

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΙΤΣΕΝΤΖΑΤΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΤΙΤΛΟΣ:

**ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ LASER
(LASER SURFACE TEXTURING).**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Δ. ΠΑΝΤΕΛΗΣ

ΑΘΗΝΑ ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2008

Πρόλογος.

Με την περάτωση της Διπλωματικής Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους που συνέβαλαν με τον τρόπο τους στην ολοκλήρωσή της, η οποία και συνδυάζεται με το πτυχίο μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Izhak Etsion of Department of Mechanical Engineering of Haifa ο οποίος ανταποκρίθηκε άμεσα σε e-mail και μου απέστειλε paper που σχετίζεται με το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου τον κ. Δ. Ι. Παντελή για την αμέριστη βοήθειά του, την υπομονή του και την άριστη συνεργασία μας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου καθώς και όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους για την ψυχολογική τους βοήθεια και την στήριξή τους προς το πρόσωπό μου.

Με εκτίμηση,
Χρήστος.Θ.Βιτσεντζάτος.

Περίληψη.

Η τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας γενικά και η τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας με laser ειδικότερα ήρθε στο προσκήνιο τα τελευταία χρόνια ως ένα βιώσιμο μέσο για την αύξηση των τριβολογικών επιδόσεων. Θεμελιώδης ερευνητική εργασία λαμβάνει χώρα παγκοσμίως κάνοντας χρήση διάφορων τεχνικών τροποποίησης της επιφάνειας με σκοπό να εκτιμηθούν τα οφέλη από την τροποποίηση της επιφάνειας και να βελτιστοποιηθούν οι μορφές τροποποίησης και οι διαστάσεις τους υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Από όλες τις μεθόδους τροποποίησης της επιφάνειας η LST είναι η πιο υποσχόμενη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το laser είναι ιδιαίτερα γρήγορο, φιλικό προς το περιβάλλον και παρέχει απόλυτο έλεγχο της μορφής και του μεγέθους των μικρό-κοιλοτήτων, γεγονός που οδηγεί στην πραγματοποίηση του βέλτιστου σχεδιασμού της κατεργασίας. Η LST κερδίζει όλο και περισσότερο την προσοχή της Τριβολογικής κοινότητας και αυτό είναι εμφανές από την συνεχή αυξανόμενη δημοσιεύσεων πάνω σε αυτό το θέμα.

Επίσης, η LST εφαρμόζεται επιτυχώς σε χιτώνια κυλίνδρων και σε μηχανικά αεροστεγή στεγανωτικά με αποτέλεσμα να έχουμε αύξηση κατά τρεις φορές της ζωής των στεγανωτικών των αντλιών. Η επιτυχία αυτή αποδίδεται και στη δυνατότητα θεωρητικής μοντελοποίησης της LST υπό συνθήκες πλήρους λίπανσης, η οποία συμφωνεί πλήρως με τις εργαστηριακές δοκιμές και επιτρέπει βελτιστοποιήσεις των παραμέτρων της LST. Τέλος, υπάρχει η πεποίθηση ότι με τις συνεχείς προσπάθειες στον τομέα της έρευνας και της ανάπτυξης όλο και περισσότερα μηχανικά τμήματα σε τριβολογικές εφαρμογές θα έχουν όφελος από τη χρήση της LST στα επόμενα χρόνια.

Summary.

Surface texturing in general and laser surface texturing in particular has emerged in recent years as a viable means of enhancing tribological performance. A great deal of fundamental research work is still going on worldwide, utilizing various texturing techniques, to explore the benefits of surface texturing and to optimize the texturing forms and dimensions under various operating conditions.

Of all the practical micro-surface patterning methods it seems that laser surface texturing (LST) offers the most promising concept. This is because the laser is extremely fast, clean to the environment and provides excellent control of the shape and size of the micro-dimples, which allows realization of optimum designs. As can be seen LST is starting to gain more and more attention in the Tribology community as is evident from the growing number of publications on this subject.

At the same time LST is already successfully applied to cylinder liners and to mechanical seals resulting in up to threefold increase in seal life in pumps operating in the field [105]. This success is attributed to the theoretical modeling of LST under full fluid film conditions, which gave good agreement with laboratory tests and permitted optimization of the LST parameters. It is envisaged that with the continuing R&D effort many more mechanical components in tribological applications may benefit from LST in the coming years.

Περιεχόμενα.

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.	6
Κεφάλαιο 2. ΠΕΡΙ ΔΕΣΜΗΣ LASER.	11
2.1 Είδη Δέσμης Laser.	13
2.1.1 CO ₂ Laser	13
2.1.2 Nd:YAG Laser	14
2.1.3 Excimer Laser	15
2.2 Αλληλεπίδραση μεταξύ Δέσμης Laser και υλικού.	16
2.2.1 Θερμική Αλληλεπίδραση	16
2.2.2 Φωτοηλεκτρονική Αλληλεπίδραση.	19
2.2.3 Μηχανική Αλληλεπίδραση	19
Κεφάλαιο 3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ LASER .	20
3.1 Περιγραφή των φυσικών φαινομένων κατά την αλληλεπίδραση μεταξύ δέσμης Laser και υλικού	20
3.2 Υδροδυναμικός Μηχανισμός Δημιουργίας Κοιλοτήτων (Depression Formation)	22
3.3 Μηχανισμός τροποποίησης της τραχύτητας μέσω εξάτμισης	36
Κεφάλαιο 4 LST ΓΙΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ.	40
4.1. Περί Laser Surface Texturing (LST)	40
4.2 Εφαρμογές της Τροποποίησης της Τραχύτητας Κυλινδρικής Επιφάνειας με τη χρήση Laser.	42
4.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση της Τεχνικής της Τροποποίησης της Τραχύτητας της Επιφάνειας με τη χρήση Laser για Τροβολογικές Εφαρμογές.	49
4.4 Μικρο-τροποποίηση Επιφάνειας Εργαλειοχάλυβα με σκοπό τη βελτίωση των Τριβολογικών του Επιδόσεων.	52
4.4.1 Εισαγωγή	52
4.4.2 Πειραματικό Στάδιο	54
4.4.3 Αποτελέσματα	56
4.5 Εφαρμογές της LST σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης.	61
4.6 Τροποποίηση της Τραχύτητας της Επιφάνειας με χρήση Laser για εξαρτήματα Αυτοκινητοβιομηχανίας.	63
4.6.1 Εισαγωγή	63
4.6.2 Περιγραφή Συστήματος Δοκιμής (test rig).	65
4.6.3 Αποτελέσματα.	71
4.6.4 Συμπέρασμα.	76
Κεφάλαιο 5. LST ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΣΤΕΓΑΝΩΤΙΚΑ.	77
5.1 LST σε Μηχανικά Αεροστεγή Στεγανωτικά.	77
5.2 Τροποποίηση της Τραχύτητας της Επιφάνειας Επαφής Αεροστεγών Στεγανωτικών.	81
5.2.1 Αντικειμενικός Σκοπός	81
5.2.2 Προσέγγιση	81
5.2.3 Επίτευξη	81
5.2.4 Γενικά	82
5.2.5 Αποτελέσματα: Δοκιμές Στεγανωτικών	82
5.2.6 Αποτελέσματα: Δοκιμές Χαλύβδινων Δοκιμίων	86

5.2.7. Συμπεράσματα.....	87
5.3. Δοκιμή της Τεχνολογίας LST σε Μηχανικά Αεροστεγή Στεγανωτικά ενός Πετροχημικού Δωλιστηρίου.....	88
5.4 Μέγιστης Υδροστατικής Ακαμψίας Μηχανικό Αεροστεγές Στεγανωτικό του οποίου η Τραχύτητα της Επιφάνειας έχει τροποποιηθεί με χρήση Laser.	89
5.4.1 Εισαγωγή	89
5.4.2 Ανάλυση	90
5.4.3 Πειραματικός σχεδιασμός και διαδικασία.....	96
5.4.4 Αποτελέσματα δοκιμών	98
5.4.5 Συμπέρασμα.....	100
Κεφάλαιο 6. ΕΙΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ LST.....	101
6.1. Μικρο-διεργασία με Laser στη Βιομηχανία Αποθήκευσης Δεδομένων.....	101
6.1.1. Εισαγωγή	101
6.1.2. Καθαρισμός της Επιφάνειας με Laser (Laser Surface Cleaning)	101
6.1.3 Τροποποίηση της Τραχύτητας με Laser, Δημιουργία Μικρο-προεξοχών με Laser και Παρεμφερείς Τεχνικές.....	106
6.1.4 Παρακολούθηση και Έλεγχος της Εφαρμογής Laser στην Επιφάνεια.....	109
6.1.5 Δημιουργία Ελεγχόμενων Περιοδικών Δομών (Controllable Periodic Structures) Μέσω της Εφαρμογής Laser.	109
6.1.6. Νανο-εγχάραξη (Nanopatterning) και Νανο-λιθογραφία (Nanolithography) με χρήση της Ακτινοβολίας Laser.	111
6.1.7 Συμπέρασμα.....	111
6.2 Μετατροπές Μικροκλίμακας της Μορφολογίας της Επιφάνειας από Πυρίτιο (Si) με χρήση Παλμικού Laser.....	112
6.2.1 Γενικά.....	112
6.2.2 Πειραματικές Λεπτομέρειες.....	112
6.2.3 Αποτελέσματα.....	113
6.3. Τροποποίηση της Τραχύτητας της Επιφάνειας Κεραμικών Εξαρτημάτων με χρήση Laser	119
6.3.1 Αντικειμενικός Σκοπός	119
6.3.2 Εισαγωγή	119
6.3.3 Προσέγγιση	120
6.3.4 Αποτελέσματα	121
6.3.5. Επίτευγμα της Εφαρμογής και Συμπεράσματα.....	125
6.4 Μοντέλο τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας πυριτικού γυαλιού με χρήση Laser	126
6.4.1 Μοντέλο αλλαγής της “Φανταστικής” Θερμοκρασίας του γυαλιού.....	128
6.4.2 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων	130
6.4.3 Αξονοσυμμετρική μεταφορά Θερμότητας σε ισότροπο υλικό.....	133
6.4.4 Θερμοφυσικές Ιδιότητες	135
6.4.5 Αριθμητική Επίλυση	135
6.4.6 Αποτελέσματα Μοντέλου	136
6.5. Χρήση Laser για τροποποίηση Ορθοπεδικών Εμφυτευμάτων.....	145
6.6. Δημιουργία Επιφανειακού Ιστού Υπομικροσκοπικής Κλίμακας σε στερεά υλικά με χρήση Παλμικού Laser Υπεριώδους Ακτινοβολίας.....	147
Κεφάλαιο 7 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	149
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	151

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.

Η τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας με τη χρήση laser (Laser Surface Texturing-LST) έκανε την εμφάνισή της την προηγούμενη δεκαετία ως μια βιώσιμη επιλογή στην περιοχή της τεχνολογίας της επιφάνειας, η οποία οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της μηχανικής αντοχής της, της αντοχής σε φθορά, στο συντελεστή τριβής καθώς και σε άλλες τριβολογικές μηχανικές συνιστώσες. Η χρήση του laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη επιφάνεια κατασκευαστικών τμημάτων με αποτέλεσμα να βελτιώσει τις λειτουργίες τους και την απόδοσή τους. Οι μεγαλύτερες μεταβολές που μπορεί να υποστεί ένα κατασκευαστικό τμήμα ξεκινούν από την επιφάνειά του. Οξειδωση, διάβρωση, φθορά, κόπωση είναι απλώς μερικές από τις δυσάρεστες καταστάσεις που μπορεί να εξελιχθούν σε μια επιφάνεια.

Συνεπώς, η κατεργασία της επιφάνειας προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα και υπόσχεται καλή λειτουργία σε ένα κατασκευαστικό τμήμα. Διάφορες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για την τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας, αλλά από όλες η LST είναι η πιο αναπτυγμένη μέχρι στιγμής. Μία σημαντική ιδιότητα της LST είναι ότι έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί σε μία επιφάνεια πολλές μικρό-κοιλότητες, οι οποίες μπορούν να χρησιμεύσουν σαν μικρο-υδροδυναμικά δοχεία σε καταστάσεις πλήρους λίπανσης, σαν τεχνητές δεξαμενές κατακράτησης λιπαντικών σε καταστάσεις με έλλειψη λίπανσης, καθώς και σαν συλλέκτες μικρό-ρωγμών και φθορών τόσο σε καταστάσεις πλήρους, όσο και σε καταστάσεις έλλειψης λίπανσης.

Η τραχύτητα της επιφάνειας είναι μία σημαντική παράμετρος για την τεχνολογία βιομηχανικών κατασκευών και σε πολλές περιπτώσεις η τροποποίηση της τοπογραφίας της επιφάνειας είναι απαραίτητη. Ίσως το πιο γνωστό παράδειγμα είναι η τροποποίηση επιφάνειας μέσω έλασης η οποία προκύπτει κατά την παραμόρφωση των μεταλλικών φύλλων. Η τελειοποίηση της επιφάνειας επηρεάζει τα πάντα, δηλαδή τη διαμορφωσιμότητα, την ικανότητα κατακράτησης λιπαντικών, την πρόσφυση που θα έχει μια επιστρωμένη ουσία στην περιοχή επαφής της με την επιφάνεια, την εμφάνιση, και την συνοχή της επιφάνειας.

Επίσης, επηρεάζει τη λειτουργικότητα και τα επίπεδα φθοράς μεταξύ επιφανειών που είναι σε επαφή. Συνεπώς λαμβάνοντας υπόψη τη φύση της επιδιωκόμενης κατεργασίας, της χρήσης της αλλά και τους οικονομικούς περιορισμούς που μπορεί να υφίστανται, το φινίρισμα της επιφάνειας πρέπει να προτιμάται.

Όσον αφορά τον χάλυβα, υπάρχουν δύο είδη επιθυμητών επιφανειών.

- Ματ επιφάνειες. Χρησιμοποιούνται κυρίως για κατεργασίες μορφοποίησης των μετάλλων και για εργασίες επικάλυψης. Προέρχονται από όλα τα είδη τροποποίησης τραχύτητας επιφάνειας όπως, με χρήση laser (LST), με εκκένωση ηλεκτρικού ρεύματος, με σφαιροβολή και αμμοβολή,
- Γυαλιστερές επιφάνειες. Χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται οπτική αισθητική ή η επιφάνεια πρόκειται να επιμεταλλωθεί.

Αν και το φινίρισμα της επιφάνειας γίνεται συνήθως με την εφαρμογή περιστρεφόμενου εργαλείου (ρολού) με κατάλληλη πίεση, για τις γυαλιστερές επιφάνειες η προετοιμασία γίνεται με έναν λειασμένο τροχό. Η σύνθεση και η τραχύτητα του τροχού μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή επιφάνεια.

Όσον αφορά το πώς οι ματ επιφάνειες δημιουργούνται, οι πιο αποτελεσματικές τεχνικές είναι όπως είπαμε η χρήση laser (LST), με εκκένωση ηλεκτρικού ρεύματος, με σφαιροβολή και με αμμοβολή. Κάθε μία από αυτές τις τεχνικές αφήνει ένα μικροσκοπικό αποτύπωμα στην επιφάνεια του γυμνού χάλυβα, το οποίο παράγεται μέσω περιστροφικού μηχανισμού και έτσι δημιουργείται η επιθυμητή αποτυπωμένη εικόνα στην επιφάνεια του χάλυβα. Το αποτύπωμα αυτό είναι δυνατόν να παραχθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους ανάλογα τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί:

- ❖ Όσον αφορά τη διαδικασία με εκκένωση ηλεκτρικού ρεύματος, έχουμε μια ακριβή και πλήρως ελεγχόμενη ηλεκτρική εκκένωση στην επιφάνεια εργασίας διαμέσου ενός διηλεκτρικού υγρού. Υψηλής ενέργειας σπινθήρες δημιουργούνται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και την επιφάνεια με αποτέλεσμα αυτή να τηχθεί τοπικά. Το τηκόμενο υλικό στερεοποιείται και κατόπιν απομακρύνεται μέσω του διηλεκτρικού υγρού. Το αποτέλεσμα είναι η κατεργασμένη επιφάνεια να είναι ομοιόμορφη και συνεχόμενη σε ικανοποιητικό βαθμό. Επιπλέον, ο χειριστής έχει υψηλό βαθμό ελέγχου στη μορφοποίηση του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε. Αφού η μέθοδος EDT δεν επηρεάζεται από τη σκληρότητα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρκετά σκληρά και ανθεκτικά στη φθορά φύλλα. Η μέθοδος EDT παρέχει μια χωρίς επαφή και συνεπώς ανεξάρτητη από τη σκληρότητα του φύλλου, μέθοδο διεργασίας.
- ❖ Κατά την αμμοβολή ή τη σφαιροβολή, το υπό εργασία φύλλο αρχικά κατεργάζεται με εκτόξευση άμμου ή χαλύβδινων σφαιρών υπό υψηλή ταχύτητα. Ως αποτέλεσμα, η επιφάνεια ποικίλλει και αποτελείται από κορυφές και κοιλάδες. Συνεπώς, το τελικό αποτέλεσμα είναι η κατανομή της τραχύτητας της επιφάνειας να είναι μάλλον τυχαία, ενώ δεν μπορεί να εφαρμοστεί με αποτελεσματικότητα σε φύλλα από μέταλλο που είναι αρκετά σκληρό. Η διεργασία αυτή είναι από τις πρώτες που εφαρμόστηκαν στην τεχνολογία της μηχανικής κατεργασίας μιας επιφάνειας.
- ❖ Η τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας με χρήση laser (LST), είναι παρόμοια με αυτήν της EDT μόνο που αντί για τη χρήση ηλεκτρικού ρεύματος έχουμε τη χρήση ενός υψηλής ενέργειας παλμού laser CO₂ ο οποίος είναι ικανός να λειώσει μικροσκοπικές κυκλικές κοιλότητες στην επιφάνεια του φύλλου του υλικού. Κατόπιν, με τη χρήση αερίου υπό πίεση απομακρύνεται το τηκόμενο υλικό δημιουργώντας μικρές εσοχές μορφής κρατήρα στην επιφάνεια. Με τη χρήση του υπολογιστή, ο χειριστής είναι δυνατόν να καθορίσει το μέγεθος, την απόσταση και το βάθος των κρατήρων και έτσι να μπορεί να ικανοποιηθεί μία ευρεία κλίμακα από απαιτήσεις.

