυρίως από την ισχύ της δέσμης και την θέση του επιπέδου εστίασης.
- ✓ Στην περίπτωση διαμερών οπών, η διάμετρος εισόδου εξαρτάται σημαντικά από την ισχύ και την θέση του επιπέδου εστίασης όπως επίσης και η διάμετρος εξόδου της οπής. Όσον αφορά την κωνικότητα των οπών, προσδιοριζόμενη από τον λόγο των διαμέτρων εισόδου και εξόδου, αυτή εξαρτάται κυρίως από την θέση του επιπέδου εστίασης.
- ✓ Τα εμπειρικά πρότυπα που αναπτύχθηκαν για κάθε περίπτωση (γεωμετρικό χαρακτηριστικό) μπορούν να αξιοποιηθούν για την πρόβλεψη της γεωμετρίας της οπής για δεδομένες τιμές παραμέτρων. Τα προτεινόμενα εμπειρικά πρότυπα προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα με ποσοστά που κυμαίνονται σε επίπεδα του 86% κατά μέσο όρο για το βάθος διάτρησης και 80% για την διάμετρο εισόδου για την περίπτωση «τυφλών» οπών και σχεδόν 70%,

78% και 62% αντίστοιχα για την διάμετρο εισόδου, την διάμετρο εξόδου και την κωνικότητα στην περίπτωση των διαμερών οπών.

- ✓ Η βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τα εμπειρικά πρότυπα για κάθε γεωμετρικό χαρακτηριστικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των αρχικών τιμών των παραμέτρων, δηλαδή τον προγραμματισμό της διεργασίας, προκειμένου να δημιουργηθούν οπές με συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (*off-line programming*) συμβάλλοντας στην μείωση του συνολικού χρόνου κατεργασίας.

7.1 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάστηκε η διερεύνηση της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμη *Laser* καθώς και η ανάπτυξη μεθόδου παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο των γεωμετρικών, αλλά και ποιοτικών, χαρακτηριστικών των οπών, μέσω ακουστικών εκπομπών και εκπομπών ακτινοβολίας. Μια σειρά από θέματα σχετικά με την διεργασία απαιτούν περαιτέρω έρευνα. Συνοπτικά τα θέματα των οποίων η επίλυση θα οδηγήσει σε μια ολοκληρωμένη και πλήρως εφαρμόσιμη μεθοδολογία σε βιομηχανικούς τομείς, συμπεριλαμβάνουν:

- Ανάπτυξη πλήρως αυτοματοποιημένου και ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου της διεργασίας χρησιμοποιώντας τα θεωρητικά μοντέλα συσχέτισης των ακουστικών σημάτων και των εκπομπών ακτινοβολίας με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οπών.
- Διερεύνηση εφαρμογής και επέκτασης της μεθόδου και σε άλλες διεργασίες με δέσμη *Laser*, με σκοπό την ανάπτυξη ενός ευέλικτου συστήματος παρακολούθησης ικανό να χρησιμοποιηθεί για πολλές εφαρμογές, όπως κοπή, συγκόλληση, χάραξη, κτλ., χωρίς να είναι απαραίτητες γίνουν σημαντικές αλλαγές του συστήματος.
- Βελτίωση εμπειρικών προτύπων για την ακριβέστερη εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και τον καλύτερο προγραμματισμό της διεργασίας.
- Επέκταση των εμπειρικών προτύπων και σε άλλα μεταλλικά υλικά, όπως είναι κράματα αλουμινίου, ανοξείδωτος χάλυβας, σκληρυμένοι χάλυβες. κτλ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

A :	εμβαδό κάτω επιφάνειας οπής ($\mathbf{m^2}$)
A' :	εμβαδό επάνω επιφάνειας οπής ($\mathbf{m^2}$)
A_0 :	εμβαδό επιφάνειας εισόδου οπής ($\mathbf{m^2}$)
a :	Συντελεστής θερμικής διάχυσης ($\mathbf{m^2/sec}$)
A_{eff} :	επιφάνεια που αντιστοιχεί στην προβολή της επάνω διαμέτρου της οπής στο επίπεδο $A-A$ ($\mathbf{m^2}$)
A_{eff}^{PHD} :	επιφάνεια που αντιστοιχεί στην προβολή της επάνω διαμέτρου της οπής στην φωτοευαίσθητη επιφάνεια της φωτοδιόδου ($\mathbf{m^2}$)
A_{mic} :	επιφάνεια μικροφώνου ($\mathbf{m^2}$)
$Ampl_{gas}^P$:	πλάτος κορυφής ταλάντωσης αερίου ($\mathbf{m}$)
$Ampl_{mic}^P$:	πλάτος κορυφής ταλάντωσης σήματος ($\mathbf{m}$)
$Ampl_{gas}^{PtP}$:	πλάτος ταλάντωσης αερίου από κορύφή και σε κορύφή ($\mathbf{m}$)
$Ampl_{mic}^{PtP}$:	πλάτος ταλάντωσης σήματος από κορύφή και σε κορύφή ($\mathbf{m}$)
a_{PHD} :	οπτικός συντελεστής απορρόφησης ακτινοβολίας ($\mathbf{m^{-1}}$)
c :	ταχύτητα ήχου ($\mathbf{m/sec}$)
c_0 :	ταχύτητα φωτός ($\mathbf{m/sec}$)
C_p :	Ειδική θερμότητα ($\mathbf{Joule/Kgr K}$)
$D_{A'}$:	διάμετρος εισόδου της οπής ($\mathbf{m}$)
$D_{ent.}$:	Διάμετρος εισόδου διαμπερούς οπής ($\mathbf{m}$)
$D_{exi.}$:	Διάμετρος εξόδου διαμπερούς οπής ($\mathbf{m}$)
$E(Y_i)$:	μέση τιμή (-)
e :	σφάλμα (-)
f :	μετατόπιση αερίου ($\mathbf{m}$)
$f_{cut-off}$:	συχνότητα αποκοπής ($\mathbf{Hz}$)
FPP :	θέση επιπέδου εστίασης ($\mathbf{m}$)
H :	κάθετη απόσταση κέντρου επιφάνειας φωτοδιόδου από την επιφάνεια του δοκιμίου ($\mathbf{m}$)
h :	σταθερά <i>Plank</i> ($\mathbf{Joule sec}$)

I_0 :	Μέγιστη πυκνότητα ισχύος δέσμης <i>Laser</i> (Watt)
IT :	χρόνος διεργασίας (sec)
k :	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (Watt/m K)
K_c :	κέρδος ελεγκτή (-)
L :	οριζόντια απόσταση κέντρου επιφάνειας φωτοδιόδου από το κέντρο της οπής (m)
M^2 :	Παράμετρος ποιότητας δέσμης <i>Laser</i> (-)
M_{gas} :	συντελεστής συμπιεστότητας αερίου ανά μονάδα όγκου (Pa/m³)
LP :	ισχύς δέσμης <i>Laser</i> (Watt)
P_{Ref}^{Laser} :	ισχύς ακτινοβολίας που αντανακλάται (Watt)
$P_{A'}^{Laser}$:	ισχύς ακτινοβολίας που διέρχεται από την επιφάνεια A' (Watt)
P_{PHD}^{Laser} :	ισχύς ακτινοβολίας που προσπίπτει στην φωτοευαίσθητη επιφάνεια της
$P_{ass.gas}$:	πίεση βοηθητικού αερίου (Pa)
PC_{PHD} :	ένταση ρεύματος φωτοδιόδου (Amp)
PF :	Συχνότητα παλμών δέσμης <i>Laser</i> (Hz)
q :	φορτίο ηλεκτρονίου (Amp sec)
$R_{A'}$:	ακτίνα εισόδου της οπής (m)
R_{Mater}^{Ref} :	συντελεστής αντανακλαστικότητας υλικού (-)
R_{PHD}^{Ref} :	συντελεστής αντανακλαστικότητας επιφάνειας φωτοδιόδου (-)
$R_{Resistance}^{PHD}$:	αντίσταση απλοποιημένου ηλεκτρικού κυκλώματος φωτοδιόδου (Ohm)
R_0 :	ακτίνα οπής στην επιφάνεια του δοκιμίου (m)
R^2 :	συντελεστής προσδιορισμού εμπειρικού προτύπου (-)
R_f :	διάμετρος δέσμης σε απόσταση z από την επιφάνεια του δοκιμίου (m)
R_{fo} :	διάμετρος δέσμης <i>Laser</i> στο εστιακό επίπεδο (m)
R_z :	ακτίνα οπής σε απόσταση z από την επιφάνεια του δοκιμίου (m)
S :	απόσταση επιπέδου $A-A$ από την επιφάνεια της φωτοδιόδου (m)
S_{mic} :	ευαισθησία μικροφώνου (V/Pa)
SSR :	άθροισμα τετραγώνων σύγκλισης (-)

$SSTO$:	συνολικό άθροισμα τετραγώνων (-)
$STMV$:	μέση τιμή μικρού χρόνου (<i>Short time mean value</i>) (-)
T_d :	χρόνος διαφόρισης ελεγκτή (sec)
TEM_{00} :	κατανομή ισχύος δέσμης <i>Laser</i> (-)
T_i :	χρόνος ολοκλήρωσης ελεγκτή (sec)
t_{on} :	διάρκεια παλμού (χρόνος που η δέσμη ενεργεί στην διάρκεια ενός παλμού) (sec)
u :	απόκριση ελεγκτή (-)
ν :	συχνότητα ακτινοβολίας που προσπίπτει στην φωτοδίοδο (Hz)
$var(Y_i)$:	διασπορά (-)
V_{PHD}^{Total} :	τάση στα άκρα της φωτοδίοδου (Volt)
x_i :	ανεξάρτητη μεταβλητή (-)
Y_i :	εξαρτημένη μεταβλητή (-)
z :	απόσταση από την επιφάνεια του δοκιμίου (m)

Ελληνικοί χαρακτήρες και σύμβολα

α_i :	συντελεστής εμπειρικού μοντέλου (-)
β :	συντελεστής διόρθωσης (-)
δ_i :	θέση του επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου (m)
ε_i :	σφάλμα εμπειρικού μοντέλου (-)
θ :	γωνία κλίσης φωτοδίοδου σε σχέση με τον κάθετο άξονα (rad)
λ :	μήκος κύματος δέσμης <i>Laser</i> (μm)
ρ :	πυκνότητα (Kgr/m³)
φ :	γωνία κωνικότητας οπής (rad)
φ_{PHD} :	γωνία κωνικότητας που αντιστοιχεί στην στερεή γωνία της φωτοδίοδου (rad)
ω :	στερεή γωνία που περιγράφει τον κώνο της οπής (Sr)
ω_{PHD} :	στερεή γωνία φωτοδίοδου (Sr)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1: Σχηματική απεικόνιση διεργασίας διάτρησης με δέσμη Laser. -----	3
Σχήμα 1-2: Διάφορες τεχνικές διάτρησης (α) κρουστική διάτρηση, (β) διάτρηση μέσω κοπής και (γ) ελικοειδής διάτρηση. -----	4
Σχήμα 1-3: Εφαρμογές διάτρησης με παλμούς δέσμης Laser σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς -----	5
Σχήμα 1-4: Ένταση δέσμης Laser (α) συνεχούς κύματος και (β) παλμικού τύπου. -----	6
Σχήμα 1-5: Χαρακτηριστικά και ατέλειες της διεργασίας διάτρησης με δέσμη Laser. -----	7
Σχήμα 1-6: Χαρακτηριστικά και ατέλειες της διεργασίας συγκόλλησης με δέσμη Laser. -----	7
Σχήμα 1-7: Χαρακτηριστικά και ατέλειες της διεργασίας κοπής με δέσμη Laser. -----	8
Σχήμα 1-8: Ταξινόμηση περιοχών και χρόνων παρακολούθησης ανάλογα με το σημείο και την χρονική στιγμή ([35]). -----	9
Σχήμα 1-9: Σχηματικό διάγραμμα προτεινόμενης μεθόδου διερεύνησης της χρήσης οπτικών και ακουστικών εκπομπών για την παρακολούθηση της διεργασίας διάτρησης με δέσμη Laser σε πραγματικό χρόνο. -----	10
Σχήμα 2-1: Στάδια θέρμανσης και διάτρησης/ψύξης ([1]).-----	17
Σχήμα 2-2: (α) Ενεργειακή ισορροπία στην περιοχή τήξης κατά την διάτρηση με παλμούς δέσμης Laser, (β) απαιτούμενη παλμοί για την έναρξη τήξης του υλικού συναρτήσει της πυκνότητας ισχύος και (γ) θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα για το βάθος διάτρησης συναρτήσει της πυκνότητας ισχύος ([2]).-----	18
Σχήμα 2-3: Σχηματική απεικόνιση μοντέλου διάτρησης με δέσμη Laser ([8]).-----	19
Σχήμα 2-4: Εκτιμώμενο θερμοκρασιακό πεδίο και γεωμετρία της οπής για (α)αλουμίνιο και (β) χαλκό ([13]).-----	20
Σχήμα 2-5: Φωτογραφίες οπών οι οποίες δημιουργήθηκαν με οξυγόνο (αριστερά) και αργό (δεξιά) ως βοηθητικό αέριο([20]) .-----	21
Σχήμα 2-6: (α) Σχηματικό διάγραμμα αύξησης ισχύος κατά την διάτρηση και (β) οπές διαφορετικής κωνικότητας με εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνικής από τους Li et al. ([35]).	24