Οι μηχανικές τεχνικές έχουν αρκετά, σοβαρά μειονεκτήματα. Το πιο σημαντικό είναι ότι η σκληρότητα του εργαλείου που θα χρησιμοποιηθεί για τη μορφοποίηση της επιφάνειας, πρέπει να είναι υψηλότερη από αυτήν του υλικού που θα μορφοποιηθεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η δυνατότητα χρήσης της, αφού για αρκετά υλικά κρίνεται ακατάλληλη. Τόσο η μηχανική μορφοποίηση όσο και η EDT έχουν ένα ακόμα σημαντικό μειονέκτημα. Παράγουν τυχαία και ανεξέλεγκτη τραχύτητα στην επιφάνεια σε αντίθεση με τη LST.

Επιπλέον, η EDT δημιουργεί κρατήρες με ανεπιθύμητα αιχμηρά χείλη. Συνεπώς η χρήση συγκεντρωμένων ενεργειακών δεσμών, δηλαδή η δέσμη laser και η δέσμη ηλεκτρονίων, έχει την προοπτική να αντικαταστήσει σε πολλές εφαρμογές τόσο τη μηχανική μορφοποίηση όσο και τη μορφοποίηση με ηλεκτρική εκκένωση.

Η συγκεντρωμένη δέσμη παλμικού laser ή ηλεκτρονίων, μπορεί να καταθλίψει σημεία της επιφάνειας τα οποία να έχουν ένα ομαλό περίβλημα ή να περιβάλλονται από το τηκόμενο υλικό και αυτό επιτυγχάνεται χωρίς φυσική επαφή.

Η τοπογραφία των κρατήρων είναι αναπαραγωγίσιμη και μπορεί να ελεγχθεί εναλλάσσοντας τις παραμέτρους αλληλεπίδρασης όπως η ισχύς της δέσμης, η κατανομή της έντασής της, και το σχήμα και η διάρκεια του παλμού. Συγκριτικά με τη δέσμη ακτίνας laser, η δέσμη ηλεκτρονίων έχει πλεονέκτημα όσον αφορά τον υψηλότερο βαθμό ελέγχου καθώς και την ικανότητα να δημιουργεί προκαθορισμένα σχέδια κρατήρων και αυτό γιατί η δέσμη ηλεκτρονίων ρυθμίζεται ηλεκτρονικά. Η δέσμη ακτίνας laser συνήθως ρυθμίζεται μηχανικά, συνεπώς δεν έχει την ίδια ευελιξία. Όμως, η κατεργασία με laser δεν απαιτεί κενό αέρα, είναι λιγότερο δαπανηρή και έχει την ικανότητα να παράγει ένα ευρύ φάσμα από επιφάνειες με διάφορες τραχύτητες από τις πιο τυχαίες έως πλήρως ταξινομημένες και συνεπώς προτιμάται από άλλες τεχνολογίες.

Η εξέλιξη στο σχεδιασμό του ND:YAG laser και η συνεχής εμπορευματοποίηση του TEA CO₂ laser το οποίο μπορεί να ρυθμιστεί ηλεκτρονικά, ίσως επιτρέψει στην τεχνολογία laser να γίνει τόσο ευέλικτη όσο και αυτή της δέσμης ηλεκτρονίων. Εμείς θα εστιάσουμε στη τεχνολογία με δέσμη ακτίνας laser.

Πολυάριθμες μελέτες κατέδειξαν τη δυνατότητα να ελέγχεται η τοπογραφία της επιφάνειας με ακτινοβολία μέσω της δέσμης laser. Ως γνωστόν, η μεταβολή των λειτουργικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια της μορφοποίησης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφορετικών σχημάτων κρατήρων καθώς και περιφερειών που τους περιβάλλουν.

Όμως απαιτείται εκτεταμένος πειραματισμός για να ευρεθεί ποιος τύπος επιφάνειας ικανοποιεί τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Προφανώς, μία τέτοια εμπειρική προσέγγιση είναι ζημιογόνα και αναποτελεσματική. Και φανερώνει ότι αν και η τεχνολογία με δέσμη laser χρησιμοποιείται σε υψηλής τεχνολογίας εφαρμογές, απέχει αρκετά ώστε να χαρακτηριστεί ως υψηλής τεχνολογίας επιστήμη από μόνη της λόγω της απουσίας ανεπτυγμένων τόσο φυσικών όσο και αριθμητικών μοντέλων. Για αυτό και χρησιμοποιείται ευρύτατα η μέθοδος της προσέγγισης δοκιμή και σφάλμα.

Επειδή τα μέταλλα έχουν υψηλή ανακλαστικότητα στο μήκος κύματος του CO₂ laser, μελετήθηκε η αύξηση της απορροφητικότητας της επιφάνειας η οποία οφείλεται στην οξειδωσή της μέσω της χρήσης οξυγόνου ως βοηθητικό αέριο. Παρατηρήθηκε [1] ότι η χρήση του οξυγόνου ως βοηθητικό αέριο έχει ως αποτέλεσμα η επιφάνεια να παρουσιάζει καλύτερη απορροφητικότητα. Ταυτόχρονα όμως, παρατηρείται και η περιφέρεια γύρω από τον κρατήρα να είναι πιο εύθραυστη κι αυτό επειδή η συνοχή του τηκόμενου υλικού που απορρίπτεται από τη ζώνη αλληλεπίδρασης με το υπόστρωμα, που καλύπτεται με λεπτό οξειδωτικό στρώμα, είναι μικρή.

Επειδή κατά την τροποποίηση της επιφάνειας ελασμάτων η αντοχή των τοιχωμάτων της περιφέρειας γύρω από τον κρατήρα είναι πολύ σημαντική, η χρήση αδρανούς αερίου ως βοηθητικό αέριο συνιστάται [2] για να αποφευχθεί η ευθραυστότητά της. Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι η χρήση βοηθητικού αερίου μπορεί να οδηγήσει σε ασύμμετρο σχήμα της περιφέρειας του κρατήρα [2] το οποίο είναι επιθυμητό για τη διαδικασία της έλασης.

Όπως θα δούμε παρακάτω όμως, η ασθενής προσκόλληση της περιφέρειας του κρατήρα, μπορεί να προβλεφθεί πριν τον πειραματισμό, αρκεί να είναι διαθέσιμο ένα αντίστοιχο μοντέλο της διαδικασίας που ακολουθείται.

Η μέθοδος της δοκιμής και σφάλματος μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, είναι ευρύτατα διαδεδομένη στη βιομηχανική έρευνα. Παρόλα αυτά, ένα θεμελιώδες μοντέλο πάνω στην μορφοποίηση της επιφάνειας με χρήση laser (LST) μπορεί να προωθήσει σημαντικά τον πειραματισμό και να παρέχει μία ασφαλή επιστημονική καθοδήγηση. Εκτός αυτού, η ύπαρξη ενός τέτοιου μοντέλου το οποίο

παρέχει την ικανότητα της πρόβλεψης και της καθοδήγησης, κάνει την τεχνολογία βιώσιμη οικονομικά και ανταγωνιστική.

Παρακάτω θα γίνει πιο κατανοητή η έλλειψη ενός μοντέλου για τη διαδικασία τροποποίησης της τραχύτητας με ακτίνες συγκεντρωμένης ενέργειας. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου μεταβατικού μοντέλου θα έδινε τεράστια ώθηση στις βιομηχανικές εφαρμογές. Αν ρίξουμε μια πιο εκτεταμένη ματιά στον τομέα των κατεργασιών με χρήση laser, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τόσο στη συγκόλληση όσο και στην κοπή με laser εκλείπουν πειραματικά πιστοποιημένα μοντέλα [3,4] παρά τον μεγάλο αριθμό θεωρητικών εργασιών που έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία 25 χρόνια.

Ένας από τους λόγους για τους οποίους συμβαίνει αυτό είναι ότι τα μοντέλα που είχαν αναπτυχθεί για συμβατικές τεχνικές όπως π.χ. για συγκόλληση με τόξο εφαρμόστηκαν πρακτικά χωρίς καμία αλλαγή στη διεργασία με δέσμη laser. Τα μοντέλα αυτά όμως αγνοούσαν σημαντικούς παράγοντες που έχουν να κάνουν με την αλληλεπίδραση μεταξύ του υλικού και της ακτίνας laser, όπως η εξάτμιση της επιφάνειας και τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας.

Όσον αφορά τα μοντέλα διάτρησης με δέσμη laser τα πράγματα είναι διαφορετικά και αυτό οφείλεται πιθανόν στις στρατιωτικές εφαρμογές καθώς κέντρισε το ενδιαφέρον κορυφαίων ερευνητικών εργαστηρίων και έγιναν εκτεταμένες έρευνες κατά το 1970-1980.

Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να αναπτυχθούν τα πειραματικά επαληθευμένα μοντέλα της υδροδυναμικής εκτόξευσης που κυριαρχούν στη διάτρηση με laser [5-7] καθώς και στην εξάτμιση κατά τη διάτρηση με laser [8-9].

Για διάφορους λόγους αυτά τα μοντέλα δεν βρήκαν ανταπόκριση από επιστήμονες και μηχανικούς που ασχολούνταν με έρευνες πάνω σε βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτό γιατί τα μοντέλα αυτά ήταν καθαρά φυσικά και δεν ήταν ανεπτυγμένα σε τέτοιο βαθμό που να είναι πλήρως κατανοητό:

- a) Υπό ποιες συνθήκες αλληλεπίδρασης τα μοντέλα αυτά είναι εφαρμόσιμα και
- b) Αν μια παρεμφερής προσέγγιση μπορεί να αξιοποιηθεί για χρήση χαμηλότερης έντασης δέσμη που είναι η περίπτωση τόσο στην κοπή όσο και στη συγκόλληση με ακτίνα laser.

Επίσης, επειδή τα αριθμητικά μοντέλα ήταν ανεπτυγμένα για απλοποιημένες συνθήκες, το επίπεδο ανάπτυξης δεν ήταν ικανό να αντεπεξέλθει σε προσομοιώσεις βιομηχανικών εφαρμογών και τα μοντέλα δεν ήταν φιλικά προς το χρήστη, ο οποίος χρειαζόταν υποδομή και μεγάλη προσπάθεια για να μπορέσει να ανταποκριθεί. Κατά συνέπεια, οι ερευνητές που ασχολήθηκαν με τη συγκόλληση και την κοπή με χρήση laser, εξαιτίας του αρχικού μηχανικού υποβάθρου τους όσον αφορά τη μεταφορά θερμότητας, δεν έλαβαν υπόψη τις θεωρίες που είχαν αναπτυχθεί από τους φυσικούς για τη διάτρηση με laser.

Συγκεκριμένα αγνόησαν το ρόλο της εξάτμισης [10] και θεώρησαν τη συναγωγή μέσω τριχοειδών ως τη σημαντικότερη κινητήρια δύναμη της ροής του τήγματος για όλους τους τύπους συγκόλλησης και τριβής μεταξύ του βοηθητικού αερίου και του τηγμένου υλικού.

Αυτή η σύντομη περιγραφή στην υπάρχουσα κατάσταση των κατεργασιών με χρήση laser έγινε γιατί, όπως θα δούμε παρακάτω, η τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας δεν αντιπροσωπεύει μια διαφορετική ιδιαίτερη φυσική διαδικασία. Αντίθετα, καλύπτει ένα ευρύ φάσμα της αλληλεπίδρασης υλικού-δέσμης laser, το οποίο συμπεριλαμβάνει την υδροδυναμική διάτρηση, τη διάτρηση με εξάτμιση, και τη διαδικασία μετάβασης μεταξύ υδροδυναμικής διάτρησης και σημειακής συγκόλλησης.

Πράγματι, η ένταση της δέσμης laser που χρησιμοποιείται για τη τροποποίηση τραχύτητας με laser είναι στη περιοχή της εντάσεως της διάτρησης. Επομένως, για

την προσομοίωση της μορφοποίησης με laser, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο που να περιέχει πώς η πίεση αντίδρασης επιφέρει την κίνηση του τήγματος και τη διάδοση του μετώπου εξάτμισης. Γι αυτό, υποδείχθηκε και εφαρμόστηκε ένα υδροδυναμικό μοντέλο προσομοίωσης της διάτρησης το οποίο αν και είναι υπό ανάπτυξη, θα μπορεί να περιγράψει ημι-ποσοτικά την τροποποίηση της τραχύτητας μεταλλικών επιφανειών με τη χρήση laser.

Επίσης θα γίνει η περιγραφή ενός μοντέλου εξάτμισης μέσω αποβολής υλικού. Για να είναι δυνατό να παρέχουμε τη βάση για τους στοχασμούς που ακολουθούν, θα περιγράψουμε παραδείγματα των βιομηχανικών εφαρμογών πριν παρουσιάσουμε τα φυσικά μοντέλα που είναι σχετικά με την προσομοίωση της μορφοποίησης επιφάνειας με τη χρήση laser.

Ακόμα θα γίνει μία αναφορά της LST για Μεταλλικά Μηχανήματα στην οποία περιλαμβάνονται οι εφαρμογές της τροποποίησης της τραχύτητας κυλινδρικής επιφάνειας με τη χρήση laser, μία βιβλιογραφική ανασκόπηση της τεχνολογίας μεταβολής της τεχνικής της τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας με τη χρήση laser για Τριβολογικές Εφαρμογές, καθώς και αναφορά στη Μικροτροποποίηση Επιφάνειας Εργαλειοχάλυβα με σκοπό τη βελτίωση των Τριβολογικών του Επιδόσεων ενώ έπεται η εφαρμογή της LST σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης και η τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας με τη χρήση laser, εξαρτημάτων αυτοκινητοβιομηχανίας.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναφέρουμε την εφαρμογή της LST σε Μηχανικά Αεροστεγή Στεγανωτικά καθώς και πόσο υποσχόμενη είναι αυτή η τεχνολογία σε διάφορες εφαρμογές με λιπαντικά δακτυλίου εμβόλων, ωστικά έδρανα.

Έπονται οι ειδικές εφαρμογές της τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας με τη χρήση laser (LST) όπου θα γίνει αναφορά για τη μικροδιεργασία με laser στη βιομηχανία αποθήκευσης δεδομένων, τις μετατροπές μικροκλίμακας της μορφολογίας της επιφάνειας από Πυρίτιο με χρήση παλμικού laser, την τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας κεραμικών εξαρτημάτων με χρήση laser, την παρουσίαση ενός μοντέλου τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας μέσω χρήσης laser πυριτικού γυαλιού, τη χρήση laser για τροποποίηση ορθοπεδικών εμφυτευμάτων και, δημιουργία επιφανειακού ιστού κλίμακας κάτω του μm σε στερεά υλικά, με χρήση laser υπεριώδους ακτινοβολίας με παλμούς της περιοχής των femtoseconds.

Τέλος, το τελευταίο μέρος της παρούσης εργασίας αποτελείται από τα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2. ΠΕΡΙ ΔΕΣΜΗΣ LASER.

Για την επίτευξη υψηλών προδιαγραφών σε υλικά καταφεύγουμε συχνά σε επιφανειακές κατεργασίες. Οι διαθέσιμες πυκνότητες ισχύος που χρησιμοποιούνται για τις επιφανειακές κατεργασίες των υλικών χρησιμοποιώντας διάφορες πηγές ενέργειας είναι η Φλόγα, η Επαγωγή, το Ηλεκτρικό Τόξο, το Πλάσμα και η Δέσμη laser και Δέσμη ηλεκτρονίων. Η εφαρμογή αυτών των πηγών μειώνει τους κινδύνους εμφάνισης παραμορφώσεων και επιτρέπει υψηλή παραγωγικότητα και μεγάλη ευελιξία. Όσον αφορά το laser το οποίο και μας ενδιαφέρει, η οδήγηση της δέσμης διαμέσου κατάλληλων οπτικών συστημάτων καθιστά εφικτή την κατεργασία περιοχών δυσπρόσιτων σε σχέση με τη χρήση των υπόλοιπων τεχνικών (μεθόδων). Η συντομία (βραχύτητα) των θερμικών κύκλων, που οφείλεται στην εξαιρετικά υψηλή ισχύ, επιτρέπει τη λήψη πρωτότυπων και νέων δομών, που είναι δύσκολο αν όχι αδύνατο να ληφθούν με άλλα μέσα.

Η λέξη LASER αποτελεί το ακρωνύμιο του Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Ενίσχυση Φωτός από Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας). Το laser αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία.

- Ένα ενεργό μέσο ή μέσο ενίσχυσης
- Μία πηγή άντλησης
- Μία οπτική κοιλότητα ή κοιλότητα συντονισμού ή οπτικό αντηχείο.

i) Ενεργό μέσο ονομάζεται το μέσο στο οποίο μπορούμε να έχουμε εκπομπή laser και μπορεί να βρίσκεται σε στερεά, υγρή ή αέρια φάση. Η εκπομπή laser βασίζεται στη μεταφορά ενέργειας ανάμεσα στα φωτόνια της ακτινοβολίας και στο άτομο ύλης το οποίο είναι εκτεθειμένο στην ακτινοβολία. Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις αλληλεπίδρασης.

Η απορρόφηση, είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα άτομο που χαρακτηρίζεται από τις ενεργειακές καταστάσεις E_1 και $E_2 (E_1 < E_2)$ και στο οποίο προσπίπτει ακτινοβολία κάποιας ενέργειας με την οποία αλληλεπιδρά, περνά από τη στάθμη E_1 στη διεγερμένη στάθμη E_2 . Η απορρόφηση συνοδεύεται από εκπομπή φωτός.

Άλλη περίπτωση αλληλεπίδρασης είναι η αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας. Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο το διεγερμένο άτομο αποδιεγείρεται αυθόρμητα μετά την πάροδο του χρόνου στη θεμελιώδη στάθμη η οποία είναι και η σταθερότερη, αποδίδοντας ενέργεια ίση με $E_2 - E_1$ υπό μορφή ενός φωτονίου με τέτοια συχνότητα ώστε $h\nu = E_2 - E_1$.

Τέλος, έχουμε την εξαναγκασμένη εκπομπή. Είναι η περίπτωση αλληλεπίδρασης κατά την οποία αν στο διεγερμένο άτομο προσπέσει ένα φωτόνιο που προέρχεται από το εξωτερικό του ατόμου και που έχει ακριβώς την ίδια ενέργεια με αυτήν του φωτονίου που προέρχεται από τη μετάβαση από τη στάθμη E_2 στη στάθμη E_1 , το άτομο εκπέμπει ένα δεύτερο φωτόνιο. Το προσπίπτον και το εκπεμπόμενο φωτόνιο έχουν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά όσον αφορά τη διεύθυνση, τη συχνότητα, τη φάση και την πόλωση. Η λήψη laser επιτυγχάνεται χάρη στην εξαναγκασμένη εκπομπή.

ii) Πηγή άντλησης είναι μια πηγή εξωτερικής ενέργειας η οποία μπορεί να επιτύχει τη διέγερση των ατόμων σε ένα ανώτερο επίπεδο ενέργειας, η οποία είναι απαραίτητη για τη λήψη δράσης laser. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι άντλησης όπως οπτική, ηλεκτρονική, θερμική, χημική, με βαρέα στοιχεία και με ιονίζουσες ακτινοβολίες.

iii) Όσον αφορά την οπτική κοιλότητα, δεδομένου ότι η ενίσχυση του φωτός εξαρτάται, εκτός από την ισχύ της πηγής εξωτερικής άντλησης και από την αύξηση των διαστάσεων του ενεργού μέσου, το οποίο προφανώς έχει περιορισμένες διαστάσεις, πρέπει να βρεθεί μια διαδικασία η οποία θα επιτρέπει την εκμετάλλευση πολλαπλών περασμάτων της εξαναγκασμένης ακτινοβολίας μέσα από το μέσο

ενίσχυσης. Αυτό πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μία κοιλότητα συντονισμού η οποία αποτελείται από δύο κάτοπτρα, εκ των οποίων το ένα, επειδή είναι ημιπερατό, επιτρέπει σε κάποιο ποσοστό της ακτινοβολίας να εξέλθει στέλλοντας εξ ανάκλασης το υπόλοιπο ποσοστό μέσα στο ενεργό μέσο, τα διεγερμένα άτομα του οποίου παράγουν εκ νέου εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Αυτή η κοιλότητα ονομάζεται και οπτικό αντηχείο, εφόσον οι περιοχές συχνότητας που μας απασχολούν ανήκουν στο υπέρυθρο, το ορατό ή το υπεριώδες.

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της δέσμης laser, αυτά είναι η Συμφωνία Φάσης, η Κατευθυντικότητα, η Ενεργειακή Κατανομή στο Χώρο και οι Ρυθμοί Λειτουργίας, καθώς και η Πυκνότητα της Ισχύος και οι Τρόποι Λειτουργίας των Laser.

Η συμφωνία φάσης είναι το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της δέσμης laser, το οποίο προκύπτει από τα άλλα χαρακτηριστικά του. Μία ακτινοβολία ονομάζεται σύμφωνη χωρικά η χρονικά όταν μπορούμε να υπολογίσουμε τη φάση του κύματος και το πλάτος του, για κάθε χρονική στιγμή και σε κάθε σημείο, ξεκινώντας από κάποιες γνωστές εξαρχής τιμές. Η συμφωνία φάσης μπορεί να διακριθεί σε χρονική και χωρική.

Δεδομένου ότι οι συμβατικές πηγές φωτός εκπέμπουν ακτινοβολία σε όλες τις διευθύνσεις (είναι ισότροπες), η ένταση της ακτινοβολίας σε κάποιο σημείο του χώρου μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης αυτού του σημείου από την πηγή. Στην περίπτωση των laser, λόγω των ιδιοτήτων του αντηχείου, η εκπομπή του φωτός πραγματοποιείται μόνο παράλληλα και πολύ κοντά στον οπτικό άξονα της κοιλότητας.

Η κατανομή της ενέργειας σε μία διατομή μιας δέσμης laser καθορίζει την ενεργειακή της κατανομή. Η μορφολογία της ενεργειακής κατανομής καθορίζεται από τη διαμόρφωση του αντηχείου (μορφολογία των κατόπτρων, διάμετρος του σωλήνα, άνοιγμα). Διαφορετικές μορφολογίες είναι εφικτές κάτω από την ονομασία TEM_{xy} (Transverse Electromagnetic Mode) (Εγκάρσιος Ηλεκτρομαγνητικός Ρυθμός). Οι δείκτες x και y είναι και οι δύο θετικοί ακέραιοι, και εκφράζουν τις κατανομές έντασης κατά μήκος των δύο αξόνων x και y κάθετων στην διεύθυνση του άξονα z (όπου z ο άξονας της δέσμης). Αυτοί οι δείκτες εκφράζουν τους εγκάρσιους ρυθμούς ταλάντωσης του laser. Όσον αφορά το laser CO₂, για χαμηλή ισχύ ο τρόπος ταλάντωσης είναι συνήθως ο TEM₀₀ που εκφράζει μία γκαουσιανή κατανομή ενέργειας. Εφόσον η ισχύς αυξηθεί, οι ενεργειακές κατανομές γίνονται πιο σύνθετες και ενδέχεται να εμφανίζουν χρονικές μεταβολές.

Η ένταση της δέσμης laser μπορεί να είναι πολύ υψηλή, καθώς η αποδιδόμενη ενέργεια είναι εστιασμένη σε μια πολύ μικρή επιφάνεια. Η λειτουργία ενός laser μπορεί να είναι συνεχής ή παλμική. Για την παλμική λειτουργία, η ενέργεια αποδίδεται σε έναν παλμό ή σε μια σειρά επαναλαμβανόμενων παλμών. Με δεδομένο ότι η διάρκεια ενός παλμού μπορεί να είναι της τάξης των 10⁻⁹ sec, η ισχύς είναι πάρα πολύ μεγάλη (1MW), ακόμη κι αν η συνολική αποδιδόμενη ενέργεια είναι πολύ χαμηλή (10⁻³J).

2.1 Είδη Δέσμης Laser.

Τα είδη laser που χρησιμοποιούνται περισσότερο στη βιομηχανία είναι το Nd:YAG Laser το CO₂ Laser και το Excimer Laser. Τα δύο πρώτα είναι και τα πιο ευρέως διαδεδομένα. Λαμβάνουν ηλεκτρική ενέργεια και μετατρέπουν ένα μέρος της σε υψηλού βαθμού συγκεντρωμένη ενέργεια. Το CO₂ Laser είναι ικανό να παράγει υψηλότερη συνεχή ενέργεια από το Nd:YAG Laser και το κόστος ανά Watt είναι 50% μικρότερο σε σχέση με αυτό του Nd:YAG Laser. Όμως με το μικρό μήκος κύματος εκπομπής του Nd:YAG Laser που είναι στα 1,06μm μπορούμε να επιτύχουμε ινο-οπτική μεταφορά ενέργειας από την ακτίνα στην προς κατεργασία επιφάνεια, κάτι που είναι αδύνατον να επιτευχθεί με το CO₂ Laser του οποίου το μήκος κύματος εκπομπής κυμαίνεται στα 10,6μm. Τα βασικά χαρακτηριστικά όσον αφορά το μήκος κύματος, το ενεργό μέσο, τον τρόπο λειτουργίας και τη μέση ισχύ για τα τρία είδη laser συνοψίζονται ως εξής στον πίνακα 2.1:

	CO ₂	Nd:YAG	EXCIMER
Μήκος Κύματος (μm)	10,6 (μακρινό υπέρυθρο)	1.06 (κοντινό υπέρυθρο)	0,193-0,351 (κοντινό υπεριώδες)
Ενεργό Μέσο	Αέριο: CO ₂	Στερεό: Nd:YAG	Αέριο: διμερή
Τρόπος Λειτουργίας	Συνεχής (Παλμικός)	Παλμικός (Συνεχής)	Παλμικός
Μέση Ισχύς(W)	100-25000	10-5000	30-1000

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά των κυριότερων Laser υψηλής ισχύος.

2.1.1 CO₂ Laser

Το μήκος κύματος εκπομπής των laser CO₂ είναι 10.6 μm βρίσκεται δηλαδή στην περιοχή του μακρινού υπέρυθρου. Το laser CO₂ μπορεί να αποδώσει μία δέσμη ισχύος μερικών Watt έως 25 kW και ακόμα μεγαλύτερη. Η δέσμη εστιάζεται στην επιφάνεια με μικρή εστιακή απόσταση και διάμετρο περίπου στα 100 μm και η μέγιστη ένταση δέσμης στην επιφάνεια πλησιάζει τα 10 MW/cm². Αποτελεί το πιο διαδεδομένο laser στη βιομηχανία. Επιπλέον, αποδίδει περισσότερη ενέργεια από άλλα είδη laser (15% επιπλέον), γεγονός που του προσδίδει ένα ακόμα οικονομικό πλεονέκτημα. Το ενεργό μέσο ενός laser είναι ένα μίγμα CO₂ (6% κατ' όγκο), N₂ (12% κατ' όγκο) και He (82% κατ' όγκο). Η απόδοση αυτού του είδους laser μπορεί να βελτιωθεί με την κατάλληλη επιλογή της σύστασης του αέριου μίγματος. Όπως συμβαίνει στα περισσότερα laser αερίων, η άντληση πραγματοποιείται με ηλεκτρική εκκένωση. Αυτή η εκκένωση διεγείρει τα μόρια του N₂, που θα μεταφέρουν την ενέργειά τους στα άτομα του CO₂.

Αυτό το είδος laser μπορεί επίσης να λειτουργήσει παλμικά (διακόπτοντας τη δέσμη, ή δημιουργώντας παλμούς από εκκένωση (superpulse mode) διανέμοντας τη διαθέσιμη ενέργεια με μια συχνότητα της τάξης του 1kHz. Η δέσμη ρυθμίζεται με τη χρήση ενός μηχανικού περιστροφέα (mechanical chopper) ο οποίος περιστρέφεται σε υψηλή συχνότητα περίπου 25-45 kHz και παράγει παλμούς διάρκειας των 10-50 μs.

Όταν ο εστιάζοντας φακός (focusing lens) και ο περιστροφέας (mechanical chopper) κινούνται παραπλεύρως στον περιστρεφόμενο κύλινδρο (rotating roll) ενώ η δέσμη είναι στάσιμη, υπάρχει το μειονέκτημα ότι η οπτική διαδρομή από την κοιλότητα παραγωγής δέσμης (laser output) στον εστιάζοντα φακό (focusing lens) δεν παρέχει ακριβής εστίαση. Στα μεταγενέστερα συστήματα η δέσμη μαζί με το σύστημα εστίασης και τον περιστροφέα είναι μετατοπισμένα παράλληλα ως προς τη περιστρεφόμενη επιφάνεια. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με τον μηχανισμό κίνησης

δέσμης (laser system motion), είτε με περιστροφική αξονική μετατόπιση (rotating roll axial displacement).

Στα αρχικά συστήματα μέρος της ενέργειας ήταν διαθέσιμο εξαιτίας της απορρόφησης και της αντανάκλασης της επιφάνειας του ρυθμισμένου περιστροφέα (modulating chopper surface). Ο τωρινός σχεδιασμός της λεπίδας του περιστροφέα (chopper blade) είναι τέτοιος ώστε όταν η απευθείας ακτίνα μπλοκάρεται, η μη εστιασμένη ακτίνα χαμηλότερης έντασης φωτίζει την εκτεθειμένη περιοχή με αποτέλεσμα να έχουμε μια προθέρμανση της επιφάνειας και σε μερικές περιπτώσεις τη δημιουργία ενός οξειδωτικού λεπτού στρώματος το οποίο ευνοεί τη σύζευξη. Όμως, η οξείδωση της επιφάνειας μπορεί να έχει και αρνητικές συνέπειες, όπως τη δημιουργία μικρών εύθραυστων περιφερειών (brittle rims), γεγονός που μειώνει τη διάρκεια ζωής της προκύπτουσας τοπογραφίας της επιφάνειας

2.1.2 Nd:YAG Laser

Το μήκος κύματος εκπομπής των laser Nd:YAG είναι 1.06 μm , δηλαδή το laser αυτό εκπέμπει στο κοντινό υπέρυθρο. Το Νεοδημίο είναι ένα τρισθενές λανθανίδιο και σημαντικό στοιχείο πρόσμιξης τόσο σε κρυστάλλους όσο και σε γυαλιά. Ο γνωστότερος κρυστάλλος στον οποίο γίνεται πρόσμιξη με το ιόν Νεοδημίου Nd^{3+} είναι ο γρανάτης υτρίου αλουμινίου ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) τα αρχικά του οποίου σχηματίζουν το συνθετικό YAG (Yttrium Aluminim Garnet). Τα άτομα του Νεοδημίου αντικαθιστούν μερικώς τα άτομα του Υτρίου στο συνθετικό YAG. Έτσι τα ενεργειακά επίπεδα διευρύνονται ελαφρώς διατηρώντας την κατάσταση πολλαπλής ενέργειας (multiple energy state) που είναι σημαντική για την αναστροφή πληθυσμών. Η ατομική συγκέντρωση του Nd είναι γενικά μεταξύ 0,6 και 1,2%. Η ενεργειακή απόδοση αυτού του laser, που μπορεί να φτάσει το 3%, είναι η υψηλότερη από όλα τα laser στερεάς κατάστασης. Τα laser Nd:YAG μπορούν να λειτουργήσουν τόσο συνεχώς όσο και παλμικά. Στη συνεχή λειτουργία τα laser Nd:YAG αποδίδουν ισχύ μεταξύ 1 και 20 W στο βασικό TEM₀₀ και από 10-1200 W όταν υπάρχουν εγκάρσιοι ρυθμοί ταλάντωσης.

Στην παλμική λειτουργία τα laser Nd:YAG αποδίδουν:

- Στον Q-switched ρυθμό (μετατρέπόμενου Q) παλμούς πολύ υψηλής ισχύος (της τάξης των GW) των οποίων η χρονική διάρκεια είναι μεταξύ 15 και 700 ns και μέγιστης συχνότητας της τάξης των 20 kHz.
- Σε fixed-Q ρυθμό (σταθερού Q), παλμούς μερικών joules σε συχνότητα που ποικίλει από 1-200 Hz. Η διάρκεια των παλμών είναι μεταξύ 0,1 και 20 ms, συνεπώς η μέση ισχύς είναι της τάξης των 400 W.

Η χρήση του laser Nd:YAG εφαρμόζεται στην κατεργασία σκληρών δίσκων των υπολογιστών [11-14] καθώς και στη μορφοποίηση επιφάνειας (roll surface texturing) [15-17]. Η δεύτερη εφαρμογή παραμένει σε εργαστηριακό επίπεδο και δεν έχει εμπορευματοποιηθεί σε αντίθεση με την πρώτη που είναι συνεχώς αναπτυσσόμενη και εφαρμόζεται κατά κόρον. Η χρήση του laser Nd:YAG έχει το πλεονέκτημα ότι ο παλμός μπορεί να ελέγχεται ηλεκτρονικά. Επομένως οι προκαθορισμένες εσοχές μορφής κρατήρα μπορούν εύκολα να επιτευχθούν στην υπό κατεργασία επιφάνεια.

Λόγω του μικρού μήκους κύματος, η δέσμη μπορεί να εστιάσει σε σημεία μικρού μεγέθους, συγκριτικά με το CO₂ LASER. Συνεπώς, η μέγιστη ένταση της δέσμης ανά επιφάνεια μπορεί να φτάσει τα 100 MW/cm². Η απαιτούμενη ένταση δέσμης τόσο για την κατεργασία σκληρών δίσκων όσο και για τη μορφοποίηση επιφάνειας κυμαίνεται μεταξύ 1-20 MW/cm². Έτσι, είναι δυνατόν να επιτευχθεί η εφαρμογή παλμών συχνότητας 20 kHz και ο χρόνος μεταξύ των παλμών να είναι της τάξης των 100 ns. Μέγιστη ένταση δέσμης παραπλήσια με αυτήν, στη περίπτωση του CO₂ Laser,

μπορεί να επιτευχθεί στη ζώνη αλληλεπίδρασης. Όμως, η υψηλή απορροφητικότητα της επιφάνειας για το μήκος κύματος εκπομπής των 1.06 μm , μπορεί να καταστήσει δυνατό τον επιθυμητό σχηματισμό εσοχών μορφής κρατήρα μετά από εφαρμογή τεσσάρων παλμών laser και συνολικό χρόνο αλληλεπίδρασης 0.1-0.7 ms, ο οποίος είναι σημαντικά μικρότερος από τον αντίστοιχο χρόνο με εφαρμογή δέσμης CO₂ LASER.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της χρήσης Nd:YAG Laser στον Q-switched ρυθμό είναι ότι η αντανάκλαση της δέσμης laser μέσα στην κοιλότητα του laser είναι δυνατόν να επιφέρει μια αδιάκοπη δημιουργία κυματισμών (wave generation), η οποία οδηγεί στην συνεχή τήξη της επιφάνειας κατά την εφαρμογή της δέσμης. Για να αποφευχθεί η αντανάκλαση μέσα στην κοιλότητα του laser, η δέσμη πρέπει να εστιάζεται πάνω στην επιφάνεια με γωνία μη ορθή. Υψηλή ένταση δέσμης και μικρή διάρκεια παλμού μπορεί να οδηγήσει σε εξάτμιση και αποκόλληση υλικού. Υπό συνθήκες υψηλής έντασης δέσμης είναι δυνατή η κοπή κατά αυλακώσεις (Groove cutting). Αυτός ο τύπος της τροποποίησης της τραχύτητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν απαιτείται η επιφάνεια να είναι πιο γυαλιστερή χωρίς να ενδιαφέρει τόσο η ικανότητα κατακράτησης λιπαντικών (lubricant retention), όσο και η κατευθυντικότητα (directionality).