Σχήμα 2-7: Δομή νευρωνικού δικτύου για την συσχέτιση των παραμέτρων της διεργασίας με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οπών ([41]). -----	25
Σχήμα 2-8. Διάφορα φαινόμενα, σήματα και αντίστοιχοι αισθητήρες κατά τις διεργασίες κοπής και συγκόλλησης με δέσμη Laser ([49]).-----	26
Σχήμα 2-9: Διατάξεις συστημάτων παρακολούθησης των διεργασιών με δέσμη Laser χρησιμοποιώντας (α) CCD κάμερα, (β) πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, (γ) φωτοδίοδο και (δ) μικρόφωνο ([50]).-----	27
Σχήμα 2-10. Σχηματική αναπαράσταση μεθόδων μέτρησης ακουστικών εκπομπών κατά τις διεργασίες με δέσμη Laser ([52]). -----	28
Σχήμα 2-11. (α) Πειραματική διάταξη για την μελέτη των ακουστικών σημάτων κατά την διεργασία διάτρησης και θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα συσχέτισης της συχνότητας του ήχου και του βάθους διάτρησης για (β) τυφλές και (γ) διαμπερείς οπές ([54], [55]).-----	29
Σχήμα 2-12: (α) Πειραματική διάταξη των Grad και Mozina και (β) παλμοί Laser και αντίστοιχα οπτικοακουστικά σήματα ([58]). -----	30
Σχήμα 2-13: Σχηματική απεικόνιση συστήματος παρακολούθησης της διεργασίας διάτρησης με δέσμη Laser των Strgar et al. ([59], [60]). -----	31
Σχήμα 2-14: (α) πειραματική διάταξη για την ανίχνευση των κρουστικών σημάτων, (β) τυπικό LBPD σήμα και συσχέτιση (γ) σήματος LBPD με τον αριθμό των παλμών και (δ) βάθους οπής με τον αριθμό των παλμών ([62]).-----	32
Σχήμα 2-15: (α) Πειραματική διάταξη των Stafe et al. και (β) Τυπικό ακουστικό σήμα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου ([64]).-----	32
Σχήμα 2-16: Πειραματική διάταξη για την παρακολούθηση της διεργασίας αποκόλλησης με δέσμη Laser μέσω μέτρησης του χρόνου άφιξης ακουστικών σημάτων ([66]). -----	33
Σχήμα 2-17: Πειραματική διάταξη για την παρακολούθηση της διεργασίας μικρο-διάτρησης μέσω του χρόνου ανίχνευσης των υπερηχητικών σημάτων ([68]) -----	34
Σχήμα 2-18. Σχηματική αναπαράσταση μεθόδων μέτρησης οπτικών σημάτων κατά τις διεργασίες με δέσμη Laser ([52]). -----	34
Σχήμα 2-19. (α) Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος παρακολούθησης της διαμέτρου της οπής και (β) μέτρηση της διαμέτρου της οπής χρησιμοποιώντας την αντανακλώμενη ακτινοβολία ([73]). -----	35

Σχήμα 2-20: Σχηματική αναπαράσταση του πλάσματος για τα διάφορα στάδια της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης Laser κράματος SUPERNI 263A ([74]).	35
Σχήμα 2-21: Φωτογράφιση υψηλής ταχύτητας κατά την διάτρηση κράματος Nimonic 263 με παλμούς δέσμης Laser ([16]).	36
Σχήμα 2-22. Διάταξη συστήματος παρακολούθησης της διεργασίας διάτρησης\κοπής συστήματος κατεργασίας που χρησιμοποιεί οπτική ίνα για την παράδοση της δέσμης Laser ([75]).	36
Σχήμα 2-23: Αρχή λειτουργίας του συστήματος ελέγχου της θέσης του επιπέδου εστίασης των Mahlen et al. ([76]).	37
Σχήμα 2-24: (α) Σύστημα ανίχνευσης διαμετρών διάτρησης και (β) διακύμανση των διαμέτρων εισόδου και εξόδου διαμετρών οπών χρησιμοποιώντας ή όχι το προτεινόμενο σύστημα ([77]).	37
Σχήμα 2-25: (α) Πειραματική διάταξη, (β) Σχηματική απεικόνιση μέτρησης βάθους οπής μέσω των παραμορφώσεων και φωτογραφίες της διεργασίας διάτρησης και (γ) ακτινοβολία από την περιοχή χωρίς και με υπέρθεση παλμών ([80]).	39
Σχήμα 3-1: Μηχανή κατεργασίας με δέσμη Laser TRUMPF TRUMATIC TLF 2530.	50
Σχήμα 3-2: Κατανομή πυκνότητας ισχύος TEM ₀₀ (κατανομή Gauss).	51
Σχήμα 3-3: (α) Κυρίως πρόγραμμα και (β) υποπρόγραμμα για τον προγραμματισμό διάτρησης με δέσμη Laser στην μηχανή κατεργασίας TRUMPF TRUMATIC TLF 2530.	52
Σχήμα 3-4: Θερμικές ιδιότητες μαλακού χάλυβα St37 συναρτήσει της θερμοκρασίας ([5]).	53
Σχήμα 3-5: Εικόνες SEM «τυφλών» οπών.	54
Σχήμα 3-6: Πειραματικά αποτελέσματα για το βάθος διάτρησης στην περίπτωση "τυφλών" οπών συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας (α) για συχνότητα παλμών 10KHz, (β) για συχνότητα παλμών 5KHz και (γ) για συχνότητα παλμών 1KHz.	56
Σχήμα 3-7: Εικόνες SEM τυφλών οπών και μετρήσεις διαμέτρων.	57
Σχήμα 3-8: Πειραματικά αποτελέσματα για την διάμετρο εισόδου στην περίπτωση "τυφλών" οπών συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας (α) για συχνότητα παλμών 10KHz, (β) για συχνότητα παλμών 5KHz και (γ) για συχνότητα παλμών 1KHz.	59
Σχήμα 3-9: Φωτογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διαμετρών οπών (α) διαμέτρων εισόδου και (β) διαμέτρων εξόδου.	61

Σχήμα 3-10: Διάμετρος εισόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας. -----	62
Σχήμα 3-11: Θέσεις επιπέδου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του δοκιμίου. -----	62
Σχήμα 3-12: Διάμετρος εξόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας. -----	63
Σχήμα 3-13: Αναλογία διαμέτρων εισόδου και εξόδου συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας. -----	65
Σχήμα 4-1: Φυσική και εμπειρική μοντελοποίηση ([2]). -----	68
Σχήμα 4-2: Εφαρμογή μοντέλου για τον έλεγχο της διεργασίας. -----	69
Σχήμα 4-3: Ποσοστιαία επίδραση παραμέτρων στο βάθος διάτρησης -----	74
Σχήμα 4-4: Αποτελέσματα εμπειρικού προτύπου για το βάθος διάτρησης στην περίπτωση "τυφλών" οπών συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας (α) για συχνότητα παλμών 10KHz, (β) για συχνότητα παλμών 5KHz και (γ) για συχνότητα παλμών 1KHz και τα αντίστοιχα σφάλματα (Residuals) προσδιοριζόμενα από την διαφορά μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών τιμών. -----	77
Σχήμα 4-5: Ποσοστιαία επίδραση παραμέτρων στην διάμετρο εισόδου -----	78
Σχήμα 4-6: Αποτελέσματα εμπειρικού προτύπου για την διάμετρο εισόδου στην περίπτωση "τυφλών" οπών συναρτήσει των παραμέτρων της διεργασίας (α) για συχνότητα παλμών 10KHz, (β) για συχνότητα παλμών 5KHz και (γ) για συχνότητα παλμών 1KHz και τα αντίστοιχα σφάλματα (Residuals) προσδιοριζόμενα από την διαφορά μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών τιμών. -----	81
Σχήμα 4-7: Ποσοστιαία επίδραση παραμέτρων στην διάμετρο εισόδου. -----	82
Σχήμα 4-8: Αποτελέσματα εμπειρικού προτύπου για την διάμετρο εισόδου διαμπερών οπών. -	84
Σχήμα 4-9: Ποσοστιαία επίδραση παραμέτρων στην διάμετρο εξόδου. -----	85
Σχήμα 4-10: Αποτελέσματα εμπειρικού προτύπου για την διάμετρο εξόδου διαμπερών οπών. -	87
Σχήμα 4-11: Φωτογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου επιφανειών (α) εισόδου και (β) εξόδου διαμπερών οπών. -----	88
Σχήμα 4-12: Ποσοστιαία επίδραση παραμέτρων στον λόγο των διαμέτρων. -----	89
Σχήμα 4-13: Αποτελέσματα εμπειρικού προτύπου για τον λόγο των διαμέτρων εισόδου και εξόδου των διαμπερών οπών. -----	91

Σχήμα 4-14: Παράδειγμα εκτίμησης βάθους οπής για συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων καθώς και προσδιορισμού παραμέτρων για συγκεκριμένο βάθος οπής μέσω της βάσης δεδομένων. --	92
Σχήμα 5-1: Βήματα κατά την παρακολούθηση της διεργασίας και δομή του συστήματος. -----	97
Σχήμα 5-2: Σχηματική απεικόνιση συστήματος κατεργασίας με δέσμη Laser τύπου «γέφυρας». -----	98
Σχήμα 5-3: Διάταξη αισθητήρων (α) ομοαξονικά με την δέσμη Laser και (β) μη-ομοαξονικά με την δέσμη Laser -----	101
Σχήμα 5-4: Απόκριση φωτοδιόδων (α) EPD740, (β) EPD1300 και (γ) BPX65 κατά την διάτρηση "τυφλής" οπής σε χάλυβα St37 με ισχύ 1000 Watt, συχνότητα παλμών 10KHz, το επίπεδο εστίασης τοποθετημένο στην επιφάνεια του δοκιμίου και για χρόνο 3.5 sec.-----	105
Σχήμα 5-5: Εύρη λειτουργίας φωτοδιόδων και περιοχή ενδιαφέροντος του οπτικού φάσματος. -----	106
Σχήμα 5-6: Φωτοδίοδος OSRAM BPX65.-----	106
Σχήμα 5-7: (α) Μικρόφωνο PCB TMS130D10 και (β) προενισχυτής PCB TMS130P10 -----	106
Σχήμα 5-8: Τρισδιάστατες απόψεις της κεφαλής κατεργασίας και της ιδιοσυσκευής τοποθέτησης των αισθητήρων.-----	107
Σχήμα 5-9: (α) Τρισδιάστατο μοντέλο CAD και (β) κατασκευαστικό σχέδιο ιδιοσυσκευής. --	108
Σχήμα 5-10: Φυσικό πρωτότυπο ιδιοσυσκευής. -----	108
Σχήμα 5-11: (α)Υπολογιστής συλλογής δεδομένων και (β)κάρτα συλλογής δεδομένων NI PXI-4472.-----	109
Σχήμα 5-12: Διάταξη και συνδεσμολογία αισθητήρων με την μονάδα καταγραφής. -----	110
Σχήμα 5-13: Διάγραμμα ροής προγράμματος για την καταγραφή των σημάτων -----	110
Σχήμα 5-14: Απεικόνιση (α) της οθόνης ελέγχου και (β) του διαγράμματος ελέγχου του προγράμματος συλλογής των σημάτων στο LabVIEW.-----	111
Σχήμα 5-15: Σήμα μικροφώνου κατά την διάτρηση με δέσμη Laser. -----	112
Σχήμα 5-16: (α) Μέγιστη και ελάχιστη τιμή και (β) πλάτος του επεξεργασμένο ακουστικού σήματος (STMV για χρονικά διαστήματα των 10msec) -----	113
Σχήμα 5-17: Μοντέλο ροής του αερίου στην κοιλότητα της οπής. -----	114