2.1.3 Excimer Laser

Τα Excimer Laser που αρχικά είχαν καθαρά βιομηχανική ερευνητική κατεύθυνση έχουν αρχίσει σιγά σιγά να εισχωρούν στον τομέα των βιομηχανικών εφαρμογών. Χρησιμοποιείται όταν απαιτείται βελτίωση των ιδιοτήτων συγκόλλησης (adhesion properties) [18] ή της απορροφητικότητας της επιφάνειας (surface absorptivity) [19]. Η λέξη excimer είναι το ακρωνύμιο του excited dimers (διηγευμένα διμερή), επειδή ως ενεργό μέσο στο οπτικό αντηχείο του laser χρησιμοποιείται ένα μίγμα ενός ευγενούς αερίου και ενός αλογόνου, ηλεκτρονικά διεγερμένων. Αυτά τα διατομικά μόρια, που στη θεμελιώδη ηλεκτρονική στάθμη δεν υφίστανται (ή οι δεσμοί είναι πολύ ασθενείς), σχηματίζονται όταν διεγερθούν με ηλεκτρική εκκένωση (προϊονισμού ή UV). Ο χρόνος ζωής του διεγερμένου μορίου δεν είναι μεγαλύτερος από 10ns. Μετά την αποδιέγερση, τα μόρια του excimer διασπώνται αμέσως. Τα μήκη κύματος εκπομπής στο υπεριώδες, που καθορίζονται από τη σύνθεση του αερίου μίγματος είναι: XeCl: 308 nm, XeF: 351nm, KrF: 248nm, ArF: 193nm.

Τα excimer laser λειτουργούν μόνο παλμικά. Η εξέλιξη της μέσης ισχύος τα τελευταία χρόνια είναι πολύ γρήγορη. Τα κύρια χαρακτηριστικά μίας εμπορικής πηγής αυτού του τύπου laser είναι:

Ενέργεια ανά παλμό: 0.1-4J

Μέση ισχύς: 30-750W

Συχνότητα παλμών: 20-500Hz

Διάρκεια παλμού: 10-50ns

Επειδή η ενέργεια του παλμού είναι μικρή το σημείο εφαρμογής της δέσμης πρέπει να είναι μικρό ώστε να μπορεί να διατηρηθεί υψηλή ένταση δέσμης. Συνεπώς ο ρυθμός ολοκλήρωσης της διεργασίας είναι μικρός με αποτέλεσμα η τεχνική αυτή να είναι χρονοβόρα, γεγονός που αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα στην εφαρμογή της στη βιομηχανία.

2.2 Αλληλεπίδραση μεταξύ Δέσμης Laser και υλικού

Η αλληλεπίδραση μπορεί να είναι θερμική, φωτοηλεκτρονική ή μηχανική.

2.2.1 Θερμική Αλληλεπίδραση

Στην περίπτωση της χρήσης laser υπέρυθρου (CO₂ και Nd:YAG) και για μέτριες τιμές ισχύος ($<10^4$ W/cm²), τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης είναι ουσιαστικά θερμικά. Η απορρόφηση παίζει πάρα πολύ μεγάλο ρόλο στις επιφανειακές κατεργασίες με laser, καθώς καθορίζει, για δεδομένη ισχύ της δέσμης, τη ροή της θερμότητας που απορροφάται από το αντικείμενο που υπόκειται κατεργασία. Η απορρόφηση είναι συνάρτηση των εξής παραμέτρων:

- Της δέσμης laser
- Του περιβάλλοντος
- Του υλικού

a) Παράμετροι της Δέσμης Laser

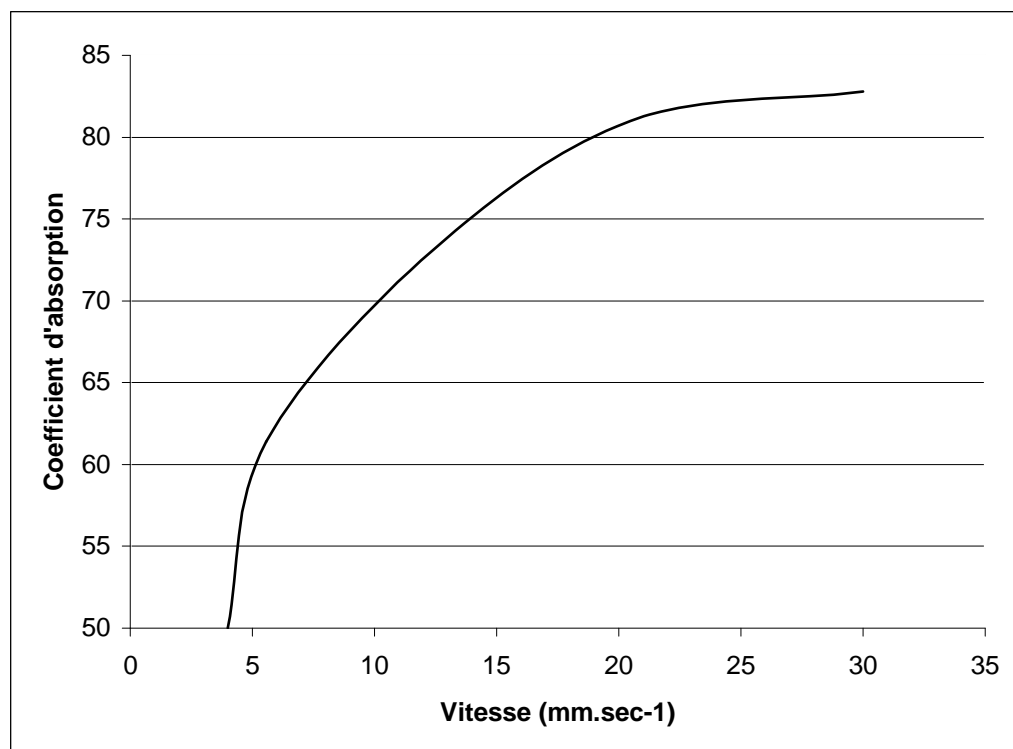
- Οι ενεργειακοί παράγοντες μαζί με την κατανομή ενέργειας, τις διαστάσεις της κηλίδας και την ένταση της δέσμης,
- Το μήκος κύματος
- Η γωνία πρόσπτωσης
- Η ταχύτητα σάρωσης της δέσμης

Ενεργειακοί Παράγοντες: Κάτω από μία κρίσιμη τιμή έντασης, που εξαρτάται από το υλικό και την ατμόσφαιρα, ο συντελεστής απορρόφησης από γυαλισμένες μεταλλικές επιφάνειες βρίσκεται μεταξύ 2 και 20% (κανονική απορρόφηση δέσμης). Για παράδειγμα, στην περίπτωση του χάλυβα, η τιμή του συντελεστή απορρόφησης στους 1900K είναι περίπου 14% στον αέρα. Σε ατμόσφαιρα αερίων όπως άζωτο ή αργό, η κρίσιμη πυκνότητα ισχύος που είναι απαραίτητη για τη δημιουργία πλάσματος (ατμοί του υλικού + ιονισμένο αέριο) είναι της τάξης του 10⁸ W/cm. Εφόσον το πλάσμα βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια, παρατηρούμε ένα συντελεστή περίπου 100% (ανώμαλη απορρόφηση). Αν η πυκνότητα ισχύος είναι μεγαλύτερη, παρατηρούμε μια αποκόλληση του νέφους του πλάσματος και μείωση της απορρόφησης.

Μήκος κύματος του laser: Η απορρόφηση της ενέργειας μιας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ένα μέταλλο είναι συνάρτηση του μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Η απορρόφηση της ενέργειας του laser CO₂ είναι μικρή για τα μέταλλα, αλλά αρκετά μεγάλη για τα κεραμικά (ή υλικά όπως ο σάπφειρος). Για τα περισσότερα μεταλλικά υλικά, η απορρόφηση είναι πολύ μεγάλη για τα μήκη κύματος των excimer laser, της τάξης δηλαδή του 80%, σε σχέση με ένα 5% για το υπέρυθρο.

Γωνία πρόσπτωσης: Η απορρόφηση της ενέργειας μιας δέσμης laser από μια γυαλισμένη μεταλλική επιφάνεια εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης επάνω στη μεταλλική επιφάνεια. Σύμφωνα με το φαινόμενο Brewster για μια συγκεκριμένη γωνία (γωνία Brewster), η απορρόφηση της δέσμης σε διεύθυνση παράλληλη στο επίπεδο πρόσπτωσης είναι μέγιστη, και σε διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο πρόσπτωσης, είναι μηδενική. Κατά τις επιφανειακές κατεργασίες με laser αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Ταχύτητα σάρωσης της δέσμης laser: διαφορετικοί ερευνητές έχουν αποδείξει ότι υπάρχει κάποια σχέση ανάμεσα στις τιμές του συντελεστή απορρόφησης και της ταχύτητας σάρωσης της δέσμης του laser. Η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία εξαρτάται αντιστρόφως ανάλογα από την ταχύτητα σάρωσης.



b) Παράμετροι σχετικές με το περιβάλλον

Ανάλογα με τις διάφορες εφαρμογές, το περιβάλλον πραγματοποίησης των πειραμάτων μπορεί να είναι το κενό, ένα συγκεκριμένο αέριο (π.χ. ένα αέριο προστασίας) ή ο αέρας, υδρατμοί ή ατμοί ενός μετάλλου, κάποιο υγρό όπως το νερό ή κάποιο τηκόμενο μέταλλο, ή ακόμη κι ένα στερεό, και πιο συγκεκριμένα ένα επίστρωμα ή μια προστατευτική ή απορροφητική επίστρωση. Αυτό το μέσο μπορεί να αλληλεπιδράσει με τη θερμοκρασία του, την πίεσή του, τη χημική του δραστηριότητα, την οπτική ή ιοντική του φύση.

c) Παράμετροι σχετικά με τα Υλικά

Κατάσταση της επιφάνειας (τραχύτητα): Η απορρόφηση εξαρτάται από την κατάσταση της επιφάνειας, κυρίως από την τραχύτητα και την παρουσία ακαθαρσιών (οι οποίες γενικά προκαλούνται από φαινόμενα οξείδωσης) οι τιμές του συντελεστή απορρόφησης συναρτήσει της προετοιμασίας της επιφάνειας που πραγματοποιείται για τις επιφανειακές κατεργασίες είναι ως εξής:

Προετοιμασία της Επιφάνειας	Συντελεστής απορρόφησης
Ρεκτιφάρισμα ($Ra=1\mu m$)	0.085
Τόρνευση ή Φρεζάρισμα ($Ra=25\mu m$)	0.18
Αμμοβολή	0.35

Απορροφητικές επιστρώσεις: Ο ρόλος των απορροφητικών επιστρώσεων είναι από τη μία η βελτίωση της απορροφητικότητας της επιφάνειας, και από την άλλη η διασφάλιση της σταθερότητας της σύζευξης ύλης ακτινοβολίας. Αυτές οι εναποθέσεις επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να παρουσιάζουν βέλτιστη απορρόφηση στο μήκος κύματος του χρησιμοποιούμενου laser, και έχουν σε γενικές γραμμές χρώμα μαύρο ή γκριζο. Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες επιστρώσεις όπως μαύρο χρώμα (μπογιά), σκόνη οξειδίων μετάλλων, κολλοειδής γραφίτης, φωσφορικό άλας του ψευδαργύρου και του μαγνησίου. Η αμμοβολή της επιφάνειας που θα υποστεί κατεργασία είναι επίσης μία αποτελεσματική μέθοδος.

Θερμικές ιδιότητες: εφόσον διασφαλιστεί η σύζευξη ακτινοβολίας-επιφάνειας, η μετάδοση της απορροφούμενης θερμότητας ανά μονάδα όγκου εξαρτάται από τα εγγενή χαρακτηριστικά του θεωρούμενου υλικού. (θερμική αγωγιμότητα θερμοχωρητικότητα κλπ.)

Δομή και χημική σύνθεση: μέσα από ένα στερεό, υπάρχουν διάφορες ατέλειες (πλεγματικά κενά, διαταραχές, όρια κόκκων) που μειώνουν την ανακλαστικότητα του υλικού, και επηρεάζουν συνεπώς τη διαδικασία της απορρόφησης με την παρουσία τους και την εξέλιξή τους κατά τη διάρκεια της κατεργασίας με το laser. Επιπλέον, η χημική σύσταση καθορίζει το πλήθος των ηλεκτρονίων σθένους και τις χημικές αντιδράσεις που είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν στην επιφάνεια.

Θερμοκρασία: Ο συντελεστής απορρόφησης ενός μετάλλου μπορεί να ποικίλει σημαντικά ανάλογα με τη θερμοκρασία. Μεταβάλλεται από ένα συντελεστή 2 σε 5 μέσα στη συνηθισμένη περιοχή θερμοκρασιών για τις επιφανειακές κατεργασίες με laser. Ωστόσο, η επίδραση της θερμοκρασίας ποικίλλει ανάλογα με το υλικό, τη φύση της απορροφητικής επίστρωσης και το είδος του laser που χρησιμοποιείται.

Κατά τη χρήση δέσμης laser CO₂ σε στερεά υλικά, η αλληλεπίδραση μεταξύ της δέσμης και της επιφάνειας εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία της επιφάνειας.

Πολλά υλικά αντανάκλουν ένα μεγάλο ποσοστό της ενέργειας που προσπίπτει σε αυτά μέσω της ακτίνας με αποκορύφωμα τον ανοξείδωτο χάλυβα που το ποσοστό πλησιάζει το 95%. Μία ισχυρά εστιασμένη δέσμη μπορεί να αποδώσει φορτίο υψηλής ενέργειας σε μία μικρή περιοχή της επιφάνειας περίπου διαμέτρου 15 χιλιοστών. Με την απόδοση του φορτίου, ακόμα και το μικρό ποσοστό που απορροφάται από την επιφάνεια είναι ικανό να δημιουργήσει μια μικρή συσσώρευση τηγμένου υλικού (melt pool) με πυκνό ατμό από πάνω της (dense vapour), και αυτό διευκολύνει μια έντονη αλληλεπίδραση. Μικρότερης εστίασης δέσμες αλληλεπιδρούν λιγότερο.

Για τα μέταλλα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό γιατί π.χ. ο χαλκός, ο άργυρος και ο χρυσός, δεν μπορούν να κατεργαστούν, και το αλουμίνιο μπορεί δύσκολα. Τα οργανικά υλικά συμπεριφέρονται διαφορετικά. Αν και σαν στερεά έχουν χαμηλό ποσοστό αντανάκλασης, κάποια σύνθετα (composites) απαιτούν όχι μόνο υψηλή ένταση δέσμης, αλλά και άλλες συμπληρωματικές διεργασίες ώστε να κοπούν αποτελεσματικά. Επομένως, υψηλής έντασης δέσμη χρησιμοποιείται για κοπή και συγκόλληση, και χαμηλής έντασης για θέρμανση. Όταν λέμε υψηλής έντασης δέσμη εννοούμε τιμές μεγαλύτερες από 10⁶W/cm² και για χαμηλής έντασης δέσμη μεταξύ 10² W/cm² και 10⁴ W/cm². Επειδή το μικρό σημείο εστίασης είναι απαραίτητο για τις διεργασίες που αφορούν την τήξη, ιδιαίτερη σημασία δίνεται στους φακούς και στους καθρέπτες για την εστίαση της δέσμης.

2.2.2 Φωτοηλεκτρονική Αλληλεπίδραση.

Η ενέργεια ενός φωτονίου στα 248nm (Laser KrF) είναι 40 φορές μεγαλύτερη από αυτήν ενός φωτονίου laser CO₂ (10600 nm) και 4 φορές μεγαλύτερη από αυτήν ενός φωτονίου laser Nd:YAG. Αυτό ευνοεί έναν πιο άμεσο μηχανισμό αλληλεπίδρασης ύλης-ακτινοβολίας στο UV από ότι στο IR. Τα laser που εκπέμπουν στο IR χαρακτηρίζονται από μία αλληλεπίδραση με το υλικό πρωταρχικά θερμική, όπου συμβαίνει μια θέρμανση του υλικού τόσο σε βάθος όσο και πλευρικά, γεγονός που προκαλεί μετασχηματισμό του υλικού με παραμόρφωση. Αντιθέτως, τα φωτόνια υψηλής ενέργειας των excimer laser αλληλεπιδρούν με τα επίπεδα ηλεκτρονικής διέγερσης όλων των τύπων των υλικών, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει έναν άμεσο ιονισμό του υλικού, μία ρήξη των δεσμών ή μια ηλεκτρονική διέγερση, παράλληλα με μία θέρμανση εξαιρετικά ταχεία, και ένα μετασχηματισμό χωρίς παραμόρφωση.