Σχήμα 5-18: Σχηματική απεικόνιση της εισόδου του αερίου στην κοιλότητα της οπής. -----	117
Σχήμα 5-19: Πλάτος ταλάντωσης αερίου συναρτήσει του βάθους της οπής. -----	118
Σχήμα 5-20: Θεωρητική τιμή πλάτους σήματος συναρτήσει του βάθους της οπής. -----	118
Σχήμα 5-21: Συσχέτιση πλάτους ακουστικού σήματος και βάθους οπής με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα για θέση του επιπέδου εστίασης (α) 2mm κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου (β) 2mm πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου και (γ) στην επιφάνεια του δοκιμίου-----	120
Σχήμα 5-22: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων της συσχέτισης του πλάτους του ακουστικού σήματος και βάθους οπής για θέση του επιπέδου εστίασης (α) 2mm κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου (β) 2mm πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου και (γ) στην επιφάνεια του δοκιμίου. -----	122
Σχήμα 5-23: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών (με συντελεστή διόρθωσης $\beta=0.7$) και πειραματικών αποτελεσμάτων της συσχέτισης του πλάτους του ακουστικού σήματος και βάθους οπής για θέση του επιπέδου εστίασης (α) 2mm κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου (β) 2mm πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου και (γ) στην επιφάνεια του δοκιμίου.-----	123
Σχήμα 5-24: Σήμα του συστήματος φωτοδιόδων κατά την διάτρηση μαλακού χάλυβα St37, με ισχύ 1500 Watt, συχνότητα παλμών 10KHz, το επίπεδο εστίασης στην επιφάνεια του δοκιμίου και για χρόνο 3.5sec. -----	124
Σχήμα 5-25 (α)Λεπτομερής άποψη του σήματος των φωτοδιόδων για διάρκεια 20msec, (β)λεπτομερής άποψη του STMVσήματος των φωτοδιόδων (για χρονικά διαστήματα των 0.5msec) για διάρκεια 20msec.-----	125
Σχήμα 5-26: Γεωμετρική απεικόνιση ορατής περιοχής από την φωτοδίοδο. -----	126
Σχήμα 5-27: Γεωμετρική απεικόνιση θέσης φωτοδιόδου σε σχέση με την οπή. -----	127
Σχήμα 5-28:Δημιουργία ζευγους «οπών-ηλεκτρονίων» και ηλεκτρικού ρεύματος από την πρόσπτωση ακτινοβολίας στην επιφάνεια της φωτοδιόδου ([23],[24]). -----	129
Σχήμα 5-29: Απορροφούμενη ακτινοβολία. -----	129
Σχήμα 5-30: Θεωρητική απόκριση φωτοδιόδου συναρτήσει της ακτίνας εισόδου της οπής----	131
Σχήμα 5-31: Θεωρητική απόκριση φωτοδιόδου συναρτήσει του βάθους διάτρησης και της ακτίνας της κάτω επιφάνειας της οπής.-----	132
Σχήμα 5-32: Συσχέτιση σήματος συστήματος φωτοδιόδων και διαμέτρου εισόδου της οπής με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα για χρόνο διεργασίας (α) 1sec, (β) 3.5sec και (γ)6sec----	134

Σχήμα 5-33: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων της συσχέτισης του σήματος του συστήματος φωτοδιόδων και της διαμέτρου εισόδου της οπής για χρόνο διεργασίας (α) 1sec, (β) 3.5sec και (γ) 6sec. -----	135
Σχήμα 5-34: Σχηματική απεικόνιση επίδρασης διαμέτρου εισόδου στα οπτικά σήματα που---	136
Σχήμα 5-35: Γεωμετρία της οπής-----	137
Σχήμα 5-36: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων της συσχέτισης του σήματος του συστήματος φωτοδιόδων και του βάθους διάτρησης για χρόνο διεργασίας (α) 1sec, (β) 3.5sec και (γ) 6sec -----	138
Σχήμα 5-37: Διάγραμμα ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διεργασίας διάτρησης «τυφλών οπών» μέσω ακουστικών και οπτικών εκπομπών. -----	139
Σχήμα 5-38: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών (με συντελεστή διόρθωσης $\beta=0.7$) και πειραματικών αποτελεσμάτων της συσχέτισης του πλάτους του ακουστικού σήματος και βάθους οπής για χρόνο διεργασίας (α) 1 sec (β) 3.5 sec και (γ) 6 sec. -----	141
Σχήμα 5-39: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών (υπολογιζόμενα με βάση το θεωρητικό βάθος οπής με συντελεστή διόρθωσης $\beta=0.7$) και πειραματικών αποτελεσμάτων της συσχέτισης του σήματος του συστήματος φωτοδιόδων και της διαμέτρου εισόδου της οπής για χρόνο διεργασίας (α) 1sec, (β) 3.5sec και (γ) 6sec. -----	142
Σχήμα 5-40: (α) Σήματα συστήματος φωτοδιόδων και (β) μέση τιμή σημάτων φωτοδιόδων για διάτρηση χάλυβα St37 με ισχύ 1200 Watt και το επίπεδο εστίασης 2mm κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου και χρόνο διεργασίας 1sec. -----	144
Σχήμα 5-41: Μεγέθυνση σήματος (α) των τεσσάρων φωτοδιόδων και (β) της μέσης τιμής των σημάτων των φωτοδιόδων για διάτρηση χάλυβα St37 με ισχύ 1200 Watt και το επίπεδο εστίασης 2mm κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου και χρόνο διεργασίας 1sec.-----	145
Σχήμα 5-42: Επεξεργασμένο σήμα φωτοδιόδων (STMV για χρονικά διαστήματα των 10msec) για διάτρηση χάλυβα St37 με ισχύ 1200 Watt, το επίπεδο εστίασης 2mm κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου και χρόνο διεργασίας 1sec. -----	145
Σχήμα 5-43: Σήματα φωτοδιόδων για οπή με εναπόθεση τήγματος στο κάτω μέρος της και χωρίς εναπόθεση τήγματος.-----	146
Σχήμα 5-44: Συσχέτιση σήματος συστήματος φωτοδιόδων και διαμέτρου εισόδου της οπής με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα για χρόνο διεργασίας (α) 1sec, (β) 2sec, (γ) 6sec και (δ) 4sec. -----	148

Σχήμα 5-45: Σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων της συσχέτισης του σήματος του συστήματος φωτοδιόδων και της διαμέτρου εισόδου της οπής για χρόνος διεργασίας (α) 1sec, (β) 2sec και (γ) 3sec και (δ) 4sec. -----	150
Σχήμα 6-1: Γενική ιδέα για έλεγχο κλειστού κυκλώματος της διεργασίας (closed-loop control) ([26]).-----	155
Σχήμα 6-2:Δομές συστημάτων παρακολούθησης ανάλογα με τον σκοπό ([28]). -----	157
Σχήμα 6-3: Έλεγχος κλειστού βρόγχου για την διεργασία διάτρησης με παλμούς δέσμης Laser. -----	158
Σχήμα 6-4: Δομή ψηφιακού ελέγχου διεργασίας. -----	158
Σχήμα 6-5: Βασικό διάγραμμα PID αλγόριθμου.-----	159
Σχήμα 6-6: Δομή συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου κλειστού βρόγχου της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης Laser. -----	161

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά μηχανής κατεργασίας με δέσμη Laser TRUMPF TRUMATIC TLF 2530. -----	50
Πίνακας 3-2: Ιδιότητες χάλυβα τύπου St37 ([3],[5],[6]). -----	52
Πίνακας 3-3: Παράμετροι κατά την πειραματική διερεύνηση στην περίπτωση "τυφλών" οπών . -----	53
Πίνακας 3-4: Παράμετροι κατά την πειραματική διερεύνηση στην περίπτωση διαμπερών οπών -----	61
Πίνακας 4-1: Ανάλυση της διακύμανσης για το βάθος διάτρησης. -----	74
Πίνακας 4-2: Συντελεστές εμπειρικού προτύπου για το βάθος διάτρησης και συντελεστής προσδιορισμού.-----	75
Πίνακας 4-3: Ανάλυση της διακύμανσης για την διάμετρο εισόδου.-----	78
Πίνακας 4-4: Συντελεστές εμπειρικού προτύπου για την διάμετρο εισόδου και συντελεστής προσδιορισμού -----	79
Πίνακας 4-5: Αποτελέσματα ανάλυσης διακύμανσης για την διάμετρο εισόδου στην περίπτωση διαμπερών οπών. -----	82
Πίνακας 4-6: Συντελεστές εμπειρικού προτύπου για την διάμετρο εισόδου και ο συντελεστής προσδιορισμού.-----	83
Πίνακας 4-7: Αποτελέσματα ανάλυσης της διακύμανσης για την διάμετρο εξόδου στην περίπτωση διαμπερών οπών. -----	85
Πίνακας 4-8: Συντελεστές εμπειρικού προτύπου για την διάμετρο εξόδου και ο συντελεστής προσδιορισμού.-----	86
Πίνακας 4-9: Αποτελέσματα ανάλυσης διακύμανσης για τον λόγο των διαμέτρων εισόδου και εξόδου στην περίπτωση διαμπερών οπών. -----	88
Πίνακας 4-10: Συντελεστές εμπειρικού προτύπου για τον λόγο των διαμέτρων και ο συντελεστής προσδιορισμού.-----	89
Πίνακας 5-1: Φωτοδίοδοι που χρησιμοποιήθηκαν. -----	104
Πίνακας 6-1: Τεχνικές προδιαγραφές για την δημιουργία συστοιχίας «τυφλών» οπών. -----	163

Πίνακας 6-2: Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων διεργασίας. -----163

Πίνακας 6-3: Αποτελέσματα εμπειρικών προτύπων, μοντέλων αισθητήρων και πειράματος για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά «τυφλής» οπής. -----164

Πίνακας 6-4: Τεχνικές προδιαγραφές για την δημιουργία συστοιχίας διαμπερών οπών -----164

Πίνακας 6-5: Προτεινόμενες τιμές παραμέτρων διεργασίας. -----165

Πίνακας 6-6: Αποτελέσματα εμπειρικών προτύπων, μοντέλων αισθητήρων και πειράματος για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά διαμπερούς οπής. -----166

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΒΑΣΕΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στους ακόλουθους πίνακες παρατίθενται οι βάσεις δεδομένων για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οπών που αναπτύχθηκαν με βάση τα εμπειρικά πρότυπα συσχέτισης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών με τις παραμέτρους της διεργασίας, που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.

Δ1: «ΤΥΦΛΕΣ» ΟΠΕΣ – ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

		PF															
		10KHz					5KHz					1KHz					
LP/FPP	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	IT	
500	1.87	2.13	2.08	1.72	1.04	2.01	2.05	1.90	1.58	1.07	1.79	2.29	2.48	2.35	1.89	1	
550	1.93	2.20	2.15	1.80	1.13	2.09	2.14	2.01	1.70	1.21	1.99	2.49	2.67	2.53	2.07	1	
600	2.00	2.27	2.23	1.88	1.22	2.17	2.24	2.12	1.82	1.35	2.19	2.68	2.85	2.70	2.23	1	
650	2.07	2.34	2.31	1.97	1.32	2.25	2.33	2.23	1.94	1.48	2.38	2.86	3.02	2.87	2.39	1	
700	2.13	2.42	2.40	2.06	1.41	2.33	2.42	2.33	2.07	1.62	2.56	3.03	3.19	3.02	2.53	1	
750	2.21	2.50	2.48	2.15	1.51	2.41	2.51	2.44	2.19	1.75	2.73	3.19	3.34	3.16	2.67	1	
800	2.28	2.58	2.56	2.24	1.61	2.48	2.60	2.55	2.31	1.89	2.89	3.34	3.48	3.30	2.79	1	
850	2.35	2.66	2.65	2.33	1.71	2.56	2.70	2.65	2.42	2.02	3.04	3.48	3.61	3.42	2.91	1	
900	2.43	2.74	2.74	2.43	1.81	2.64	2.79	2.76	2.54	2.15	3.17	3.62	3.74	3.54	3.02	1	
950	2.51	2.83	2.83	2.53	1.91	2.71	2.88	2.86	2.66	2.28	3.30	3.74	3.85	3.64	3.11	1	
1000	2.59	2.91	2.92	2.62	2.01	2.79	2.97	2.96	2.78	2.42	3.42	3.85	3.95	3.74	3.20	1	
1050	2.67	3.00	3.02	2.73	2.12	2.87	3.06	3.07	2.90	2.55	3.53	3.95	4.04	3.82	3.28	1	
1100	2.75	3.09	3.11	2.83	2.23	2.94	3.15	3.17	3.02	2.68	3.63	4.04	4.13	3.89	3.34	1	
1150	2.84	3.18	3.21	2.93	2.34	3.02	3.24	3.27	3.13	2.81	3.72	4.12	4.20	3.96	3.40	1	
1200	2.93	3.27	3.31	3.04	2.45	3.09	3.32	3.38	3.25	2.94	3.80	4.19	4.26	4.02	3.45	1	
1250	3.02	3.37	3.41	3.14	2.56	3.16	3.41	3.48	3.37	3.07	3.87	4.26	4.32	4.06	3.48	1	
1300	3.11	3.47	3.51	3.25	2.68	3.24	3.50	3.58	3.48	3.20	3.93	4.31	4.36	4.10	3.51	1	
1350	3.20	3.56	3.62	3.36	2.80	3.31	3.59	3.68	3.60	3.33	3.98	4.35	4.40	4.12	3.53	1	
1400	3.29	3.66	3.72	3.47	2.91	3.38	3.67	3.78	3.71	3.46	4.02	4.38	4.42	4.14	3.54	1	
1450	3.39	3.76	3.83	3.59	3.03	3.46	3.76	3.88	3.83	3.59	4.05	4.40	4.43	4.14	3.53	1	
1500	3.48	3.87	3.94	3.70	3.16	3.53	3.85	3.99	3.94	3.72	4.08	4.42	4.44	4.14	3.52	1	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