2.2.3 Μηχανική Αλληλεπίδραση

Στις περιπτώσεις της χρήσης παλμικών laser (laser CO₂ και Nd:YAG) και για υψηλές πυκνότητες ισχύος ($>10^8$ W/cm²) και πολύ μικρούς χρόνους αλληλεπίδρασης ($<1\mu$ s) τα κύρια φαινόμενα που προκαλούνται από την αλληλεπίδραση είναι μηχανικά. Σ' αυτόν τον τύπο αλληλεπίδρασης, το κύριο παρεμβαίνον φαινόμενο είναι το πλάσμα που σχηματίζεται από εξάχνωση ενός μέρους της επιφάνειας του ακτινοβολούμενου υλικού, και το οποίο, μετά την εκτόνωσή του, προκαλεί μία δέσμη συμπιεστικών (θλιπτικών) κυμάτων στο εσωτερικό του υλικού, τα οποία μετασχηματίζονται γρήγορα σε ωστικό κύμα, που μπορεί να τροποποιήσει τη μικροδομή και είναι δυνατό να προκαλέσει παραμένουσες τάσεις μέσα στο υλικό.

Κεφάλαιο 3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ LASER.

3.1 Περιγραφή των φυσικών φαινομένων κατά την αλληλεπίδραση μεταξύ δέσμης Laser και υλικού

Η αλληλεπίδραση μεταξύ της εστιασμένης δέσμης laser και της επιφάνειας ενός υλικού συνοδεύεται από τήξη (melting), κίνηση του τήγματος (melting motion), εξάτμιση (evaporation), εξάχνωση (sublimation) και στερεοποίηση (solidification) με αποτέλεσμα να αλλάζει η τοπογραφία της επιφάνειας. Διάφορα σχήματα της ζώνης αλληλεπίδρασης (interaction zone) μπορούν να παραχθούν χάρη στη μεταβολή των παραμέτρων αλληλεπίδρασης, οι οποίες καθορίζουν τη φύση της διεργασίας. Το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σύμφωνα με τη φυσική διεργασία (physical process) που κυριαρχεί κατά την αλληλεπίδραση δέσμης-υλικού. Η διεργασία του υλικού κατά τη χρήση παλμικού laser (pulsed laser material process) μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διάτρηση (drilling), σημειακή συγκόλληση (spot welding), και τήξη της επιφάνειας (surface melting).

Είναι σημαντικό να αντιληφθούμε ότι αυτά τα είδη διεργασιών δεν είναι ανεξάρτητα φαινόμενα. Αντιθέτως, είναι το αποτέλεσμα των ίδιων φυσικών φαινομένων και απλά ανταποκρίνονται στις καταστάσεις ανάλογα με ποιος τύπος φυσικής διεργασίας επικρατεί. Συνεπώς υπάρχει μία γκάμα από παραμέτρους αλληλεπίδρασης οι οποίες ανταποκρίνονται είτε στη διάτρηση, στη συγκόλληση και στην τήξη της επιφάνειας, είτε σε καταστάσεις μετάβασης (transitional regimes). Τόσο η κατάλληλη κατηγοριοποίηση των προϋποθέσεων όταν κάποια διεργασία κυριαρχεί και οδηγεί στη συγκόλληση την κοπή ή τη διάτρηση, όσο και ένα γενικευμένο μοντέλο που αφορά τις διεργασίες μεταξύ laser και υλικού, βρίσκονται προς συνεχή βελτίωση.

Συνήθως ο όρος διάτρηση με laser (laser drilling) χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διαδικασία κατά την οποία έχουμε εκτόξευση υλικού από τη ζώνη αλληλεπίδρασης. Η εκτόξευση υλικού και συνεπώς η δημιουργία κρατήρων καθορίζεται από την ανταγωνιστική πορεία (competing process) μεταξύ της εκτόξευσης τηγμένου υλικού (melt ejection) και της εξάτμισης (evaporation). Η διάτρηση με laser μέσω εξάτμισης (evaporation dominated drilling) απαιτεί είτε υψηλής απορροφητικότητας ένταση δέσμης (high absorbed beam intensity), (πάνω από 10 MW/cm^2 για ακτίνα δέσμης $200\mu\text{m}$) [4] ή για μετρίου επιπέδου ένταση δέσμης, μικρό χρόνο αλληλεπίδρασης. Ο χρόνος αλληλεπίδρασης σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να είναι μικρότερος από μια στάνταρ τιμή η οποία καθορίζεται από την απορροφητικότητα της έντασης της δέσμης και τις διαστάσεις της κηλίδας (spot size) [4]. Σημειωτέον ότι μερικά υλικά δεν παράγουν υγρή φάση (liquid phase) κατά την ακτινοβολία. Σε μία τέτοια περίπτωση η εξάχνωση (sublimation) είναι υπεύθυνη για την αποβολή υλικού από τη ζώνη αλληλεπίδρασης.

Παρατηρήθηκε ότι αν η ένταση της δέσμης laser υπερβεί αυτήν την στάνταρ τιμή, η οποία για μικρού μήκους κύματος απορρόφηση (short absorption length) κυμαίνεται μεταξύ $10\text{-}100\text{W/cm}^2$, η εξάτμιση γίνεται ασταθής [10]. Τότε οι πρώτες χωρικές περιοδικές διαταραχές της τάξης του εκατομμυριοστού αρχίζουν να αναπτύσσονται. Αυτό μπορεί να δικαιολογήσει τη δημιουργία κορυφών (pikes) που έχουν παρατηρηθεί σε επιφάνειες στις οποίες έχει εφαρμοστεί ακτινοβολία μέσω excimer laser [20,21].

Η απόρριψη τηγμένου υλικού από τη ζώνη αλληλεπίδρασης εξαιτίας της βαθμωτής μεταβολής της πίεσης αντίδρασης (gradient of evaporation recoil pressure) [5-7] είναι ο βασικός μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για το σχηματισμό κρατήρων στα μέταλλα όταν η ένταση της απορροφούμενης δέσμης είναι μετρίου επιπέδου ($5\text{-}10 \text{ W/cm}^2$) και ο χρόνος αλληλεπίδρασης είναι μεγάλος [4]. Όταν το ποσό του απορριπτόμενου ή

εξατμιζόμενου υλικού είναι μικρό, ρηχές κοιλότητες (shallow depressions) σχηματίζονται στην επιφάνεια. Αν η ταχύτητα του απορριπτόμενου τήγματος από τη ζώνη αλληλεπίδρασης είναι μικρή και έχει κατεύθυνση κατά μήκος της επιφάνειας, τότε το τηκόμενο υλικό στερεοποιείται γύρω από τους κρατήρες, σχηματίζοντας περιφέρειες από πολύ μικρές ποσότητες υλικού που τους περιβάλλει. Χαμηλή ταχύτητα απορριπτόμενου τήγματος συνεπάγεται ότι η δυναμική πίεση του ρέοντος τήγματος είναι ανεπαρκής να ξεπεράσει την πίεση που δημιουργείται στην άκρη του κρατήρα λόγω της διαβροχής (wetting) και της επιφανειακής τάσης (surface tension), με αποτέλεσμα το τηκόμενο υλικό να μένει στην επιφάνεια μέχρι να στερεοποιηθεί.

Το απορριπτόμενο τήγμα κατευθύνεται κατά μήκος της επιφάνειας εάν το βάθος των κρατήρων είναι αρκετά μικρότερο της ακτίνας τους. Για να επιτευχθεί τέτοια κατάσταση αλληλεπίδρασης η κατανομή της θερμοκρασίας της τηγμένης επιφάνειας στη ζώνη αλληλεπίδρασης πρέπει να είναι ομαλή, ώστε να οδηγήσει στη δημιουργία μίας δισδιάστατης ροής. Παρουσία μικρής κλίμακας χωρικών μεταβολών της θερμοκρασίας της επιφάνειας, η πίεση αντίδρασης (recoil pressure) επίσης αλλάζει σε μικρή κλίμακα. Αυτό επιφέρει τη δημιουργία υψηλής πίεσης αντίδρασης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε τρισδιάστατη εκτόξευση τήγματος (melt ejection) [6-7]. Αυτό θα εμποδίσει τη δημιουργία σημαντικής περιφέρειας τηγμένου υλικού γύρω από τον κρατήρα.

Αν το τήγμα το οποίο είναι διάσπαρτο υπό μορφή σταγονιδίων (spattered melt) γύρω από τον κρατήρα περιέχει ικανή θερμότητα ώστε να τήξει το δείγμα της επιφάνειας από κάτω του, και ο χρόνος αλληλεπίδρασης μεταξύ απορριπτόμενου τήγματος και υποστρώματος είναι αρκετά μεγάλος, τότε μπορεί να επιτευχθεί ισχυρή σύνδεση στην περιφέρεια της επιφάνειας. Όμως, ακόμα και υπό αυτές τις συνθήκες δεν θα επιτευχθεί αυτός ο δεσμός εάν η επιφάνεια δεν είναι πλήρως καθαρή. Για παράδειγμα, εάν υπάρχει ένα λεπτό στρώμα από λάδι στην επιφάνεια, τότε ένα μέρος της ενθαλπίας του απορριπτόμενου τήγματος αναλώνεται στην εξάτμιση αυτού του στρώματος και δημιουργείται ανάμεσα στο τηκόμενο υλικό και το υπόστρωμα μία στρώση από το εξατμιζόμενο λάδι η οποία εμποδίζει την καλή πρόσφυση μεταξύ του τήγματος και της στερεάς επιφάνειας.

Επίσης, η παρουσία οξειδωμένης επιφάνειας μπορεί να οδηγήσει σε ασταθή προσκόλληση του απορριπτόμενου τήγματος με το υπόστρωμα, μιας και η θερμοκρασία τήξης ενός λεπτού στρώματος οξειδίου είναι συνήθως υψηλή.

Για χαμηλής έντασης δέσμη laser ($1-5 \text{ MW/cm}^2$), η βαθμωτή μεταβολή της πίεσης αντίδρασης (gradient of recoil pressure) είναι μικρή για να δημιουργήσει ροή τήγματος με αρκετά υψηλή ταχύτητα επειδή η δυναμική πίεση του ρέοντος τήγματος είναι μικρότερη από την επιφανειακή τάση στην άκρη της κοιλότητας με το τήγμα. Αν οι παράμετροι αλληλεπίδρασης είναι κατάλληλοι ώστε το τηγμένο υλικό να επιστρέψει στην αρχική του θέση μετά την έκθεση στο παλμικό laser και πριν τη στερεοποίηση, τότε αυτή η κατάσταση αλληλεπίδρασης ανταποκρίνεται στη σημειακή συγκόλληση.

Ωστόσο, αν η μετατόπιση του τήγματος είναι υψηλή και η διάρκεια ζωής του τήγματος πριν τη στερεοποίησή του είναι μικρή, τότε η επιφανειακή τάση δεν μπορεί να επαναφέρει το τήγμα στην αρχική του θέση. Αυτή η κατάσταση συμβαίνει κατά τη μετάβαση μεταξύ συγκόλλησης (welding) και διάτρησης (drilling) και αντιστοιχεί στην τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας χωρίς την παρουσία διάσπαρτου τήγματος υπό μορφή σταγονιδίων γύρω από τη ζώνη αλληλεπίδρασης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτήν την κατάσταση σχηματίζεται μία περιφέρεια από στερεοποιημένο τήγμα παρόμοια με την περίπτωση του διάσπαρτου τήγματος υπό μορφή σταγονιδίων που αναφέραμε παραπάνω. Η διαφορά είναι ότι η στερεοποιημένη περιφέρεια του τήγματος παραμένει μέσα στην κοιλότητα που έχει δημιουργηθεί.

3.2 Υδροδυναμικός Μηχανισμός Δημιουργίας Κοιλοτήτων (Depression Formation)

Μετά την έκθεση μίας επιφάνειας σε δέσμη παλμικού laser η θερμοκρασία της αυξάνεται λόγω της απορρόφησης της ενέργειας που μεταφέρει η δέσμη. Για ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκος κύματος από 10μm έως 0.3μm, το μήκος απορρόφησης στα μέταλλα είναι της τάξης των 10^{-7} m. Η τιμή αυτή είναι πολύ μικρή συγκριτικά με τα χαρακτηριστικά μήκη διεργασίας, επομένως μπορεί να υποτεθεί ότι η ενέργεια της δέσμης laser που απορροφάται από τη μεταλλική επιφάνεια εναποτίθεται σε μία απείρως λεπτή στρώση. Το πεδίο της θερμοκρασίας μπορεί να περιγραφεί με την κλασική εξίσωση αγωγής θερμότητας με μηδενική κατ' όγκο εναπόθεση ενέργειας.

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k\nabla T) \quad (1)$$

όπου, ρ , c , και k είναι η πυκνότητα, η ειδική θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα αντίστοιχα, T η θερμοκρασία και t ο χρόνος. Υποθέτοντας ότι οι άξονες συντεταγμένων X, Y συμπίπτουν με τη μεταλλική επιφάνεια και ο άξονας Z έχει διεύθυνση προς το εσωτερικό του δείγματος, οι οριακές συνθήκες για την εξίσωση (1) μπορούν να γραφούν ως ακολούθως:

$$T=T_0=\text{constant for } z \rightarrow \infty \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = AI_{laser} \text{ for } z=0 \quad (3)$$

Όπου T_0 είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, A είναι η απορροφητικότητα της επιφάνειας (η οποία γενικά εξαρτάται από τη θερμοκρασία) και I_{laser} είναι η ένταση της δέσμης laser.

Η λύση της εξίσωσης (1) για μονοδιάστατη περίπτωση δεν είναι μόνιμη αφού τόσο η θερμοκρασία της επιφάνειας όσο και το πάχος της λεπτής στρώσης θερμότητας αυξάνουν ανάλογα με το \sqrt{at} όπου a η θερμική διαχυτότητα (heat diffusivity). Μία μονοδιάστατη προσέγγιση είναι βάσιμη όταν το πάχος της λεπτής στρώσης θερμότητας είναι αρκετά μικρότερο από την ακτίνα της δέσμης r_1 στην επιφάνεια. Επομένως, αν ο χρόνος αλληλεπίδρασης υπερβεί την τιμή r_1^2/a , το πεδίο της θερμοκρασίας γίνεται δισδιάστατο ή τρισδιάστατο. Σε αντίθεση με τη μονοδιάστατη περίπτωση, η πολυδιαστατική λύση μπορεί να είναι μόνιμη. Αν η ένταση της δέσμης είναι αρκετά υψηλή, η αυξανόμενη θερμοκρασία της επιφάνειας μπορεί να υπερβεί το σημείο τήξης. Τότε, σχηματίζεται στην επιφάνεια τήγμα.

Το μέτωπο ανάμεσα στην υγρή και την στερεή φάση διαδίδεται μέσα στο υλικό καθώς η θερμότητα κατευθύνεται από την επιφάνεια στην κύρια μάζα του υλικού και η θερμοκρασία της επιφάνειας αυξάνει μέχρι η θερμική αγωγιμότητα και η θερμότητα της τήξης και της εξάτμισης να ισορροπήσουν την απόθεση ενέργειας στην επιφάνεια. Το πρόβλημα με την συνύπαρξη των δύο φάσεων και τα κινούμενα σύνορα ανάμεσά τους αναφέρεται ως 'Πρόβλημα του Stephan'.

Ο απλούστερος τρόπος να προσδιορίσουμε τη μετάδοση του μετώπου του τήγματος είναι να αμελήσουμε τη λανθάνουσα θερμότητα της τήξης και να υποθέσουμε ότι το μέτωπο του τήγματος κινείται ακολουθώντας την ισόθερμη καμπύλη της θερμοκρασίας τήξης. Μία πιο ακριβής προσέγγιση παρουσιάζεται στις παρακάτω εξισώσεις εισάγοντας τις οριακές συνθήκες στην επιφάνεια διαχωρισμού $z=Z_m$.

$$T_{s,z=Z_m} = T_{l,z=Z_m} = T_m \quad (4)$$

$$-k_l \frac{\partial T_l}{\partial z} + k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = V_m \rho L_m \quad (5)$$

Όπου οι δείκτες l και s υποδηλώνουν την υγρή και τη στερεή φάση αντίστοιχα, T_m είναι η θερμοκρασία τήξης, L_m είναι η λανθάνουσα θερμότητα της τήξης και V_m είναι η ταχύτητα του μετώπου τήξης. Η λύση που ανταποκρίνεται στις οριακές συνθήκες (4) και (5) και για σταθερή θερμοκρασία στην επιφάνεια $z=0$ και $T_{z=0} = T_{sf} > T_m$ είναι γνωστή ως "Λύση του Newman". Η λύση αυτή οδηγεί σε ένα μη φυσικό αποτέλεσμα, ότι το μέτωπο της ταχύτητας γίνεται άπειρο $V_m \rightarrow \infty$ σε πεπερασμένη υπερθέρμανση (finite superheating). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κινητική της τήξης αγνοείται και η φάση μετάβασης υποθέτεται ότι είναι στιγμιαία. Μία πιο ακριβής προσέγγιση, η οποία λαμβάνει υπόψη την κινητική της τήξης εμφανίζεται στην παρακάτω εξίσωση για την ταχύτητα του μετώπου του τήγματος [30].

$$V_m = V_n [c(T - T_m) / L_m + (cT_m \sigma / \rho L_m^2)(1/R_1 + 1/R_2)] \quad (6)$$

όπου, V_n είναι μία εμπειρική σταθερά κοντά στην ταχύτητα του ήχου, σ είναι η επιφανειακή τάση στα σύνορα στερεού-υγρού, και R_1 και R_2 είναι οι αρχικές ακτίνες καμπυλότητας στη συνοριακή φάση, T_m είναι η θερμοκρασία τήξης, και T_a είναι η θερμοκρασία του στερεού στο όριο του μετώπου τήξης, η οποία σε αυτή την προσέγγιση είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης.