(Συνέχεια πίνακα)

PF																											
10KHz																	5KHz					1KHz					
	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	IT											
LP/FPP																											
500	2.01	2.27	2.22	1.86	1.19	2.26	2.30	2.15	1.83	1.32	1.66	2.16	2.35	2.22	1.76	2											
550	2.07	2.34	2.30	1.94	1.28	2.34	2.39	2.26	1.95	1.46	1.86	2.36	2.54	2.40	1.94	2											
600	2.14	2.41	2.38	2.03	1.37	2.42	2.48	2.37	2.07	1.60	2.06	2.55	2.72	2.57	2.10	2											
650	2.21	2.49	2.46	2.11	1.46	2.50	2.58	2.48	2.19	1.73	2.25	2.73	2.89	2.74	2.26	2											
700	2.28	2.56	2.54	2.20	1.56	2.58	2.67	2.58	2.31	1.87	2.43	2.90	3.06	2.89	2.40	2											
750	2.35	2.64	2.62	2.29	1.65	2.65	2.76	2.69	2.43	2.00	2.60	3.06	3.21	3.03	2.54	2											
800	2.42	2.72	2.71	2.38	1.75	2.73	2.85	2.79	2.55	2.13	2.76	3.21	3.35	3.17	2.66	2											
850	2.50	2.80	2.80	2.48	1.85	2.81	2.94	2.90	2.67	2.27	2.90	3.35	3.48	3.29	2.78	2											
900	2.58	2.89	2.88	2.57	1.95	2.89	3.04	3.00	2.79	2.40	3.04	3.48	3.60	3.40	2.89	2											
950	2.65	2.97	2.98	2.67	2.05	2.96	3.13	3.11	2.91	2.53	3.17	3.60	3.72	3.51	2.98	2											
1000	2.73	3.06	3.07	2.77	2.16	3.04	3.22	3.21	3.03	2.67	3.29	3.72	3.82	3.60	3.07	2											
1050	2.82	3.14	3.16	2.87	2.27	3.11	3.31	3.32	3.15	2.80	3.40	3.82	3.91	3.69	3.14	2											
1100	2.90	3.23	3.26	2.97	2.37	3.19	3.40	3.42	3.27	2.93	3.50	3.91	4.00	3.76	3.21	2											
1150	2.98	3.33	3.36	3.07	2.48	3.26	3.48	3.52	3.38	3.06	3.59	3.99	4.07	3.83	3.27	2											
1200	3.07	3.42	3.45	3.18	2.59	3.34	3.57	3.63	3.50	3.19	3.67	4.06	4.13	3.88	3.31	2											
1250	3.16	3.51	3.56	3.29	2.71	3.41	3.66	3.73	3.62	3.32	3.74	4.12	4.19	3.93	3.35	2											
1300	3.25	3.61	3.66	3.40	2.82	3.49	3.75	3.83	3.73	3.45	3.80	4.18	4.23	3.96	3.38	2											
1350	3.34	3.71	3.76	3.51	2.94	3.56	3.84	3.93	3.85	3.58	3.85	4.22	4.26	3.99	3.40	2											
1400	3.44	3.81	3.87	3.62	3.06	3.63	3.92	4.03	3.96	3.71	3.89	4.25	4.29	4.01	3.40	2											
1450	3.53	3.91	3.98	3.73	3.18	3.70	4.01	4.13	4.08	3.84	3.92	4.27	4.30	4.01	3.40	2											
1500	3.63	4.01	4.09	3.85	3.30	3.78	4.10	4.23	4.19	3.97	3.94	4.29	4.31	4.01	3.39	2											

(Συνέχεια πίνακα)

PF																											
10KHz																	5KHz					1KHz					
LP/FPP	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	IT						
500	2.15	2.41	2.36	2.00	1.33	2.45	2.49	2.34	2.02	1.52	1.65	2.16	2.34	2.21	1.76	3											
550	2.21	2.48	2.44	2.08	1.42	2.53	2.58	2.45	2.14	1.65	1.86	2.36	2.54	2.39	1.93	3											
600	2.28	2.55	2.51	2.17	1.51	2.61	2.68	2.56	2.26	1.79	2.06	2.55	2.72	2.57	2.10	3											
650	2.35	2.63	2.59	2.25	1.60	2.69	2.77	2.67	2.38	1.92	2.24	2.73	2.89	2.73	2.25	3											
700	2.42	2.70	2.68	2.34	1.69	2.77	2.86	2.77	2.51	2.06	2.42	2.90	3.05	2.88	2.40	3											
750	2.49	2.78	2.76	2.43	1.79	2.85	2.95	2.88	2.63	2.19	2.59	3.06	3.20	3.03	2.53	3											
800	2.56	2.86	2.85	2.52	1.89	2.92	3.05	2.99	2.75	2.33	2.75	3.21	3.34	3.16	2.66	3											
850	2.64	2.94	2.93	2.62	1.99	3.00	3.14	3.09	2.87	2.46	2.90	3.35	3.48	3.29	2.77	3											
900	2.71	3.02	3.02	2.71	2.09	3.08	3.23	3.20	2.98	2.59	3.04	3.48	3.60	3.40	2.88	3											
950	2.79	3.11	3.11	2.81	2.19	3.15	3.32	3.30	3.10	2.73	3.17	3.60	3.71	3.50	2.98	3											
1000	2.87	3.19	3.21	2.91	2.30	3.23	3.41	3.41	3.22	2.86	3.29	3.71	3.81	3.60	3.06	3											
1050	2.95	3.28	3.30	3.01	2.40	3.31	3.50	3.51	3.34	2.99	3.40	3.81	3.91	3.68	3.14	3											
1100	3.04	3.37	3.40	3.11	2.51	3.38	3.59	3.61	3.46	3.12	3.50	3.90	3.99	3.76	3.21	3											
1150	3.12	3.46	3.49	3.21	2.62	3.46	3.68	3.72	3.57	3.25	3.59	3.98	4.06	3.82	3.26	3											
1200	3.21	3.56	3.59	3.32	2.73	3.53	3.76	3.82	3.69	3.38	3.67	4.06	4.13	3.88	3.31	3											
1250	3.30	3.65	3.69	3.43	2.85	3.60	3.85	3.92	3.81	3.51	3.74	4.12	4.18	3.92	3.35	3											
1300	3.39	3.75	3.80	3.53	2.96	3.68	3.94	4.02	3.92	3.64	3.80	4.17	4.23	3.96	3.37	3											
1350	3.48	3.85	3.90	3.64	3.08	3.75	4.03	4.12	4.04	3.77	3.85	4.21	4.26	3.99	3.39	3											
1400	3.57	3.95	4.01	3.76	3.20	3.82	4.11	4.22	4.15	3.90	3.89	4.25	4.28	4.00	3.40	3											
1450	3.67	4.05	4.11	3.87	3.32	3.90	4.20	4.33	4.27	4.03	3.92	4.27	4.30	4.01	3.40	3											
1500	3.77	4.15	4.22	3.99	3.44	3.97	4.29	4.43	4.38	4.16	3.94	4.28	4.30	4.00	3.38	3											

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

(Συνέχεια πίνακα)

		PF																		
		10KHz						5KHz						1KHz						
		-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	
LP/FPP	2.28	2.54	2.49	2.13	1.46	2.59	2.62	2.48	2.15	1.65	1.77	2.28	2.46	2.33	1.88	4				
500	2.34	2.61	2.57	2.21	1.55	2.67	2.72	2.59	2.28	1.79	1.98	2.48	2.66	2.51	2.05	4				
550	2.41	2.68	2.65	2.30	1.64	2.75	2.81	2.69	2.40	1.92	2.18	2.67	2.84	2.69	2.22	4				
600	2.48	2.76	2.73	2.38	1.73	2.82	2.90	2.80	2.52	2.06	2.36	2.85	3.01	2.85	2.37	4				
650	2.55	2.83	2.81	2.47	1.83	2.90	3.00	2.91	2.64	2.19	2.54	3.02	3.17	3.00	2.52	4				
700	2.62	2.91	2.89	2.56	1.92	2.98	3.09	3.01	2.76	2.33	2.71	3.18	3.32	3.15	2.65	4				
750	2.69	2.99	2.98	2.65	2.02	3.06	3.18	3.12	2.88	2.46	2.87	3.33	3.46	3.28	2.78	4				
800	2.77	3.07	3.07	2.75	2.12	3.14	3.27	3.23	3.00	2.59	3.02	3.47	3.60	3.41	2.89	4				
850	2.85	3.16	3.15	2.84	2.22	3.21	3.36	3.33	3.12	2.73	3.16	3.60	3.72	3.52	3.00	4				
900	2.92	3.24	3.25	2.94	2.32	3.29	3.45	3.44	3.24	2.86	3.29	3.72	3.83	3.62	3.10	4				
950	3.00	3.33	3.34	3.04	2.43	3.36	3.54	3.54	3.36	2.99	3.41	3.83	3.94	3.72	3.18	4				
1000	3.09	3.41	3.43	3.14	2.54	3.44	3.63	3.64	3.47	3.12	3.52	3.93	4.03	3.80	3.26	4				
1050	3.17	3.50	3.53	3.24	2.64	3.52	3.72	3.75	3.59	3.26	3.62	4.02	4.11	3.88	3.33	4				
1100	3.25	3.59	3.63	3.34	2.75	3.59	3.81	3.85	3.71	3.39	3.71	4.11	4.18	3.94	3.38	4				
1150	3.34	3.69	3.72	3.45	2.86	3.66	3.90	3.95	3.83	3.52	3.79	4.18	4.25	4.00	3.43	4				
1200	3.43	3.78	3.83	3.56	2.98	3.74	3.99	4.05	3.94	3.65	3.86	4.24	4.30	4.04	3.47	4				
1250	3.52	3.88	3.93	3.67	3.09	3.81	4.07	4.16	4.06	3.78	3.92	4.29	4.35	4.08	3.49	4				
1300	3.61	3.98	4.03	3.78	3.21	3.89	4.16	4.26	4.17	3.91	3.97	4.33	4.38	4.11	3.51	4				
1350	3.71	4.08	4.14	3.89	3.33	3.96	4.25	4.36	4.29	4.04	4.01	4.37	4.40	4.12	3.52	4				
1400	3.80	4.18	4.25	4.00	3.45	4.03	4.34	4.46	4.40	4.17	4.04	4.39	4.42	4.13	3.52	4				
1450	3.90	4.28	4.36	4.12	3.57	4.10	4.42	4.56	4.52	4.30	4.06	4.40	4.42	4.12	3.51	4				

(Συνέχεια πίνακα)

		PF															
		10KHz					5KHz					1KHz					
LP/FPP	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	IT	
500	2.41	2.67	2.62	2.26	1.58	2.66	2.70	2.56	2.23	1.73	2.02	2.52	2.71	2.58	2.12	5	
550	2.47	2.74	2.69	2.34	1.67	2.74	2.79	2.66	2.35	1.86	2.23	2.72	2.90	2.76	2.30	5	
600	2.54	2.81	2.77	2.42	1.76	2.82	2.89	2.77	2.47	2.00	2.42	2.91	3.08	2.93	2.46	5	
650	2.60	2.88	2.85	2.51	1.86	2.90	2.98	2.88	2.60	2.13	2.61	3.09	3.25	3.10	2.62	5	
700	2.67	2.96	2.93	2.60	1.95	2.98	3.07	2.98	2.72	2.27	2.79	3.26	3.42	3.25	2.76	5	
750	2.75	3.04	3.02	2.69	2.05	3.06	3.16	3.09	2.84	2.40	2.96	3.42	3.57	3.39	2.90	5	
800	2.82	3.12	3.10	2.78	2.15	3.14	3.26	3.20	2.96	2.54	3.12	3.57	3.71	3.53	3.02	5	
850	2.89	3.20	3.19	2.87	2.25	3.21	3.35	3.30	3.08	2.67	3.27	3.71	3.84	3.65	3.14	5	
900	2.97	3.28	3.28	2.97	2.35	3.29	3.44	3.41	3.20	2.80	3.40	3.85	3.97	3.77	3.25	5	
950	3.05	3.37	3.37	3.07	2.45	3.37	3.53	3.51	3.31	2.94	3.53	3.97	4.08	3.87	3.34	5	
1000	3.13	3.45	3.46	3.16	2.55	3.44	3.62	3.62	3.43	3.07	3.65	4.08	4.18	3.97	3.43	5	
1050	3.21	3.54	3.56	3.26	2.66	3.52	3.71	3.72	3.55	3.20	3.76	4.18	4.27	4.05	3.51	5	
1100	3.29	3.63	3.65	3.37	2.77	3.59	3.80	3.82	3.67	3.33	3.86	4.27	4.36	4.13	3.57	5	
1150	3.38	3.72	3.75	3.47	2.88	3.67	3.89	3.93	3.79	3.46	3.95	4.35	4.43	4.19	3.63	5	
1200	3.47	3.81	3.85	3.58	2.99	3.74	3.98	4.03	3.90	3.60	4.03	4.42	4.49	4.25	3.68	5	
1250	3.56	3.91	3.95	3.68	3.10	3.82	4.06	4.13	4.02	3.73	4.10	4.49	4.55	4.29	3.71	5	
1300	3.65	4.01	4.05	3.79	3.22	3.89	4.15	4.23	4.13	3.86	4.16	4.54	4.59	4.33	3.74	5	
1350	3.74	4.10	4.16	3.90	3.34	3.96	4.24	4.34	4.25	3.99	4.21	4.58	4.63	4.35	3.76	5	
1400	3.83	4.20	4.26	4.01	3.45	4.04	4.33	4.44	4.37	4.11	4.25	4.61	4.65	4.37	3.77	5	
1450	3.93	4.30	4.37	4.13	3.57	4.11	4.41	4.54	4.48	4.24	4.29	4.63	4.66	4.37	3.76	5	
1500	4.02	4.41	4.48	4.24	3.70	4.18	4.50	4.64	4.59	4.37	4.31	4.65	4.67	4.37	3.75	5	

(Συνέχεια πίνακα)

PF																	
10KHz					5KHz					1KHz							
LP/FPP	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	IT	
500	2.53	2.79	2.74	2.38	1.70	2.68	2.72	2.58	2.25	1.75	2.39	2.90	3.08	2.95	2.50	6	
550	2.59	2.86	2.81	2.46	1.79	2.76	2.81	2.68	2.37	1.88	2.60	3.10	3.27	3.13	2.67	6	
600	2.66	2.93	2.89	2.54	1.88	2.84	2.91	2.79	2.49	2.02	2.80	3.29	3.46	3.31	2.84	6	
650	2.72	3.00	2.97	2.63	1.98	2.92	3.00	2.90	2.62	2.15	2.98	3.47	3.63	3.47	2.99	6	
700	2.79	3.08	3.05	2.72	2.07	3.00	3.09	3.00	2.74	2.29	3.16	3.64	3.79	3.62	3.14	6	
750	2.87	3.16	3.14	2.81	2.17	3.08	3.18	3.11	2.86	2.42	3.33	3.80	3.94	3.77	3.27	6	
800	2.94	3.24	3.22	2.90	2.27	3.15	3.28	3.22	2.98	2.56	3.49	3.95	4.08	3.90	3.40	6	
850	3.01	3.32	3.31	2.99	2.37	3.23	3.37	3.32	3.10	2.69	3.64	4.09	4.22	4.02	3.51	6	
900	3.09	3.40	3.40	3.09	2.47	3.31	3.46	3.43	3.22	2.82	3.78	4.22	4.34	4.14	3.62	6	
950	3.17	3.49	3.49	3.19	2.57	3.39	3.55	3.53	3.33	2.96	3.91	4.34	4.45	4.24	3.71	6	
1000	3.25	3.57	3.58	3.28	2.67	3.46	3.64	3.64	3.45	3.09	4.03	4.45	4.55	4.34	3.80	6	
1050	3.33	3.66	3.68	3.38	2.78	3.54	3.73	3.74	3.57	3.22	4.13	4.55	4.65	4.42	3.88	6	
1100	3.41	3.75	3.77	3.49	2.89	3.61	3.82	3.84	3.69	3.35	4.23	4.64	4.73	4.50	3.94	6	
1150	3.50	3.84	3.87	3.59	3.00	3.69	3.91	3.95	3.81	3.48	4.32	4.72	4.80	4.56	4.00	6	
1200	3.59	3.93	3.97	3.70	3.11	3.76	4.00	4.05	3.92	3.61	4.40	4.80	4.87	4.62	4.05	6	
1250	3.68	4.03	4.07	3.80	3.22	3.84	4.08	4.15	4.04	3.75	4.47	4.86	4.92	4.66	4.09	6	
1300	3.77	4.13	4.17	3.91	3.34	3.91	4.17	4.25	4.15	3.88	4.54	4.91	4.96	4.70	4.11	6	
1350	3.86	4.22	4.28	4.02	3.46	3.98	4.26	4.35	4.27	4.01	4.59	4.95	5.00	4.72	4.13	6	
1400	3.95	4.32	4.38	4.13	3.57	4.05	4.35	4.46	4.39	4.13	4.63	4.98	5.02	4.74	4.14	6	
1450	4.05	4.42	4.49	4.25	3.69	4.13	4.43	4.56	4.50	4.26	4.66	5.01	5.04	4.75	4.14	6	
1500	4.14	4.53	4.60	4.36	3.82	4.20	4.52	4.66	4.61	4.39	4.68	5.02	5.04	4.74	4.12	6	

Πίνακας ΠΔ-1: Βάση δεδομένων για το βάθος διάτρησης «τυφλών» οπών (LP: Ισχύς, FPP: Θέση επιπέδου εστίασης, IT: Χρονos διεργασίας, PF: Συχνότητα παλμών).

Δ2: «ΤΥΦΛΕΣ» ΟΠΕΣ – ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ

		PF																		
		10KHz					5KHz					1KHz								
		-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2				
LP/FPP																				
500	445.91	353.26	338.33	401.10	541.60	433.79	323.84	279.91	302.00	390.10	157.28	149.37	178.83	245.70	349.90	1	1			
550	417.20	335.81	332.14	406.20	558.00	413.23	318.65	290.09	327.50	431.00	186.22	185.74	222.63	296.90	408.50	1	1			
600	392.29	322.16	329.75	415.10	578.10	394.63	315.42	302.22	355.00	473.90	214.07	221.02	265.34	347.00	466.10	1	1			
650	371.16	312.29	331.14	427.70	602.00	377.99	314.14	316.32	384.50	518.70	240.83	255.21	306.96	396.10	522.60	1	1			
700	353.82	306.21	336.33	444.20	629.70	363.31	314.83	332.37	415.90	565.50	266.51	288.32	347.50	444.10	578.00	1	1			
750	340.26	303.92	345.30	464.40	661.20	350.59	317.48	350.38	449.30	614.30	291.11	320.34	386.95	490.90	632.30	1	1			
800	330.50	305.42	358.05	488.40	696.50	339.83	322.08	370.35	484.60	665.00	314.61	351.28	425.32	536.70	685.50	1	1			
850	324.52	310.70	374.60	516.20	735.60	331.02	328.64	392.28	521.90	717.60	337.03	381.13	462.60	581.40	737.70	1	1			
900	322.33	319.77	394.93	547.80	778.40	324.18	337.16	416.17	561.20	772.20	358.37	409.89	498.79	625.10	788.70	1	1			
950	323.93	332.63	419.05	583.20	825.10	319.29	347.64	442.01	602.40	828.80	378.61	437.57	533.90	667.60	838.70	1	1			
1000	329.31	349.28	446.96	622.40	875.50	316.36	360.08	469.82	645.60	887.40	397.77	464.16	567.92	709.00	887.60	1	1			
1050	338.49	369.71	478.66	665.30	929.70	315.39	374.48	499.58	690.70	947.90	415.85	489.66	600.85	749.40	935.30	1	1			
1100	351.45	393.93	514.14	712.10	987.70	316.38	390.83	531.30	737.80	1010.30	432.84	514.08	632.70	788.70	982.10	1	1			
1150	368.20	421.95	553.41	762.60	1049.50	319.33	409.14	564.98	786.80	1074.70	448.74	537.41	663.46	826.90	1027.70	1	1			
1200	388.74	453.74	596.47	816.90	1115.10	324.23	429.42	600.62	837.90	1141.10	463.55	559.66	693.13	864.00	1072.20	1	1			
1250	413.06	489.33	643.32	875.00	1184.50	331.10	451.65	638.22	890.80	1209.40	477.28	580.82	721.72	900.00	1115.70	1	1			
1300	441.17	528.70	693.95	936.90	1257.60	339.92	475.84	677.78	945.70	1279.70	489.92	600.89	749.22	934.90	1158.00	1	1			
1350	473.07	571.86	748.38	1002.60	1334.60	350.70	501.98	719.29	1002.60	1352.00	501.48	619.87	775.64	968.80	1199.30	1	1			
1400	508.76	618.81	806.59	1072.10	1415.30	363.44	530.09	762.76	1061.50	1426.20	511.95	637.77	800.97	1001.50	1239.50	1	1			
1450	548.24	669.55	868.58	1145.30	1499.80	378.14	560.16	808.20	1122.30	1502.30	521.33	654.58	825.21	1033.20	1278.60	1	1			
1500	591.50	724.08	934.37	1222.40	1588.10	394.80	592.18	855.59	1185.00	1580.50	529.63	670.31	848.36	1063.80	1316.60	1	1			

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

(Συνέχεια πίνακα)

		PF																
		10KHz					5KHz					1KHz						
		-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2		
LP/FPP	-2	512.75	420.10	405.20	468.00	608.50	429.14	319.19	275.27	297.40	385.50	209.26	201.35	230.81	297.6	401.80	2	IT
500		512.75	420.10	405.20	468.00	608.50	429.14	319.19	275.27	297.40	385.50	209.26	201.35	230.81	297.6	401.80	2	
550		484.04	402.65	399.00	473.00	624.80	408.59	314.01	285.44	322.90	426.40	238.19	237.71	274.61	348.9	460.50	2	
600		459.13	389.00	396.60	481.90	644.90	389.99	310.78	297.58	350.40	469.30	266.05	273.00	317.32	399	518.10	2	
650		438.00	379.13	398.00	494.60	668.80	373.35	309.50	311.68	379.90	514.10	292.81	307.19	358.94	448.1	574.60	2	
700		420.66	373.05	403.20	511.00	696.60	358.67	310.19	327.73	411.30	560.90	318.49	340.30	399.48	496	630.00	2	
750		407.10	370.76	412.10	531.20	728.00	345.95	312.84	345.74	444.70	609.60	343.08	372.32	438.93	542.9	684.30	2	
800		397.34	372.26	424.90	555.20	763.30	335.19	317.44	365.71	480.00	660.30	366.59	403.26	477.30	588.7	737.50	2	
850		391.36	377.54	441.40	583.10	802.40	326.38	324.00	387.64	517.30	713.00	389.01	433.11	514.58	633.4	789.60	2	
900		389.17	386.61	461.80	614.70	845.20	319.54	332.52	411.53	556.60	767.60	410.34	461.87	550.77	677	840.70	2	
950		390.77	399.47	485.90	650.00	891.90	314.65	343.00	437.37	597.80	824.20	430.59	489.55	585.88	719.6	890.70	2	
1000		396.16	416.12	513.80	689.20	942.30	311.72	355.44	465.18	640.90	882.70	449.75	516.14	619.90	761	939.50	2	
1050		405.33	436.55	545.50	732.20	996.50	310.75	369.84	494.94	686.10	943.20	467.83	541.64	652.83	801.4	987.30	2	
1100		418.29	460.78	581.00	778.90	1054.50	311.74	386.19	526.66	733.20	1005.70	484.81	566.06	684.68	840.7	1034.00	2	
1150		435.04	488.79	620.30	829.40	1116.30	314.69	404.50	560.34	782.20	1070.10	500.72	589.39	715.44	878.9	1079.60	2	
1200		455.58	520.58	663.30	883.80	1181.90	319.59	424.78	595.98	833.20	1136.50	515.53	611.64	745.11	916	1124.20	2	
1250		479.90	556.17	710.20	941.90	1251.30	326.46	447.01	633.58	886.20	1204.80	529.26	632.79	773.70	952	1167.60	2	
1300		508.01	595.54	760.80	1003.80	1324.50	335.28	471.20	673.14	941.10	1275.10	541.90	652.87	801.20	986.9	1210.00	2	
1350		539.91	638.71	815.20	1069.40	1401.40	346.06	497.34	714.65	998.00	1347.30	553.46	671.85	827.62	1020.8	1251.30	2	
1400		575.60	685.65	873.40	1138.90	1482.10	358.80	525.45	758.12	1056.80	1421.50	563.93	689.75	852.94	1053.5	1291.50	2	
1450		615.08	736.39	935.40	1212.20	1566.60	373.50	555.52	803.55	1117.60	1497.70	573.31	706.56	877.19	1085.2	1330.60	2	
1500		658.34	790.92	1001.20	1289.20	1655.00	390.16	587.54	850.94	1180.40	1575.80	581.61	722.29	900.34	1115.8	1368.60	2	

(Συνέχεια πίνακα)