Η τήξη που επιφέρει η χρήση laser τυπικά συνοδεύεται με σημαντική εξαέρωση (substantial vaporization), επειδή ο ρυθμός εξάτμισης (evaporation rate) εξαρτάται από τη θερμοκρασία και είναι δύσκολο να έχουμε παραμέτρους αλληλεπίδρασης εντός εμβέλειας δράσης όταν η θερμοκρασία τήξης της επιφάνειας είναι κοντά στο σημείο τήξης χωρίς περαιτέρω ραγδαία αύξησή της. Υποδείχθηκε από τον A.I. Shal'nikov [10] ότι ο βαθμός που οι παράγοντες αλληλεπίδρασης ανταποκρίνονται σε μικρή εξάτμιση, εξαρτάται από την πίεση κορεσμού του ατμού (saturation vapor pressure), η οποία ποικίλει για διαφορετικά υλικά.

Για παράδειγμα, η πίεση κεκορεσμένου ατμού (saturated vapor pressure) στο σημείο τήξης είναι κοντά στο 1Pa για τα Fe, Ni και Ti [22] και αυξάνεται ραγδαία με αύξηση της θερμοκρασίας. Επομένως, η εξάτμιση πρέπει να ληφθεί υπόψη ταυτόχρονα με την τήξη. Το να ληφθεί υπόψη η εξάτμιση είναι ακόμα πιο σημαντικό για κατεργασίες κραμάτων, τα οποία συχνά περιέχουν πτητικά στοιχεία με υψηλή πίεση κεκορεσμένου ατμού. Το να συμπεριλάβουμε την εξάτμιση σε ένα μοντέλο αλληλεπίδρασης της επιφάνειας και του laser είναι ιδιαίτερα σημαντικό για δύο λόγους:

Πρώτον, η κατανάλωση της ισχύος της απορροφούμενης δέσμης laser (expenditure of absorbed laser intensity) κατά την εξάτμιση αυξάνεται όσο η θερμοκρασία τήξης της επιφάνειας γίνεται υψηλότερη και συνεπώς, αυξάνεται η αναλογία εξάτμισης.

Επομένως η οριακή συνθήκη (3) πρέπει να συμπληρωθεί με τον όρο που αφορά την εξάτμιση. Συνεπώς, η νέα οριακή συνθήκη θα είναι της μορφής:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} + \rho V_v L_v = A I_{laser} \quad (7)$$

όπου V_v είναι η ταχύτητα του μετώπου εξάτμισης και L_v είναι η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης. Όμως, για όχι ιδιαίτερα υψηλή ισχύ της απορροφούμενης δέσμης η κατανάλωση για την εξάτμιση δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή. Επομένως, για μία δέσμη laser ακτίνας 190μm η απώλεια της εξάτμισης υπερβαίνει το 10% αν η πυκνότητα ισχύος της απορροφούμενης δέσμης είναι υψηλότερη από 3 MW/cm² για το Σίδηρο και 6 MW/cm² για το Αλουμίνιο [4]. Αυτό το αρχικό ποσοστό του 10% αυξάνεται όσο η ακτίνα της δέσμης μειώνεται.

Επομένως, για μικρότερης ακτίνας δέσμη απαιτείται υψηλότερης ισχύος δέσμη για να έχουμε αξιοσημείωτες απώλειες εξάτμισης σε σχέση με την απορροφούμενη [4]. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης δείχνουν ότι για τις εντάσεις που ανταποκρίνονται σε χαμηλές απώλειες εξάτμισης, η μεταφορά του σχετικού όρου στην εξίσωση της ενεργειακής ισορροπίας είναι καθοριστική [4]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η

βαθμωτή μεταβολή της πίεσης αντίδρασης επιφέρει υψηλή ταχύτητα ρέοντος τήγματος που δρα στην εξατμιζόμενη υγρή επιφάνεια [3-7]. Ανάλογα με τη θερμοκρασία της επιφάνειας, το μέγεθος της πίεσης αντίδρασης της εξάτμισης κυμαίνεται μεταξύ 10-100atm.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για μερικά υλικά η πίεση κεκορεσμένου ατμού είναι είδη αξιοσημείωτη σε θερμοκρασίες κοντά στο σημείο τήξης.

Επομένως, ο δεύτερος λόγος για τον οποίο η εξάτμιση πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο για όλες τις θερμοκρασίες (ακόμα και κοντά στο σημείο τήξης) έγκειται στο γεγονός ότι η βαθμωτή μεταβολή της πίεσης αντίδρασης επιφέρει τη ροή του τήγματος. Πρέπει εδώ να τονίσουμε ότι η πίεση αντίδρασης συμπεριλαμβανόταν στα υδροδυναμικά μοντέλα της διάτρησης με laser [5-7]. Εκτός από τις αναφορές [3,4], αγνοήθηκε από τα υπόλοιπα μοντέλα της συγκόλλησης, της κοπής και της τροποποίησης της τραχύτητας.

Πρόσφατα αποτελέσματα έδειξαν ότι η δημιουργία ενός επαρκούς μοντέλου αλληλεπίδρασης δέσμης-υλικού για μετρίου μεγέθους εντάσεις είναι αδύνατον να γίνει χωρίς να ληφθεί υπόψη η πίεση αντίδρασης. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι η βαθμωτή μεταβολή της πίεσης αντίδρασης σχετίζεται με την αλλαγή της θερμοκρασίας της επιφάνειας τήξης, η οποία είναι υψηλότερη κατά τον άξονα της δέσμης όπου και η ένταση είναι μέγιστη.

Παρομοίως, η επιφανειακή τάση, εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία, έχει μία βαθμωτή μεταβολή η οποία μπορεί να προκαλέσει τη ροή του τήγματος. Η μεταφορά θερμότητας οδηγούμενη από τη βαθμωτή μεταβολή της επιφανειακής τάσης μελετήθηκε εκτενώς σε μοντέλα συγκόλλησης. Όμως θα αγνοήσουμε αυτήν την επίδραση εκτιμώντας ότι η διατμητική τάση δεν μπορεί να υπερβεί 10^3-10^4 N/m^2 . Πράγματι,

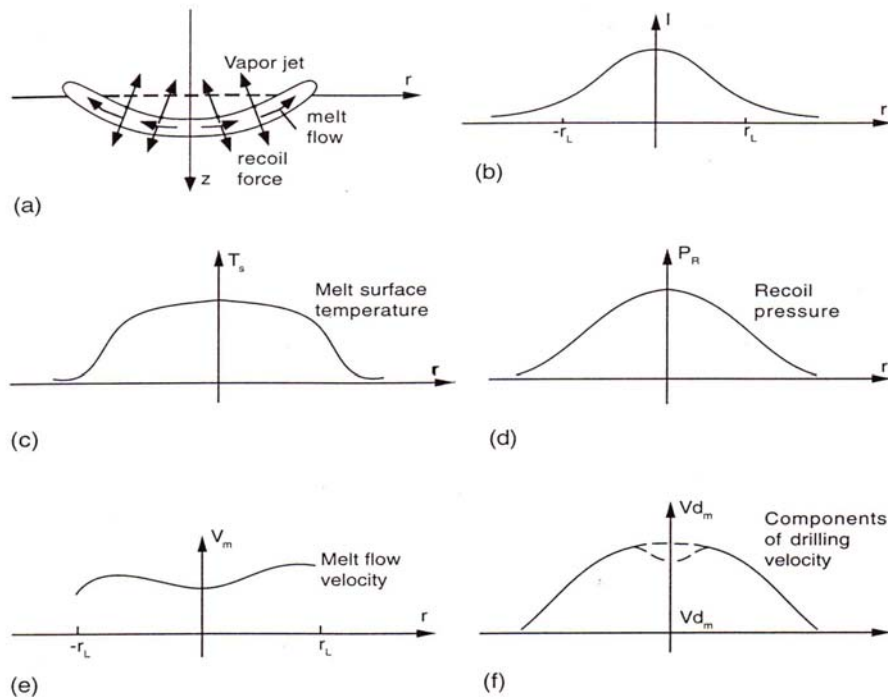
$$\xi = \frac{\partial \sigma}{\partial r} = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r} \sim 10^3 - 10^4 \text{ N/m}^2 \text{ όπου}$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial T} \sim 10^{-4} \text{ N/mK} \text{ και } \frac{\partial T}{\partial r} \sim 10^7 - 10^8 \text{ K/m}$$

Επομένως, σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν το σημείο τήξης η πίεση αντίδρασης λόγω εξάτμισης παίζει σημαντικό ρόλο. Ακόμα και στην περίπτωση που υπάρχουν στην επιφάνεια μεγάλες θερμοκρασιακές βαθμωτές μεταβολές, η ροή του τήγματος που προκαλείται από το φαινόμενο Marangoni λαμβάνει χώρα σε ένα λεπτό στρώμα κοντά στην επιφάνεια.

Επομένως η κατάσταση κατά την οποία η ροή είναι σημαντική, όταν διέπεται από βαθμωτή μεταβολή της επιφανειακής τάσης και περιορίζεται στην περίπτωση μίας λεπτής στρώσης τήγματος και χαμηλής θερμοκρασίας της επιφάνειας. Ένα παράδειγμα είναι η χαμηλή ένταση δέσμης για ρηχό-επιφανειακό σημείο σημειακής συγκόλλησης [23].

Λαμβάνοντας υπόψη το ρόλο της εξάτμισης στα υδροδυναμικά μοντέλα της τήξης και αγνοώντας τη συναγωγή λόγω βάρθρωσης της επιφανειακής τάσης μπορούμε να φτιάξουμε το επόμενο φυσικό μοντέλο (Σχήμα3.2.1).



Σχήμα 3.2.1 Σχεδιάγραμμα εκτόξευσης τήγματος και δημιουργίας κρατήρων μέσω διάτρησης στη ζώνη αλληλεπίδρασης.

Έστω ότι δέσμη laser εφαρμόζεται σε επιφάνεια και απορροφάται ενέργεια, ώστε η θερμοκρασία της επιφάνειας να υπερβαίνει το σημείο τήξης. Μετά το σχηματισμό του τήγματος, μια ακτινική ροή λαμβάνει χώρα στην υγρή στρώση εξαιτίας της πίεσης αντίδρασης η οποία δημιουργείται από την εξάτμιση της τηγμένης επιφάνειας (Σχήμα 3.2.1a).

Η ταχύτητα της ροής του τήγματος είναι μία λειτουργία της βαθμωτής μεταβολής της πίεσης αντίδρασης. Αφού η ένταση της δέσμης στο εστιακό κέντρο έχει τη μέγιστη τιμή της κατά τον άξονα της δέσμης και μειώνεται όσο η ακτίνα μεγαλώνει (Σχήμα 3.2.1b), η θερμοκρασία της τηγμένης επιφάνειας έχει επίσης μέγιστη τιμή κατά τον άξονα της δέσμης. Λόγω των απωλειών που οφείλονται στην εξάτμιση και τη μεταφορά θερμότητας από την ακτινική ροή του τήγματος, η θερμοκρασία της τηγμένης επιφάνειας είναι ομοιόμορφη στο κεντρικό τμήμα της δέσμης και μειώνεται απότομα προς την περιφέρεια (Σχήμα 3.2.1c). Εφόσον η πίεση αντίδρασης εξαρτάται εκθετικά από τη θερμοκρασία της τηγμένης επιφάνειας, η πίεση αντίδρασης έχει μεγάλη ακτινική βαθμωτή μεταβολή (Σχήμα 3.2.1d) αν και η κατανομή της θερμοκρασίας της τηγμένης επιφάνειας είναι ομαλή. Η μεγάλη βαθμωτή μεταβολή της πίεσης αντίδρασης προκαλεί ροή του τήγματος σε ακτινική διεύθυνση. Η βαθμωτή μεταβολή της πίεσης είναι μέγιστη σε απόσταση από τον άξονα και κατά τον άξονα είναι μικρή.

Επομένως, η κατανομή της ταχύτητας της ροής του τήγματος έχει μέγιστο σε μία απόσταση από την αξονική δέσμη (Σχήμα 3.2.1e). Η εκροή του τήγματος παραπλεύρως και η εξάτμιση από την τηγμένη επιφάνεια έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση του πάχους του τήγματος. Επομένως, η πηγή θερμότητας, η οποία εστιάζεται στην τηγμένη επιφάνεια, κινείται μέσα στο δείγμα του υλικού με αποτέλεσμα το μέτωπο του τήγματος να επεκτείνεται προς την ίδια κατεύθυνση. Μία τέτοια διεργασία καθορίζει το σχήμα των κρατήρων στην τροποποίηση της τραχύτητας με laser.

Ορίζοντας τη συνισταμένη της ταχύτητας διάτρησης V_{dm} , έχουμε την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{dm} = \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) h_m \quad (8)$$

όπου u και v είναι η οριζόντια και η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας της ροής του τήγματος και v_m και h_m είναι το τοπικό πάχος του τήγματος, όπου οι άξονες συμπίπτουν με την τηγμένη επιφάνεια και ο z άξονας έχει διεύθυνση προς το εσωτερικό του δείγματος. Η ακτινική κατανομή των συνιστωσών της ταχύτητας διάτρησης λόγω της εκροής τήγματος V_{dm} μπορεί να έχει ελάχιστο και μέγιστο στον άξονα, ανάλογα με την ακτινική κατανομή της ταχύτητας της ροής τήγματος $v_m(r)$. Η "οξεία" κατανομή της απορροφούμενης έντασης μπορεί να προσφέρει τις συνθήκες εκείνες ώστε η ταχύτητα διάτρησης να είναι μέγιστη στον άξονα. Η τιμή της συνιστώσας της ταχύτητας διάτρησης λόγω εξάτμισης V_{dv} αυξάνεται με την αύξηση της απορροφούμενης έντασης της δέσμης καθώς και με την ακτίνα της δέσμης (Σχήμα 3.2.1f). Η μαθηματική εξίσωση του φυσικού μοντέλου μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:

$$\rho_l c_l \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_l u c_l T) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_l v c_l T) = - \left(\frac{\partial}{\partial x} (-k_l \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (-k_l \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (-k_l \frac{\partial T}{\partial z}) \right) \quad (9)$$

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x} (-k_s \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (-k_s \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (-k_s \frac{\partial T}{\partial z}) \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_r}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_r}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \right) \quad (12)$$

όπου οι δείκτες l, s αναφέρονται στην υγρή και τη στερεή φάση αντίστοιχα, ρ, c, T, k , είναι η πυκνότητα, η ειδική θερμότητα, η θερμοκρασία και η θερμική αγωγιμότητα αντίστοιχα, u και v είναι η οριζόντια και η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας της ροής του τήγματος v_m , σ_{nn} σ_{mm} οι οριζόντιες και κατακόρυφες ιξώδεις τάσεις, p_r η πίεση αντίδρασης της εξάτμισης. Η πίεση αυτή συνδέεται με τη θερμοκρασία της επιφάνειας μέσω της εξίσωσης:

$$p_r = A^* B_0 T_{sf}^{-1/2} \exp(-U / kT_{sf}) \quad (13)$$

όπου A^* είναι ο εξαρτημένος περιβαλλοντικός συντελεστής πίεσης (ambient pressure dependent coefficient), B_0 είναι η σταθερά εξάτμισης και U είναι η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης ανά άτομο. Ο συντελεστής A^* ισούται περίπου με 0,55 για την περίπτωση εξάτμισης σε κενό [24].

Η οριακή συνθήκη στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των φάσεων υγρού/στερεού δίνεται από την εξίσωση:

$$\rho L_m V_m = k_s \frac{\partial T_s}{\partial z_{z=Z_m}} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial z_{z=Z_m}} \quad (14)$$

και η οριακή συνθήκη στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των φάσεων υγρού/ατμού δίνεται από την εξίσωση:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} + \rho V_{dv} L_v = A I_{laser} \quad (15)$$

όπου οι δείκτες l, s αναφέρονται στην υγρή και τη στερεή φάση αντίστοιχα, V_m είναι η ταχύτητα του μετώπου τήξης για $z=Z_m$, V_{dv} είναι η συνιστώσα της ταχύτητας διάτρησης λόγω εξάτμισης. Η ταχύτητα του μετώπου τήξης δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_m = V_n [c_s (T_s - T_m) / L_m + (c_s T_m \sigma / \rho_s L_m^2) (1/R_1 + 1/R_2)] \quad (16)$$

Η συνιστώσα της ταχύτητας διάτρησης λόγω εξάτμισης δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [10]:

$$V_{dv} = V_0 \exp(-U / kT_s) \quad (17)$$

όπου V_0 είναι εμπειρική σταθερά με μέγεθος που πλησιάζει την ταχύτητα του ήχου.