		PF																
		10KHz					5KHz					1KHz						
		-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2		
LP/FPP	553.64	460.99	446.10	508.90	649.40	457.12	347.17	303.24	325.30	413.50	254.56	246.65	276.11	342.90	447.20	IT		
500	553.64	460.99	446.10	508.90	649.40	457.12	347.17	303.24	325.30	413.50	254.56	246.65	276.11	342.90	447.20	3		
550	524.94	443.55	439.90	513.90	665.70	436.57	341.98	313.42	350.90	454.40	283.50	283.02	319.91	394.20	505.80	3		
600	500.02	429.90	437.50	522.80	685.80	417.97	338.75	325.56	378.40	497.20	311.35	318.30	362.62	444.30	563.40	3		
650	478.89	420.03	438.90	535.50	709.70	401.33	337.48	339.65	407.80	542.10	338.12	352.50	404.25	493.40	619.90	3		
700	461.55	413.95	444.10	551.90	737.50	386.65	338.17	355.71	439.30	588.80	363.80	385.61	444.79	541.30	675.30	3		
750	448.00	411.66	453.00	572.10	768.90	373.93	340.81	373.72	472.60	637.60	388.39	417.63	484.24	588.20	729.60	3		
800	438.24	413.15	465.80	596.10	804.20	363.17	345.42	393.69	508.00	688.30	411.90	448.56	522.60	634.00	782.80	3		
850	432.26	418.44	482.30	624.00	843.30	354.36	351.98	415.62	545.30	741.00	434.32	478.41	559.88	678.70	834.90	3		
900	430.07	427.51	502.70	655.50	886.10	347.52	360.50	439.50	584.50	795.60	455.65	507.18	596.08	722.30	886.00	3		
950	431.67	440.37	526.80	690.90	932.80	342.63	370.98	465.35	625.70	852.20	475.90	534.85	631.18	764.90	936.00	3		
1000	437.05	457.01	554.70	730.10	983.20	339.70	383.42	493.15	668.90	910.70	495.06	561.44	665.20	806.30	984.80	3		
1050	446.23	477.45	586.40	773.10	1037.40	338.73	397.81	522.92	714.00	971.20	513.13	586.95	698.14	846.70	1032.60	3		
1100	459.19	501.67	621.90	819.80	1095.40	339.72	414.17	554.64	761.10	1033.70	530.12	611.37	729.98	886.00	1079.30	3		
1150	475.94	529.68	661.10	870.30	1157.20	342.66	432.48	588.32	810.20	1098.10	546.02	634.70	760.74	924.20	1125.00	3		
1200	496.47	561.48	704.20	924.70	1222.80	347.57	452.75	623.96	861.20	1164.40	560.84	656.94	790.42	961.30	1169.50	3		
1250	520.80	597.07	751.10	982.80	1292.20	354.43	474.98	661.56	914.20	1232.80	574.56	678.10	819.00	997.30	1212.90	3		
1300	548.91	636.44	801.70	1044.70	1365.30	363.26	499.17	701.11	969.10	1303.10	587.21	698.17	846.51	1032.20	1255.30	3		
1350	580.81	679.60	856.10	1110.30	1442.30	374.04	525.32	742.63	1026.00	1375.30	598.76	717.16	872.92	1066.10	1296.60	3		
1400	616.50	726.55	914.30	1179.80	1523.00	386.78	553.43	786.10	1084.80	1449.50	609.23	735.05	898.25	1098.80	1336.80	3		
1450	655.97	777.29	976.30	1253.10	1607.50	401.48	583.49	831.53	1145.60	1525.70	618.61	751.87	922.49	1130.50	1375.90	3		
1500	699.24	831.81	1042.10	1330.10	1695.90	418.13	615.52	878.92	1208.30	1603.80	626.91	767.59	945.65	1161.10	1413.90	3		

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

(Συνέχεια πίνακα)

		PF															
		10KHz					5KHz					1KHz					
		-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	
LP/FPP	568.59	475.94	461.00	523.80	664.30	517.71	407.76	363.84	385.90	474.00	293.19	285.28	314.74	381.60	2	IT	
500	568.59	475.94	461.00	523.80	664.30	517.71	407.76	363.84	385.90	474.00	293.19	285.28	314.74	381.60	485.80	4	
550	539.89	458.50	454.80	528.90	680.70	497.16	402.58	374.01	411.50	515.00	322.13	321.65	358.54	432.80	544.40	4	
600	514.97	444.85	452.40	537.70	700.80	478.56	399.35	386.15	439.00	557.80	349.98	356.93	401.25	482.90	602.00	4	
650	493.85	434.98	453.80	550.40	724.70	461.92	398.07	400.25	468.40	602.70	376.75	391.13	442.88	532.00	658.50	4	
700	476.50	428.90	459.00	566.80	752.40	447.24	398.76	416.30	499.90	649.40	402.43	424.24	483.42	580.00	713.90	4	
750	462.95	426.61	468.00	587.10	783.90	434.52	401.40	434.31	533.20	698.20	427.02	456.26	522.87	626.90	768.20	4	
800	453.19	428.10	480.70	611.10	819.20	423.76	406.01	454.28	568.60	748.90	450.53	487.20	561.24	672.60	821.40	4	
850	447.21	433.39	497.30	638.90	858.20	414.95	412.57	476.21	605.90	801.60	472.95	517.04	598.51	717.40	873.60	4	
900	445.02	442.46	517.60	670.50	901.10	408.11	421.09	500.10	645.10	856.20	494.28	545.81	634.71	761.00	924.60	4	
950	446.62	455.32	541.70	705.90	947.70	403.22	431.57	525.94	686.30	912.80	514.53	573.48	669.81	803.50	974.60	4	
1000	452.00	471.97	569.60	745.00	998.20	400.29	444.01	553.75	729.50	971.30	533.69	600.07	703.83	845.00	1023.50	4	
1050	461.18	492.40	601.30	788.00	1052.40	399.32	458.41	583.51	774.60	1031.80	551.76	625.58	736.77	885.30	1071.30	4	
1100	474.14	516.62	636.80	834.80	1110.40	400.31	474.76	615.23	821.70	1094.20	568.75	650.00	768.61	924.60	1118.00	4	
1150	490.89	544.63	676.10	885.30	1172.20	403.26	493.07	648.91	870.80	1158.70	584.65	673.33	799.37	962.80	1163.60	4	
1200	511.42	576.43	719.20	939.60	1237.80	408.16	513.35	684.55	921.80	1225.00	599.47	695.57	829.05	999.90	1208.10	4	
1250	535.75	612.02	766.00	997.70	1307.10	415.03	535.58	722.15	974.70	1293.40	613.20	716.73	857.64	1035.90	1251.60	4	
1300	563.86	651.39	816.60	1059.60	1380.30	423.85	559.77	761.71	1029.70	1363.60	625.84	736.80	885.14	1070.80	1293.90	4	
1350	595.76	694.55	871.10	1125.30	1457.20	434.63	585.91	803.22	1086.50	1435.90	637.39	755.79	911.55	1104.70	1335.20	4	
1400	631.45	741.50	929.30	1194.80	1538.00	447.37	614.02	846.69	1145.40	1510.10	647.86	773.69	936.88	1137.40	1375.40	4	
1450	670.93	792.24	991.30	1268.00	1622.50	462.07	644.09	892.12	1206.20	1586.30	657.25	790.50	961.12	1169.10	1414.50	4	
1500	714.19	846.76	1057.10	1345.10	1710.80	478.73	676.11	939.51	1268.90	1664.40	665.54	806.22	984.28	1199.70	1452.50	4	

(Συνέχεια πίνακα)

		PF																			
		10KHz						5KHz						1KHz							
LP/FPP	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	IT
500	557.60	464.95	450.00	512.80	653.30	610.92	500.97	457.00	479.10	567.30	325.15	317.24	346.70	413.50	517.70	5					5
550	528.90	447.51	443.80	517.90	669.70	590.37	495.79	467.20	504.70	608.20	354.09	353.61	390.50	464.80	576.40	5					5
600	503.98	433.85	441.40	526.80	689.80	571.77	492.56	479.40	532.20	651.00	381.94	388.89	433.20	514.90	634.00	5					5
650	482.85	423.99	442.80	539.40	713.70	555.13	491.28	493.50	561.60	695.90	408.71	423.08	474.80	564.00	690.50	5					5
700	465.51	417.91	448.00	555.90	741.40	540.45	491.97	509.50	593.10	742.70	434.39	456.19	515.40	611.90	745.90	5					5
750	451.96	415.61	457.00	576.10	772.90	527.73	494.62	527.50	626.40	791.40	458.98	488.22	554.80	658.80	800.20	5					5
800	442.19	417.11	469.70	600.10	808.20	516.97	499.22	547.50	661.80	842.10	482.48	519.15	593.20	704.60	853.40	5					5
850	436.21	422.39	486.30	627.90	847.20	508.16	505.78	569.40	699.10	894.80	504.90	549.00	630.50	749.30	905.50	5					5
900	434.03	431.47	506.60	659.50	890.10	501.32	514.30	593.30	738.30	949.40	526.24	577.77	666.70	792.90	956.60	5					5
950	435.62	444.32	530.70	694.90	936.70	496.43	524.78	619.20	779.50	1006.00	546.49	605.44	701.80	835.50	1006.50	5					5
1000	441.01	460.97	558.70	734.10	987.20	493.50	537.22	647.00	822.70	1064.50	565.65	632.03	735.80	876.90	1055.40	5					5
1050	450.18	481.41	590.30	777.00	1041.40	492.53	551.62	676.70	867.80	1125.00	583.72	657.54	768.70	917.30	1103.20	5					5
1100	463.14	505.63	625.80	823.80	1099.40	493.52	567.97	708.40	914.90	1187.50	600.71	681.95	800.60	956.60	1149.90	5					5
1150	479.89	533.64	665.10	874.30	1161.20	496.47	586.28	742.10	964.00	1251.90	616.61	705.28	831.30	994.80	1195.50	5					5
1200	500.43	565.44	708.20	928.60	1226.80	501.37	606.56	777.80	1015.00	1318.20	631.42	727.53	861.00	1031.90	1240.10	5					5
1250	524.75	601.02	755.00	986.70	1296.10	508.24	628.79	815.40	1068.00	1386.60	645.15	748.69	889.60	1067.90	1283.50	5					5
1300	552.87	640.40	805.60	1048.60	1369.30	517.06	652.98	854.90	1122.90	1456.90	657.80	768.76	917.10	1102.80	1325.90	5					5
1350	584.77	683.56	860.10	1114.30	1446.20	527.84	679.12	896.40	1179.80	1529.10	669.35	787.74	943.50	1136.60	1367.20	5					5
1400	620.46	730.51	918.30	1183.80	1527.00	540.58	707.23	939.90	1238.60	1603.30	679.82	805.64	968.80	1169.40	1407.30	5					5
1450	659.93	781.25	980.30	1257.00	1611.50	555.28	737.30	985.30	1299.40	1679.50	689.20	822.45	993.10	1201.10	1446.40	5					5
1500	703.20	835.77	1046.10	1334.10	1699.80	571.94	769.32	1032.70	1362.20	1757.60	697.50	838.18	1016.20	1231.70	1484.50	5					5

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

(Συνέχεια πίνακα)

		PF																	
		10KHz						5KHz						1KHz					
		-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2			
LP/FPP	-2	428.01	413.10	475.90	616.40	736.75	626.80	582.90	605.00	693.10	350.43	342.52	372.00	438.80	543.00	IT			
500	520.66	428.01	413.10	475.90	616.40	736.75	626.80	582.90	605.00	693.10	350.43	342.52	372.00	438.80	543.00	6			
550	491.96	410.57	406.90	480.90	632.70	716.20	621.61	593.10	630.50	734.00	379.37	378.89	415.80	490.00	601.70	6			
600	467.04	396.91	404.50	489.80	652.80	697.60	618.38	605.20	658.00	776.90	407.22	414.17	458.50	540.20	659.30	6			
650	445.91	387.05	405.90	502.50	676.80	680.96	617.11	619.30	687.50	821.70	433.99	448.37	500.10	589.20	715.70	6			
700	428.57	380.97	411.10	518.90	704.50	666.28	617.80	635.30	718.90	868.50	459.67	481.48	540.70	637.20	771.10	6			
750	415.02	378.68	420.10	539.10	736.00	653.56	620.44	653.30	752.30	917.20	484.26	513.50	580.10	684.10	825.40	6			
800	405.25	380.17	432.80	563.20	771.20	642.80	625.05	673.30	787.60	967.90	507.77	544.44	618.50	729.90	878.70	6			
850	399.28	385.46	449.40	591.00	810.30	633.99	631.61	695.20	824.90	1020.60	530.19	574.29	655.80	774.60	930.80	6			
900	397.09	394.53	469.70	622.60	853.20	627.15	640.13	719.10	864.20	1075.20	551.52	603.05	691.90	818.20	981.90	6			
950	398.68	407.39	493.80	657.90	899.80	622.26	650.61	745.00	905.40	1131.80	571.77	630.73	727.10	860.80	1031.80	6			
1000	404.07	424.03	521.70	697.10	950.20	619.33	663.05	772.80	948.50	1190.30	590.93	657.32	761.10	902.20	1080.70	6			
1050	413.24	444.47	553.40	740.10	1004.50	618.36	677.44	802.50	993.70	1250.80	609.00	682.82	794.00	942.60	1128.50	6			
1100	426.21	468.69	588.90	786.80	1062.50	619.35	693.80	834.30	1040.80	1313.30	625.99	707.24	825.90	981.80	1175.20	6			
1150	442.95	496.70	628.20	837.40	1124.30	622.29	712.11	868.00	1089.80	1377.70	641.89	730.57	856.60	1020.00	1220.80	6			
1200	463.49	528.50	671.20	891.70	1189.80	627.20	732.38	903.60	1140.80	1444.10	656.71	752.81	886.30	1057.10	1265.40	6			
1250	487.82	564.09	718.10	949.80	1259.20	634.06	754.61	941.20	1193.80	1512.40	670.44	773.97	914.90	1093.20	1308.80	6			
1300	515.93	603.46	768.70	1011.70	1332.40	642.89	778.80	980.70	1248.70	1582.70	683.08	794.04	942.40	1128.10	1351.20	6			
1350	547.83	646.62	823.10	1077.40	1409.30	653.67	804.95	1022.30	1305.60	1654.90	694.63	813.03	968.80	1161.90	1392.40	6			
1400	583.52	693.57	881.30	1146.80	1490.00	666.41	833.06	1065.70	1364.40	1729.10	705.10	830.93	994.10	1194.70	1432.60	6			
1450	622.99	744.31	943.30	1220.10	1574.60	681.11	863.12	1111.20	1425.20	1805.30	714.49	847.74	1018.40	1226.40	1471.70	6			
1500	666.26	798.83	1009.10	1297.10	1662.90	697.76	895.15	1158.60	1488.00	1883.40	722.78	863.46	1041.50	1256.90	1509.70	6			

Πίνακας ΠΔ-2: Βάση δεδομένων για την διάμετρο εισόδου των «τρυφλών» οπών (LP: Ισχύς, FPP: Θέση επιπέδου εστίασης, IT: Χρόνος διεργασίας, PF: Συχνότητα παλμών).

Δ3: ΔΙΑΜΠΕΡΕΙΣ ΟΠΕΣ – ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ

LP	FPP					IT
	-2	-1	0	1	2	
600	937.8	861.2	846.2	892.7	1000.8	1
650	972.2	895.6	880.5	927.1	1035.2	1
700	1004.9	928.3	913.2	959.8	1067.9	1
750	1035.9	959.3	944.3	990.8	1098.9	1
800	1065.3	988.7	973.7	1020.2	1128.3	1
850	1093	1016.4	1001.4	1047.9	1156	1
900	1119	1042.4	1027.4	1073.9	1182	1
950	1143.4	1066.8	1051.8	1098.3	1206.4	1
1000	1166.1	1089.5	1074.5	1121	1229.1	1
1050	1187.2	1110.6	1095.5	1142.1	1250.2	1
1100	1206.5	1129.9	1114.9	1161.4	1269.5	1
1150	1224.3	1147.7	1132.6	1179.2	1287.3	1
1200	1240.3	1163.7	1148.7	1195.2	1303.3	1

(Συνέχεια πίνακα)

LP	FPP					IT
	-2	-1	0	1	2	
600	850	789.1	789.8	852.1	976	2
650	884.3	823.5	824.2	886.5	1010.3	2
700	917	856.2	856.9	919.2	1043	2
750	948.1	887.2	888	950.2	1074.1	2
800	977.5	916.6	917.3	979.6	1103.5	2
850	1005.2	944.3	945	1007.3	1131.2	2
900	1031.2	970.4	971.1	1033.4	1157.2	2
950	1055.6	994.7	995.5	1057.7	1181.6	2
1000	1078.3	1017.4	1018.2	1080.4	1204.3	2
1050	1099.3	1038.5	1039.2	1101.5	1225.3	2
1100	1118.7	1057.9	1058.6	1120.9	1244.7	2
1150	1136.4	1075.6	1076.3	1138.6	1262.4	2
1200	1152.5	1091.6	1092.3	1154.6	1278.5	2

(Συνέχεια πίνακα)

LP	FPP					IT
	-2	-1	0	1	2	
600	772.1	727	743.5	821.5	961.1	3
650	806.5	761.4	777.9	855.9	995.5	3
700	839.2	794.1	810.6	888.6	1028.2	3
750	870.2	825.2	841.6	919.7	1059.2	3
800	899.6	854.5	871	949	1088.6	3
850	927.3	882.2	898.7	976.7	1116.3	3
900	953.4	908.3	924.7	1002.8	1142.4	3
950	977.7	932.7	949.1	1027.2	1166.7	3
1000	1000.5	955.4	971.8	1049.9	1189.5	3
1050	1021.5	976.4	992.9	1070.9	1210.5	3
1100	1040.9	995.8	1012.2	1090.3	1229.9	3
1150	1058.6	1013.5	1030	1108	1247.6	3
1200	1074.6	1029.5	1046	1124	1263.6	3

(Συνέχεια πίνακα)

LP	FPP					IT
	-2	-1	0	1	2	
600	704.3	674.9	707.2	800.9	956.3	4
650	738.7	709.3	741.5	835.3	990.7	4
700	771.4	742	774.2	868	1023.4	4
750	802.4	773.1	805.3	899.1	1054.4	4
800	831.8	802.4	834.7	928.4	1083.8	4
850	859.5	830.2	862.4	956.2	1111.5	4
900	885.5	856.2	888.4	982.2	1137.5	4
950	909.9	880.6	912.8	1006.6	1161.9	4
1000	932.6	903.3	935.5	1029.3	1184.6	4
1050	953.7	924.3	956.5	1050.3	1205.7	4
1100	973	943.7	975.9	1069.7	1225	4
1150	990.8	961.4	993.6	1087.4	1242.8	4
1200	1006.8	977.4	1009.7	1103.4	1258.8	4

Πίνακας ΠΔ-3: Βάση δεδομένων για την διάμετρο εισόδου διαμετρών οπών (LP: Ισχύς, FPP: Θέση επιπέδου εστίασης, IT: Χρονος διεργασίας).

Δ4: ΔΙΑΜΠΕΡΕΙΣ ΟΠΕΣ – ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ

LP	FPP					IT
	-2	-1	0	1	2	
600	180.75	174.88	230.88	348.75	528.50	1
650	183.30	177.42	233.42	351.30	531.05	1
700	187.18	181.30	237.30	355.18	534.93	1
750	192.38	186.51	242.51	360.38	540.13	1
800	198.92	193.04	249.04	366.92	546.67	1
850	206.78	200.90	256.90	374.78	554.53	1
900	215.97	210.09	266.09	383.97	563.72	1
950	226.49	220.61	276.61	394.49	574.24	1
1000	238.33	232.46	288.46	406.33	586.08	1
1050	251.51	245.63	301.63	419.51	599.26	1
1100	266.01	260.14	316.14	434.01	613.76	1
1150	281.84	275.97	331.97	449.84	629.59	1
1200	299.00	293.13	349.13	467.00	646.75	1

(Συνέχεια πίνακα)

LP	FPP					IT
	-2	-1	0	1	2	
600	187.50	178.25	230.88	345.38	521.75	2
650	190.05	180.80	233.42	347.92	524.30	2
700	193.93	184.68	237.30	351.80	528.18	2
750	199.13	189.88	242.51	357.01	533.38	2
800	205.67	196.42	249.04	363.54	539.92	2
850	213.53	204.28	256.90	371.40	547.78	2
900	222.72	213.47	266.09	380.59	556.97	2
950	233.24	223.99	276.61	391.11	567.49	2
1000	245.08	235.83	288.46	402.96	579.33	2
1050	258.26	249.01	301.63	416.13	592.51	2
1100	272.76	263.51	316.14	430.64	607.01	2
1150	288.59	279.34	331.97	446.47	622.84	2
1200	305.75	296.50	349.13	463.63	640.00	2

(Συνέχεια πίνακα)

LP	FPP					IT
	-2	-1	0	1	2	
600	194.25	181.63	230.88	342.00	515.00	3
650	196.80	184.17	233.42	344.55	517.55	3
700	200.68	188.05	237.30	348.43	521.43	3
750	205.88	193.26	242.51	353.63	526.63	3
800	212.42	199.79	249.04	360.17	533.17	3
850	220.28	207.65	256.90	368.03	541.03	3
900	229.47	216.84	266.09	377.22	550.22	3
950	239.99	227.36	276.61	387.74	560.74	3
1000	251.83	239.21	288.46	399.58	572.58	3
1050	265.01	252.38	301.63	412.76	585.76	3
1100	279.51	266.89	316.14	427.26	600.26	3
1150	295.34	282.72	331.97	443.09	616.09	3
1200	312.50	299.88	349.13	460.25	633.25	3

(Συνέχεια πίνακα)

LP	FPP					IT
	-2	-1	0	1	2	
600	201.00	185.00	230.88	338.63	508.25	4
650	203.55	187.55	233.42	341.17	510.80	4
700	207.43	191.43	237.30	345.05	514.68	4
750	212.63	196.63	242.51	350.26	519.88	4
800	219.17	203.17	249.04	356.79	526.42	4
850	227.03	211.03	256.90	364.65	534.28	4
900	236.22	220.22	266.09	373.84	543.47	4
950	246.74	230.74	276.61	384.36	553.99	4
1000	258.58	242.58	288.46	396.21	565.83	4
1050	271.76	255.76	301.63	409.38	579.01	4
1100	286.26	270.26	316.14	423.89	593.51	4
1150	302.09	286.09	331.97	439.72	609.34	4
1200	319.25	303.25	349.13	456.88	626.50	4

Πίνακας ΠΑ-4: Βάση δεδομένων για την διάμετρο εξόδου διαμετρών οπών (LP: Ισχύς, FPP: Θέση επιπέδου εστίασης, IT: Χρονος διεργασίας).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: ΣΧΕΔΙΑ

Σχήμα ΠΕ-1: Κατασκευαστικό σχέδιο ιδιοσυσκευής τοποθέτησης αισθητήρων.

Σχήμα ΠΕ-2: Σχέδιο κεφαλής καταγραφής και βάσης τοποθέτησης αισθητήρων.

ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ – ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Ο Αριστείδης Γ. Στουρνάρας γεννήθηκε στις 21 Αυγούστου 1978 στην Αθήνα. Απέκτησε το δίπλωμα του Μηχανολόγου Μηχανικού στο τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών τον Σεπτέμβριο του 2002 με βαθμό 7.21. Από τον Μάρτιο του 2003 είναι υποψήφιος διδάκτορας του Πανεπιστημίου Πατρών. Έκτοτε έχει συμμετάσχει σε μία σειρά από ερευνητικά προγράμματα καθώς και στις εκπαιδευτικές δραστηριότητες του Εργαστηρίου Συστημάτων Παραγωγής και Αυτοματισμού. Είναι μέλος τους Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (ΤΕΕ) καθώς και του Πανελληνίου Συλλόγου Διπλωματούχων Μηχανολόγων – Ηλεκτρολόγων (ΠΣΔΜ-Η).

Στα πλαίσια της απασχόλησης του στο Εργαστήριο Συστημάτων Παραγωγής και Αυτοματισμού εκπόνησε μια σειρά δημοσιεύσεων σε επιστημονικά περιοδικά και παρουσιάσεων σε διεθνή και εθνικά συνέδρια με κρίση της πλήρους εργασίας:

Επιστημονικά περιοδικά

1. **Stournaras A.**, K. Salonitis and G. Chryssolouris, "Optical emissions for monitoring of percussion laser drilling process", submitted to International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2008).
2. **Stournaras A.** and G. Chryssolouris, "On acoustic emissions in percussion laser drilling", submitted to International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2009).
3. **Stournaras A.** Salonitis, K., P. Stavropoulos and G. Chryssolouris, "Theoretical and experimental investigation of pulsed laser grooving process", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (DOI 10.1007/s00170-008-1818-5, 2008).
4. Salonitis, K., **A. Stournaras**, G. Tsoukantas, P. Stavropoulos and G. Chryssolouris, "A Theoretical and Experimental Investigation on Limitations of Pulsed Laser Drilling", Journal of Materials Processing Technology, (Vol. 183, No. 1, 2007), pp. 96-103.

5. Tsoukantas, G., **A. Stournaras** and G. Chryssolouris, "An experimental investigation of remote welding with CO₂ and Nd: YAG laser-based systems", Journal of Laser Applications, (Vol. 20, No. 1), pp. 50-58, (2008).
6. **Stournaras, A.**, P. Stavropoulos and G. Chryssolouris, "Investigation of laser cutting quality of Aluminium 5083", Submitted to International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2008).
7. Tsoukantas, G., K. Salonitis, **A. Stournaras**, P. Stavropoulos and G. Chryssolouris, "On Optimal Design Limitations of Generalized Two-Mirror Remote Beam Delivery Laser Systems: The case of remote Welding", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (Vol. 32, 2007), pp. 932-941.
8. Salonitis, K., **A. Stournaras**, P. Stavropoulos and G. Chryssolouris, "Thermal modelling of the Material Removal Rate and Surface Roughness for EDM Die-Sinking", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (Vol.40, 2009), pp. 316-323, DOI 10.1007/s00170-007-1327-y.
9. Chryssolouris, G., P. Stavropoulos, G. Tsoukantas, K. Salonitis and **A. Stournaras**, "Nanomanufacturing Processes: A Critical Review", International Journal of Materials & Product Technology, (Vol. 21, No 4, 2004), pp. 331-348.