Αυτές οι εξισώσεις πρέπει να συμπληρωθούν με μία εξίσωση που να παρουσιάζει τη συνιστώσα της ταχύτητας διάτρησης που οφείλεται στην απόρριψη τήγματος:

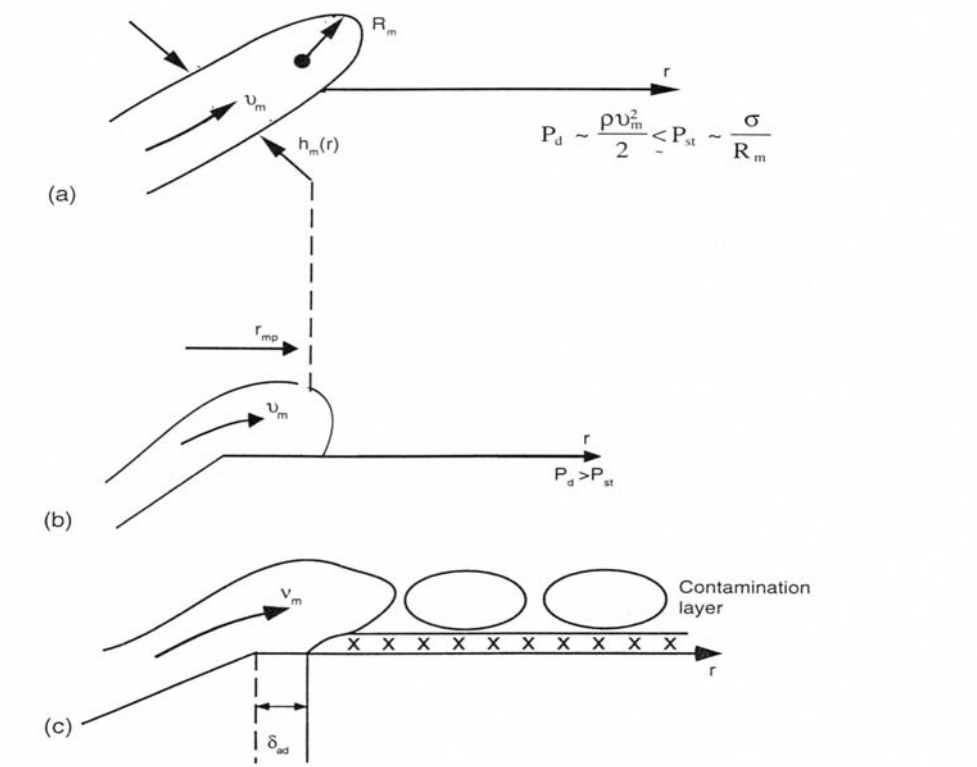
$$V_{dm} = \left(\frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial y} \right) h_m \quad (18)$$

όπου h_m είναι το τοπικό πάχος του τήγματος και το σύμβολο $\langle \dots \rangle$ υποδεικνύει το μέσο όρο κατά τον άξονα z στη στρώση του τήγματος. Επομένως, η τελική εξίσωση για την ταχύτητα διάτρησης ή την ταχύτητα μετώπου ατμού-υγρού είναι ως ακολούθως:

$$V_d = V_{dm} + V_{dv} = \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) h_m + V_0 \exp(-U / kT_s) \quad (19)$$

Στην ουσία η εξίσωση αυτή εκφράζει τη διατήρηση μάζας. Το σύνολο των εξισώσεων (9-12) με τις οριακές συνθήκες (14,15) και τις συμπληρωματικές εξισώσεις (13,16-19) αντιπροσωπεύουν τον πυρήνα της μαθηματικής διατύπωσης του υδροδυναμικού υπομοντέλου απομάκρυνσης του τήγματος από τη ζώνη αλληλεπίδρασης. Αυτό το μοντέλο όπως προαναφέραμε είναι εφαρμόσιμο μόνο όταν η πίεση αντίδρασης παίζει κυρίαρχο ρόλο. Ειδάλλως, αντί για την πίεση αντίδρασης p_r στις εξισώσεις (11,12) πρέπει να συμπεριληφθεί ο σχετικός όρος για την επιφανειακή τάση (surface tension). Για να ελεγχθεί ποιος μηχανισμός κυριαρχεί, πρέπει να υπολογιστεί η θερμοκρασία της τηγμένης επιφάνειας και να συγκριθεί η πίεση κεκορεσμένου ατμού με την καθαρή διατμητική τάση της επιφάνειας .

Θα αναφέρουμε τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο χείλος της ζώνης αλληλεπίδρασης. Ένα σχέδιο της πιθανής δυναμικής της τήξης φαίνεται στο Σχήμα 3.2.2.



Σχήμα 3.2.2 Σχεδιάγραμμα της διεργασίας που λαμβάνει χώρα στην άκρη της κοιλότητας του τήγματος.

Μετά το σχηματισμό της στρώσης του τήγματος, η ροή, με διεύθυνση από το κέντρο της κοιλότητας προς την άκρη, δημιουργείται από τη βαθμωτή μεταβολή της πίεσης αντίδρασης. Η κατανομή της πίεσης αντίδρασης είναι τέτοια (Σχήμα 3.2.1d) ώστε το τήγμα που είναι πιο κοντά στην άκρη της κοιλότητας να έχει ή μικρή ταχύτητα ή να είναι ακινητοποιημένο. Το τήγμα που βρίσκεται κοντά στον άξονα της δέσμης έχει υψηλότερη ταχύτητα και καθώς ρέει προς την άκρη προσκρούει στο αργό ή ακίνητο τήγμα δημιουργώντας μία ρυτίδα-κυμάτωση περιφέρειας από τήγμα (melt rim) (Σχήμα 3.2.2.a). Η επιφανειακή τάση στην άκρη του τήγματος p_{st} αντενεργεί στη δυναμική πίεση p_d του ρέοντος τήγματος. Η ροή επιβραδύνεται και το τήγμα παραμένει μέσα στην περιοχή της ζώνης αλληλεπίδρασης, σχηματίζοντας μία στεφάνη (melt crown), αν

$$p_{st} \approx \frac{\sigma}{R_m} > \rho_m v_m^2 / 2 \approx p_d \quad (20),$$

όπου R_m η ακτίνα της καμπυλότητας της τηγμένης επιφάνειας στο χείλος της κοιλότητας του τήγματος. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι η ακτίνα είναι περίπου ίδιου μεγέθους με το πάχος του τήγματος $R_m \sim h_m$. Όταν το παλμικό laser σταματήσει, η πίεση αντίδρασης μέσα στη ζώνη αλληλεπίδρασης μειώνεται ραγδαία επειδή η θερμοκρασία της τηγμένης επιφάνειας μειώνεται. Τότε, η επιφανειακή τάση παραμένει η μόνη δύναμη που μπορεί να κατευθύνει τη ροή του τήγματος. Εάν η διάρκεια ζωής του τήγματος μετά το τέλος του παλμικού laser t_{ml} είναι μεγαλύτερη από μία ελάχιστη τιμή t^* η οποία καθορίζεται από συγκεκριμένες συνθήκες διεργασίας η επιφανειακή τάση επαναφέρει το τήγμα στην αρχική ή σε παραπλήσια θέση. Η απαίτηση αυτή ($t_{ml} > t^*$) ικανοποιείται στην περίπτωση μακράς διάρκειας (millisecond) παλμικού laser και ανταποκρίνεται στη σημειακή συγκόλληση (spot welding) [25]. Αν η διάρκεια του laser είναι μικρή, το τήγμα στερεοποιείται πριν η επιφανειακή τάση μπορέσει να το επαναφέρει στην αρχική του θέση και μια περιφέρεια-στεφάνη από τήγμα δημιουργείται

στο χείλος της κοιλότητας. Η περίπτωση αυτή ανταποκρίνεται στην τροποποίηση τραχύτητας με laser (laser texturing).

Αν η ταχύτητα του τήγματος είναι υψηλή, τέτοια ώστε η δυναμική πίεση του ρέοντος τήγματος να υπερβεί την επιφανειακή τάση στην άκρη του τήγματος, δηλαδή

$$p_{st} \approx \frac{\sigma}{R_m} < \frac{\rho_m v_m^2}{2} \approx p_d \quad (21),$$

τότε το τήγμα απορρίπτεται έξω από την τηγμένη ζώνη (Σχήμα 3.2.2.b). Εάν η ταχύτητα του τήγματος είναι πολύ υψηλή, τέτοια ώστε $p_{st} \ll p_d$ τότε το τήγμα απομακρύνεται από τη ζώνη αλληλεπίδρασης σχηματίζοντας κρατήρα με καθαρό χείλος (clean edge). Όμως κατά τη διάρκεια του αρχικού σταδίου της βαθιάς ή της επιφανειακής διάτρησης, η ροή του τήγματος κατευθύνεται κατά μήκος της επιφάνειας και μένει σε αυτήν λόγω της διαβροχής. Τότε λαμβάνει χώρα η διασπορά του τήγματος γύρω από το χείλος του κρατήρα (Σχήμα 3.2.2.c).

Με βάση τη θερμική ικανότητα του απορριπτόμενου τήγματος, την ταχύτητα της ροής, τις θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού και τις συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια, το απορριπτόμενο τήγμα μπορεί να τήξει το υπόστρωμα ώστε να δημιουργηθεί καλή πρόσφυση. Συνήθως η πρόσφυση είναι ασθενής. Συνεπώς, η περιφέρεια του διασπαρμένου υλικού μπορεί να αποκολληθεί υπό μηχανική φόρτιση. Αυτό είναι ανεπιθύμητο ειδικά για εφαρμογές όπως τροποποίηση τραχύτητας κυλινδρικών επιφανειών.

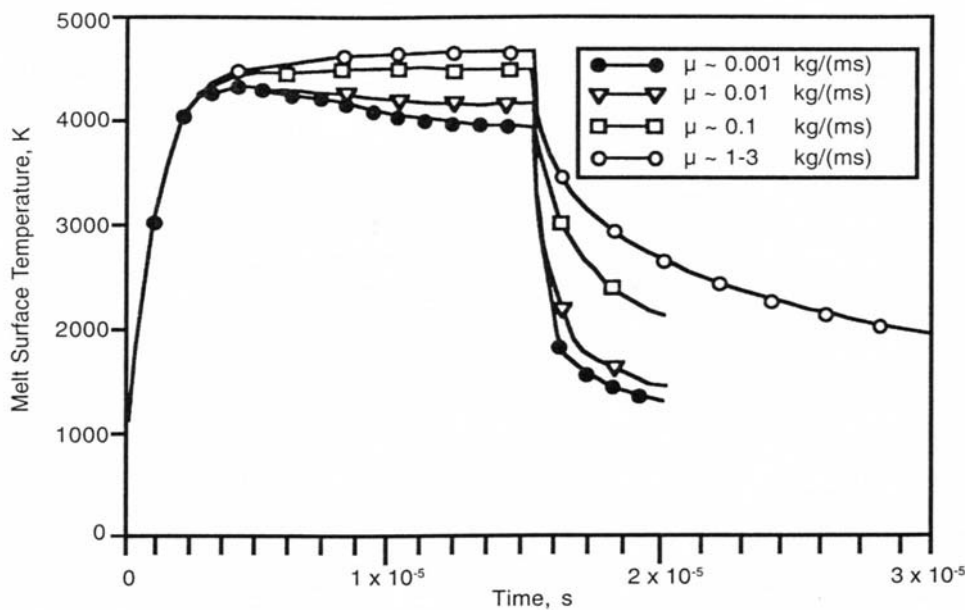
Επομένως, για να αποφευχθεί η ασθενής πρόσφυση του τήγματος πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην ταχύτητα του ρέοντος τήγματος. Προτιμάται να είναι τέτοιοι οι παράγοντες αλληλεπίδρασης ώστε το τήγμα που δημιουργείται από τη δέσμη να παραμένει μέσα στην κοιλότητα. Εάν υπάρχει ένα πολύ λεπτό στρώμα (film) στην επιφάνεια από υλικό όπως λάδι που έχει χαμηλή θερμοκρασία βρασμού, τότε μπορεί να σχηματιστεί μία επικάλυψη ατμού μεταξύ του υποστρώματος και του τήγματος. Σε αυτήν την περίπτωση το τήγμα θα ολισθήσει στο τμήμα ατμού χωρίς να συγκολληθεί με το υπόστρωμα και μόνο κάποιο μέρος του απορριπτόμενου υλικού θα αποτεθεί ως στερεοποιημένο τμήμα στην επιφάνεια εντός μίας απόστασης δ_{ad} η οποία καθορίζεται από το λεπτό στρώμα και τις παραμέτρους τήγματος (Σχήμα 3.2.2.c).

Παρομοίως, ένα πολύ λεπτό στρώμα από οξείδιο το οποίο έχει υψηλή θερμοκρασία τήξης μπορεί να εμποδίσει τη συγκόλληση του απορριπτόμενου τήγματος με το υπόστρωμα.

Τα παραπάνω μοντέλα που περιγράφουν τη διεργασία στο χείλος της ζώνης αλληλεπίδρασης πρέπει να συμπληρωθούν με υπο-μοντέλα τα οποία προσομοιώνουν τη δυναμική του ατμού (vapor gas dynamics), το σχηματισμό πλάσματος (plasma formation) και την αλληλεπίδραση πλάσματος και δέσμης (plasma-beam interaction). Η δυναμική του ατμού (vapor gas dynamics) λαμβάνεται υπόψη στην περίπτωση μονοδιάστατης ροής [10] και για επιφανειακούς κρατήρες και μπορεί να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό του συντελεστή A^* της εξίσωσης (13). Πιο πολύπλοκες περιπτώσεις απαιτούν πολυδιάστατες μελέτες και τέτοιο μοντέλο δεν υπάρχει. Ο σχηματισμός πλάσματος (plasma) και η διάδοση της δέσμης μέσα από αυτό μοντελοποιήθηκε για συνεχή (cw) CO₂ lasers [26], παλμικά (pulsed) CO₂ lasers [27] και excimer lasers [28]. Αυτές οι αναφορές μαζί με τα πειραματικά αποτελέσματα [26,29] έδειξαν ότι τόσο η απορρόφηση όσο και η διάθλαση της δέσμης laser στο πλάσμα προκαλούν σημαντική αλλαγή στην κατανομή της έντασης της δέσμης. Επομένως η δημιουργία μοντέλου για τη διάδοση της ρωγμής μέσα από επιφάνεια που περιβάλλεται από πλάσμα είναι σημαντική. Όμως ένα γενικό και φιλικό προς τον χρήστη μοντέλο για την αλληλεπίδραση δέσμης πλάσματος δεν είναι διαθέσιμο ακόμα.

Αρχικά θα δείξουμε ότι κάτω από τυπικές συνθήκες τροποποίησης της τραχύτητας με laser η ροή οδηγούμενη από τη δύναμη αντίδρασης λόγω εξάτμισης (evaporation recoil force driven flow) έχει σημαντικό αντίκτυπο στη μεταφορά θερμότητας στη ζώνη αλληλεπίδρασης. Σε μία αριθμητική δοκιμή μπορούμε είτε να αποκλείσουμε (switch off) την πίεση αντίδρασης λόγω εξάτμισης ή να χρησιμοποιήσουμε μία φανταστική υψηλή τιμή του ιξώδους του τήγματος ώστε να επιβραδύνουμε τη ροή του τήγματος. Η συμπεριφορά του πεδίου της θερμοκρασίας σε μια τέτοια περίπτωση θα είναι παρόμοια με αυτή που υπολογίστηκε υποθέτοντας μόνο θερμική αγωγή.

Στο Σχήμα 3.2.3 βλέπουμε το πεδίο της θερμοκρασίας για υψηλή τιμή ιξώδους ενώ οι παράμετροι αλληλεπίδρασης είναι ως εξής: τύπος δέσμης Gauss, απορροφούμενη ισχύς στον άξονα της δέσμης $5\text{MW}/\text{cm}^2$, ακτίνα δέσμης $100\mu\text{m}$, διάρκεια παλμού $15\mu\text{s}$. Η θερμοκρασία της επιφάνειας αυξάνεται ραγδαία στα πρώτα $2\mu\text{s}$ της αλληλεπίδρασης, μετά όμως η αύξησή της επιβραδύνεται λόγω της αυξανόμενης θερμικής αγωγής και της εξάτμισης της τηγμένης επιφάνειας.



Σχήμα 3.2.3 Χρονική συμπεριφορά της θερμοκρασίας της τηγμένης επιφάνειας στον άξονα της δέσμης για διάφορες τιμές ιξώδους τήγματος. Διάρκεια παλμού Laser $15\mu\text{s}$, απορροφούμενη ισχύς στον άξονα της δέσμης $5\text{MW}/\text{cm}^2$, κατανομή Gauss της ισχύος της δέσμης, ακτίνα δέσμης $100\mu\text{m}$.

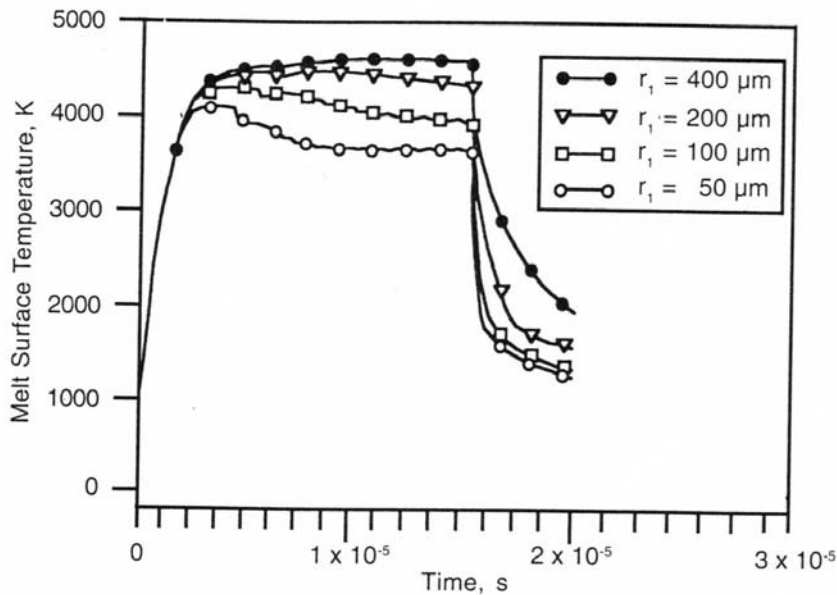
Χαμηλότερο ιξώδες τήγματος συνεπάγεται χαμηλότερες τιμές της θερμοκρασίας της τηγμένης επιφάνειας (Lower melt viscosity results in slightly lower values of the melt surface temperature). Για τιμές χαμηλού ιξώδους έχουμε ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας, ακολουθεί μείωση του ρυθμού αύξησής της και τέλος σταθεροποίησή της σε μία τιμή (Σχήμα 3.2.3 για $\mu=0,001-0,01\text{kg}/\text{ms}$). Ένα ακόμα χαρακτηριστικό είναι ότι η ταχύτητα απόψυξης (rate of cooling) μετά το πέρασμα της δέσμης εξαρτάται από το ιξώδες του τήγματος.