Διεθνή συνέδρια

10. **Stournaras A.**, Stavropoulos P., Salonitis K. and Chryssolouris G., (2008), "Laser Process Monitoring: A Critical Review", Advances in Manufacturing Technology XXII (Proceedings of the 6th International Conference on Manufacturing Research), UK, (September 2008), Vol. I, pp. 425 - 435, ISBN: 978-1-902316-60-4.
11. Stavropoulos P., **Stournaras A.**, and Chryssolouris G., "On the Design of a Monitoring System for Desktop Micro-Milling Machines", Advances in Manufacturing Technology XXII (Proceedings of the 6th International Conference on Manufacturing Research), UK, (September 2008), Vol. I, pp. 483 - 491, ISBN: 978-1-902316-60-4
12. P. Stavropoulos, **A. Stournaras**, K. Salonitis and G. Chryssolouris, "Experimental and Theoretical Investigation of the Ablation Mechanisms During Femtosecond Laser Machining", In Proceedings of the 6th International Symposium on Nanomanufacturing (ISNM6), (November 2008), Athens, Greece.

13. **Stournaras A.**, Salonitis K. and Chryssolouris G., "Numerical Simulation of Reaction Injection Molding for Refrigerator Insulation", Advances in Manufacturing Technology XXII (Proceedings of the 6th International Conference on Manufacturing Research), (September 2008), Vol. II, pp. 621 - 630, ISBN 978-1-902316-60-4
14. Salonitis K., Stavropoulos P., **Stournaras A.** and Chryssolouris G., "Thermal Modelling of Laser Cladding", Proceedings of the 5th LANE 2007 (Laser Assisted Net Shape Engineering), Erlangen, Germany, pp. 825-835, ISBN 978-3-87525-261-3, (September 2007)
15. Salonitis K., Stavropoulos P., **Stournaras A.** and Chryssolouris G., "CO₂ Laser Cutting of Aluminium", Proceedings of the 5th LANE 2007 (Laser Assisted Net Shape Engineering), Erlangen, Germany, pp.303-311, ISBN 978-3-87525-261-3, (September 2007)
16. Stavropoulos, P., K. Salonitis, **A. Stournaras**, J. Pandremenos, J. Paralikas and G. Chryssolouris, "Advances and Challenges for tool Condition Monitoring in Micro-Milling", Proceedings of the IFAC Workshop on Manufacturing Modelling, Management and Control, Budapest, Hungary, (November 2007), pp. 157-162.
17. Stavropoulos, P., K. Salonitis, **A. Stournaras**, J. Pandremenos, J. Paralikas and G. Chryssolouris, "Tool Condition Monitoring in Micro-Milling - A Critical Review", Advances in Manufacturing Technology XXI, Proceedings of the 5th International Conference on Manufacturing Research, Leicester, U.K., (September 2007), pp. 324-328.
18. Salonitis, K., P. Stavropoulos, **A. Stournaras** and G. Chryssolouris, "Thermal modelling of laser cladding process", Proceedings of the 5th Laser Assisted Net Shape Engineering, Erlangen, Germany, (September 2007), pp. 303-311.
19. Salonitis, K., P. Stavropoulos, **A. Stournaras** and G. Chryssolouris, "CO₂ Laser cutting of aluminium", Proceedings of the 5th Laser Assisted Net Shape Engineering, Erlangen, Germany, (September 2007), pp. 825-835.
20. Salonitis, K., P. Stavropoulos, **A. Stournaras** and G. Chryssolouris, "Finite Element Modeling of Grind Hardening Process", Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, Calabria, Italy, (August 2007), pp. 117 - 123.
21. Stavropoulos, P., K. Salonitis, **A. Stournaras**, K. Euthimiou and G. Chryssolouris, "Molecular Dynamics Simulation of Laser Ablation of Iron",

- Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, Calabria, Italy, (August 2007), pp. 549 - 553.
22. **Stournaras, A.**, K. Salonitis, P. Stavropoulos and G. Chryssolouris, "Finite element thermal analysis of pulsed laser drilling process", Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, Calabria, Italy, (August 2007), pp. 563 - 570.
 23. **Stournaras, A.**, P. Stavropoulos, J. Pandremenos, J. Paralikas and G. Chryssolouris, "A Statistical Analysis of Laser Cutting Quality of Aluminium Alloy 5083", Proceedings of the 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Liverpool, U.K., (May-June 2007).
 24. Stavropoulos, P., K. Salonitis, **A. Stournaras**, J. Pandremenos, J. Paralikas and G. Chryssolouris, "Experimental Investigation of Micro-milling Process Quality", Proceedings of the 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Liverpool, U.K., (May-June 2007).
 25. Papakostas, N., S. Makris, K. Alexopoulos, D. Mavrikios, **A. Stournaras** and G. Chryssolouris, "Modern Automotive Assembly Technologies: Status and Outlook", Proceedings of the 1st CIRP International Seminar on Assembly Systems, Stuttgart, Germany, (November 2006), pp. 39-44.
 26. **Stournaras, A.**, P. Stavropoulos and G. Chryssolouris, "Theoretical and Experimental Investigation of Pulsed Laser Grooving Process", Proceedings of the 25th International Congress on Applications of Lasers and Electro-optics (ICALEO), Arizona, USA, (October 2006), pp. 525-534.
 27. **Stournaras, A.**, P. Stavropoulos and G. Chryssolouris, "Investigation of Laser cutting quality of Aluminium", Proceedings of the 25th International Congress on Applications of Lasers and Electro-optics (ICALEO), Arizona, USA, (October 2006), pp. 233-239.
 28. Tsoukantas, G., **A. Stournaras** and G. Chryssolouris, "An experimental investigation of remote welding with CO₂ and Nd: YAG laser-based systems", Proceedings of the 25th International Congress on Applications of Lasers and Electro-optics (ICALEO), Arizona, USA, (October 2006), pp. 320-329.
 29. Salonitis, K., G. Tsoukantas, P. Stavropoulos, **A. Stournaras**, T. Chondros and G. Chryssolouris, "Process forces modelling in Grind-Hardening", Proceedings of the 9th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, Bled, Slovenia, (May 2006), pp. 295-302.

30. Salonitis, K., G. Tsoukantas, P. Stavropoulos and **A. Stournaras**, "A Critical Review of Stereolithography Process Modeling", International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping-VR@P 2003, Leiria, Portugal, (October 2003), pp. 377-384.
31. Chrysosolouris, G., P. Stavropoulos, G. Tsoukantas, K. Salonitis and **A. Stournaras**, "Nanomanufacturing Processes: A Critical Review", International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping-VR@P 2003, Leiria, Portugal (October 2003), pp. 535-543.

Ελληνικά συνέδρια

32. **Στουρνάρας, Α.**, Π. Σταυρόπουλος, Κ. Σαλωνίτης και Γ. Χρυσολούρης , "Ανασκόπηση των μεθόδων παρακολούθησης των διεργασιών με δέσμη Laser", Εισηγήσεις του 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, ISBN 978-960-89776-0-0, Αθήνα, Ελλάδα, (Μάιος 2007).
33. Σταυρόπουλος, Π., **Α. Στουρνάρας**, Κ. Ευθυμίου και Γ. Χρυσολούρης, "Μοριακή δυναμική ανάλυση της διεργασίας απομάκρυνσης υλικού με δέσμη Laser: Προσέγγιση με χρήση Δυναμικού Morse", Εισηγήσεις του 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, ISBN 978-960-89776-0-0, Αθήνα, Ελλάδα, (Μάιος 2007).
34. **Στουρνάρας, Α.**, Π. Σταυρόπουλος, Γ. Δημητρακόπουλος και Γ. Χρυσολούρης "Πειραματική διερεύνηση της ποιότητας κοπής με δέσμη Laser Κράματος Αλουμινίου AL5083", Εισηγήσεις του 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, ISBN 978-960-89776-0-0, Αθήνα, Ελλάδα, (Μάιος 2007).
35. Σταυρόπουλος, Π., Κ. Σαλωνίτης , **Α. Στουρνάρας**, Ι. Παραλίκας και Γ. Χρυσολούρης, "Ανασκόπηση μεθόδων παρακολούθησης της διεργασίας μικρο-φρεζαρίσματος", Εισηγήσεις του 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, ISBN 978-960-89776-0-0, Αθήνα, Ελλάδα, (Μάιος 2007).
36. Σαλωνίτης, Κ., Π. Σταυρόπουλος, **Α. Στουρνάρας** και Γ. Χρυσολούρης , "Ανασκόπηση διαδικασιών μοντελοποίησης διεργασιών επιφανειακής θερμικής κατεργασίας", Εισηγήσεις του 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, ISBN 978-960-89776-0-0, Αθήνα, Ελλάδα, (Μάιος 2007).
37. Σαλωνίτης, Κ., Π. Σταυρόπουλος, **Α. Στουρνάρας** και Γ. Χρυσολούρης "Μοντελοποίηση διεργασίας Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης με Χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων", Εισηγήσεις του 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου

- Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, ISBN 978-960-89776-0-0, Αθήνα, Ελλάδα, (Μάιος 2007).
38. Σταυρόπουλος, Π., Γ. Τσουκαντάς, Κ. Σαλωνίτης, **Α. Στουρνάρας** και Γ. Χρυσολούρης, "Σύνοψη της εφαρμογής νάνο-διεργασιών στην βιομηχανική παραγωγή", Εισηγήσεις 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, Αθήνα, Ελλάδα, (Μάρτιος 2005) - (Εκδόθηκε σε CD-ROM).
39. Τσουκαντάς, Γ., Κ. Σαλωνίτης, Π. Σταυρόπουλος, **Α. Στουρνάρας**, Στ. Δρακόπουλος, Γ. Δημητρακόπουλος και Γ. Χρυσολούρης, "Ανασκόπηση μεθόδων μοντελοποίησης σε διεργασίες αφαίρεσης υλικού με Laser (*Laser Machining*)", Εισηγήσεις 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, Αθήνα, Ελλάδα, (Μάρτιος 2005) - (Εκδόθηκε σε CD-ROM).
40. Σαλωνίτης, Κ., Γ. Τσουκαντάς, Π. Σταυρόπουλος, **Α. Στουρνάρας**, Σ. Δρακόπουλος και Γ. Χρυσολούρης, "Τεχνικές ταχείας πρωτοτυποποίησης-Διεθνής κατάσταση και νέες προοπτικές", Εισηγήσεις 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, Αθήνα, Ελλάδα, (Μάρτιος 2005) - (Εκδόθηκε σε CD-ROM).
41. Σαλωνίτης, Κ., Γ. Τσουκαντάς, Π. Σταυρόπουλος, **Α. Στουρνάρας**, Σ. Δρακόπουλος και Γ. Χρυσολούρης, "Μοντελοποίηση στερεολιθογραφίας-Ανασκόπηση διεθνούς βιβλιογραφίας", Εισηγήσεις 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, Αθήνα, Ελλάδα, (Μάρτιος 2005) - (Εκδόθηκε σε CD-ROM).
42. Τσουκαντάς, Γ., Π. Σταυρόπουλος, Κ. Σαλωνίτης, **Α. Στουρνάρας**, Σ. Δρακόπουλος, Γ. Δημητρακόπουλος και Γ. Χρυσολούρης, "Τεχνολογία συγκόλλησης με Laser από απόσταση (*Remote Laser welding*). Χαρακτηριστικά και εξελίξεις", Εισηγήσεις 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, Αθήνα, Ελλάδα, (Μάρτιος 2005) - (Εκδόθηκαν σε CD-ROM).
43. Σαλωνίτης, Κ., Γ. Τσουκαντάς, Π. Σταυρόπουλος, **Α. Στουρνάρας** και Γ. Χρυσολούρης, "Ανασκόπηση των διαδικασιών μοντελοποίησης της επιφανειακής σκλήρυνσης μέσω λείανσης", Εισηγήσεις 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, Αθήνα, Ελλάδα, (Μάρτιος 2005) - (Εκδόθηκαν σε CD-ROM).

Επίσης, στα πλαίσια της συγγραφικής δραστηριότητας του Εργαστηρίου Συστημάτων Παραγωγής και Αυτοματισμού, έχει συμμετάσχει:

1. Στην σύνταξη του συγγράμματος “Σημειώσεις Εργαστηριακών Ασκήσεων Μηχανουργικής Τεχνολογίας Ι και ΙΙ”, κατά τα ακαδημαϊκά έτη 2003/2004, 2004/2005, 2005/2006, 2006/2007 και 2007/2008.
2. Στην σύνταξη του συγγράμματος “Σημειώσεις Εργαστηριακών Ασκήσεων Μηχανουργείου Ι και ΙΙ”, κατά τα ακαδημαϊκά έτη 2003/2004, 2004/2005, 2005/2006, 2006/2007 και 2007/2008.
3. Στην σύνταξη του συγγράμματος “G. Chryssolouris, Manufacturing Systems: Theory and Practice 2nd Edition, Springer-Verlag, New York, New York, (2006)”.
4. Στην διοργάνωση του 6^{ου} Διεθνούς Συμποσίου Νανοπαραγωγής (6th *International Symposium on Nanomanufacturing – ISNM6*) το οποίο πραγματοποιήθηκε στις 12-14 Νοεμβρίου 2008, στην Αθήνα, Ελλάδα.