Από το Σχήμα 3.2.3 βλέπουμε ότι για υψηλό ιξώδες τήγματος και συνεπώς χαμηλή ταχύτητα ροής τήγματος η θερμοκρασία μειώνεται αργά όπως όταν έχουμε πλήρη αγωγή μεταφορά θερμότητας (pure conduction heat transfer). Όμως, για χαμηλό ιξώδες τήγματος, όταν το τήγμα μπορεί να ρέει με μεγάλη ταχύτητα, η θερμοκρασία της επιφάνειας πέφτει απότομα μέχρι να επιτευχθεί η θερμοκρασία στερεοποίησης. Μόλις

επιτευχθεί το σημείο στερεοποίησης η ταχύτητα απόψυξης μειώνεται απότομα σύμφωνα με το μηχανισμό αγωγής της μεταφοράς θερμότητας.

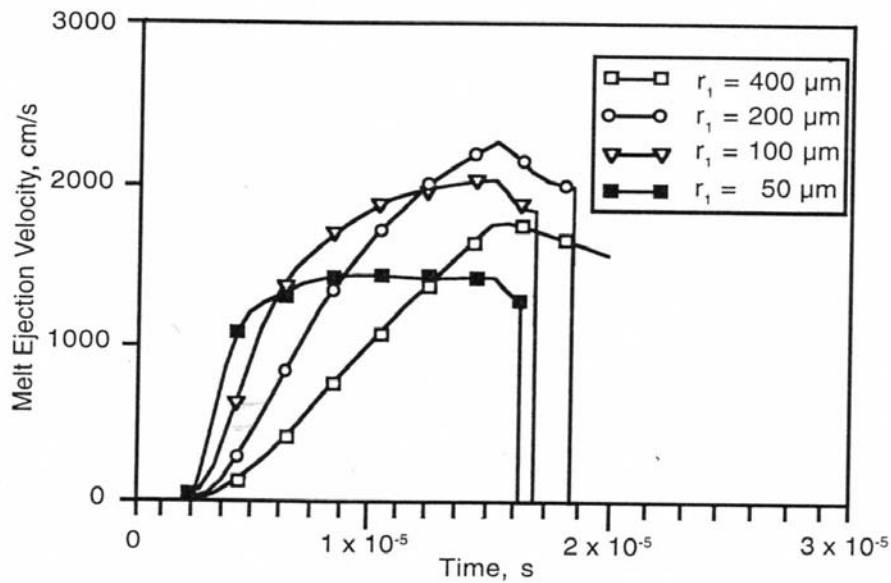
Τα συμπεράσματα που βγαίνουν από το Σχήμα 3.2.3 είναι αρκετά σημαντικά μιας και μας δείχνουν ότι υπό τον όρο ότι η κατανομή της πίεσης αντίδρασης έχει υπολογιστεί, η κίνηση του τήγματος έχει σημαντική επιρροή στη θερμοκρασιακή συμπεριφορά. Στη ζώνη αλληλεπίδρασης η ταχύτητα απόψυξης πραγματοποιείται πιο γρήγορα σε σχέση με τις προβλέψεις αν μόνο συνυπολογίζαμε τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή. Αν και το πεδίο της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς εκτός της ζώνης αλληλεπίδρασης δεν υπολογίζεται εδώ, αναμένεται η επιρροή του ρέοντος τήγματος να είναι σημαντική. Αυτό το συμπέρασμα λαμβάνεται από τα αποτελέσματα υπολογισμών της θερμοκρασίας σε διάφορες περιοχές εντός της ζώνης αλληλεπίδρασης, τα οποία θα παρουσιάσουμε παρακάτω.

Επειδή η εξάτμιση επιφέρει την κίνηση του τήγματος που παίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας θα ήταν λογικό να αναμένουμε ότι το μέγεθος της δέσμης laser είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος. Πράγματι, το μέγεθος της κοιλότητας του τήγματος και η βαθμωτή μεταβολή της πίεσης αντίδρασης που εξαρτώνται από την κατανομή της έντασης της δέσμης καθορίζουν τη ροή του τήγματος. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 3.2.4 επιβεβαιώνουν τον παραπάνω συλλογισμό. Η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας της επιφάνειας στον άξονα της δέσμης έχει υπολογιστεί για μία ρεαλιστική τιμή του ιξώδους του τήγματος και για διάφορες τιμές της ακτίνας της δέσμης.



Σχήμα 3.2.4 Χρονική συμπεριφορά της θερμοκρασίας της τηγμένης επιφάνειας στον άξονα της δέσμης για διάφορες τιμές της ακτίνας της δέσμης. Διάρκεια παλμού Laser 15 μs , απορροφούμενη ισχύς στον άξονα της δέσμης 5MW/cm², κατανομή Gauss της ισχύος της δέσμης, ιξώδες τήγματος $\mu=0.001 \text{ kg}/(\text{ms})$.

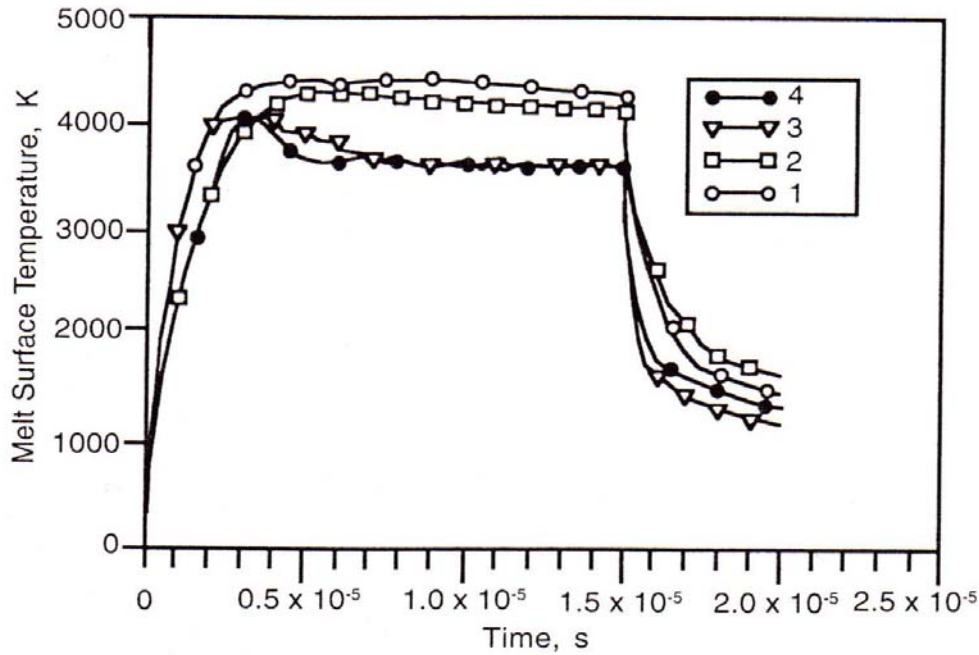
Παρατηρούμε ότι όσο πιο μεγάλη είναι η ακτίνα, τόσο περισσότερο η θερμοκρασιακή συμπεριφορά είναι παρόμοια με αυτή της καθαρής αγωγής θερμότητας. Προφανώς αυτό συμβαίνει για το λόγο ότι η αύξηση της δέσμης, και συνεπώς, της ακτίνας της κοιλότητας του τήγματος, έχει ως αποτέλεσμα την αργή ανάπτυξη του ρέοντος τήγματος. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τον υπολογισμό της ταχύτητας εκτόξευσης του τήγματος (melt ejection velocity) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.5.



Σχήμα 3.2.5 Χρονική συμπεριφορά της ταχύτητας εκτόξευσης τήγματος για διάφορες τιμές της ακτίνας της δέσμης. Διάρκεια παλμού Laser 15μs, απορροφούμενη ισχύς στον άξονα της δέσμης 5MW/cm², κατανομή Gauss της ισχύος της δέσμης, ιξώδες τήγματος $\mu=0.001 \text{ kg/(ms)}$.

Για μικρή διάμετρο δέσμης των 50μm το ρέον τήγμα εδραιώνεται κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του παλμικού laser και ο χρόνος μέχρι να εδραιωθεί είναι περίπου 8μs. Αντίστοιχα, η θερμοκρασιακή συμπεριφορά καθρεπτίζει τη δυναμική του ρέοντος τήγματος (melt flow dynamics). Η θερμοκρασία της επιφάνειας αυξάνεται, φτάνει σε μία μέγιστη τιμή, ακολούθως μειώνεται και σταθεροποιείται μετά από 8μs της εφαρμογής του laser. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της δέσμης, τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για να επιτευχθεί η σταθερή κατάσταση της θερμοκρασίας. Διάρκεια παλμού 15μs δεν είναι αρκετή για να επιτευχθεί σταθερή ροή τήγματος για ακτίνα δέσμης μεγαλύτερη ή ίση των 100μm. Όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα της δέσμης τόσο υψηλότερη είναι η σταθερή τιμή της ταχύτητας εκτοξευόμενου υλικού.

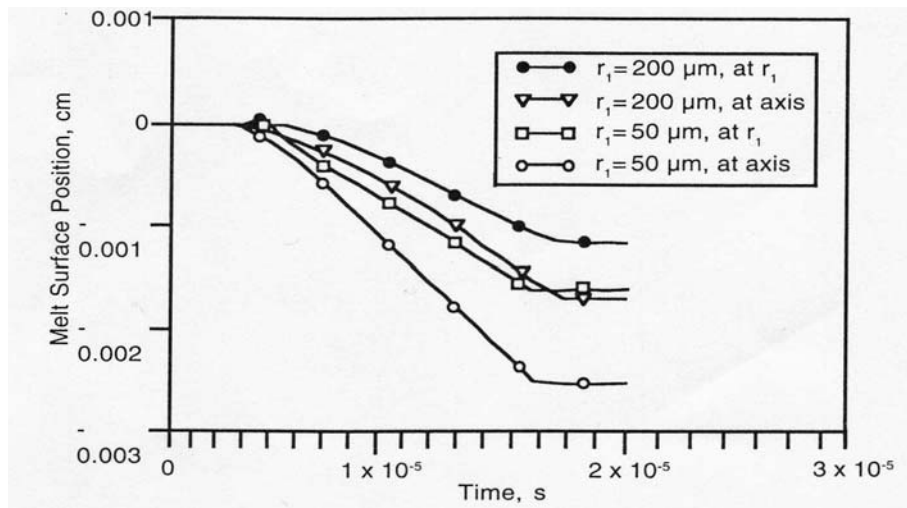
Επειδή ο ρυθμός αύξησης της ταχύτητας εκτοξευόμενου υλικού είναι μικρότερος για μεγαλύτερη ακτίνα δέσμης, η τελική ταχύτητα εκτόξευσης αρχίζει να μειώνεται μόλις επιτευχθεί μία συγκεκριμένη τιμή της ακτίνας της δέσμης. Επομένως, για ακτίνα δέσμης 400μm η ταχύτητα εκτοξευόμενου υλικού είναι μικρότερη από αυτήν που αντιστοιχεί σε ακτίνα δέσμης 200μm. Αν η διάρκεια του παλμού είναι αρκετά μεγάλη ώστε να φτάσει κοντά στη σταθερή κατάσταση ροής, τότε η ταχύτητα αυτή θα είναι υψηλότερη για μεγαλύτερες ακτίνες (Σχήμα 3.2.5). Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η ροή του τήγματος μπορεί να επηρεάσει το θερμικό πεδίο έξω από την κοιλότητα του τήγματος επειδή η θερμότητα μεταφέρεται μέσω της ροής κατά μήκος της τηγμένης επιφάνειας. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού της θερμοκρασίας της επιφάνειας σε διάφορες θέσεις εντός της κοιλότητας του τήγματος που φαίνονται στο Σχήμα 3.2.6 ενισχύουν την παραπάνω υπόθεση.



Σχήμα 3.2.6 Θερμοκρασία τηγμένης επιφάνειας για κατανομή έντασης Gauss με απορροφούμενη ισχύ στον άξονα της δέσμης $5\text{MW}/\text{cm}^2$, για ακτίνα δέσμης $200\mu\text{m}$ (καμπύλες 1,2) και $50\mu\text{m}$ (curves 3,4) στον άξονα της δέσμης (καμπύλες 1,3) και σε απόσταση r_1 από τον άξονα της δέσμης (καμπύλες 2,4).

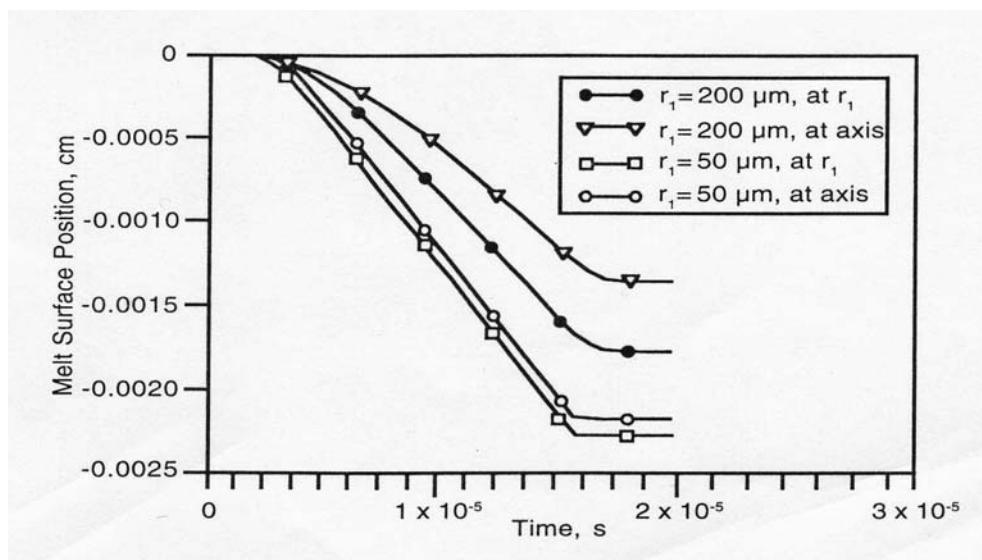
Στην περίπτωση δέσμης Gauss με μικρή ακτίνα, όταν η ροή εδραιωθεί κατά τη διάρκεια του παλμού laser, οι θερμοκρασίες της τηγμένης επιφάνειας στον άξονα και σε απόσταση r_1 από τον άξονα γίνονται ίσες όταν αρχίζει να αναπτύσσεται η ροή του τήγματος (Σχήμα 3.2.5). Η ένταση της δέσμης σε απόσταση r_1 από τον άξονα είναι ε φορές χαμηλότερη σε σύγκριση με την ένταση στον άξονα. Όμως η γρήγορη ροή εξισορροπεί τη θερμοκρασία. Για την περίπτωση μεγαλύτερης ακτίνας δέσμης, η εκτός άξονα θερμοκρασία κατά την αλληλεπίδραση της δέσμης είναι χαμηλότερη όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.6, επειδή η ροή δεν έχει αρκετό χρόνο να εδραιωθεί κατά τη διάρκεια των $15\mu\text{s}$ του παλμού laser.

Η εκτός άξονα θερμοκρασία είναι υψηλότερη και μειώνεται λιγότερο απότομα σε σύγκριση με τη θερμοκρασία του άξονα (Σχήμα 3.2.6) επειδή το θερμό τήγμα συνεχίζει να ρέει από το κέντρο προς την περιφέρεια της κοιλότητας του τήγματος. Ο υπολογισμός της κατανομής του κρατήρα είναι μία παράμετρος καθοριστική στις βιομηχανικές εφαρμογές. Για κατανομή έντασης Gauss της δέσμης, το βάθος του κρατήρα είναι μεγαλύτερο και μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από τον άξονα (Σχήμα 3.2.7). Οι υπολογισμοί προβλέπουν ότι για την ίδια αξονική ένταση δέσμης ο βαθύτερος κρατήρας σχηματίζεται από τη δέσμη με τη μικρότερη ακτίνα αφού πρωτίτερα η εκτόξευση υλικού φτάσει σε ένα σταθερό σημείο (Σχήμα 3.2.7).



Σχήμα 3.2.7 Θέση της κοινής επιφάνειας τήγματος-ατμού στον άξονα της δέσμης και σε απόσταση r_1 από τον άξονα της δέσμης για κατανομή έντασης Gauss με απορροφούμενη ισχύ στον άξονα της δέσμης $5\text{MW}/\text{cm}^2$ και για διάφορες ακτίνες δέσμης.

Η παραπάνω έκβαση είναι ίδια για προσομοίωση κατανομής έντασης δέσμης κορυφής καπέλου (δηλ. ομοιόμορφης κατανομής δέσμης) (hat top beam). Όμως, το προφίλ του κρατήρα για ομοιόμορφη κατανομή δέσμης είναι σημαντικά διαφορετικό. Για την περίπτωση κατανομής έντασης κορυφής καπέλου το μέγιστο βάθος κρατήρα εντοπίζεται σε κάποια απόσταση συγκρίσιμη με την ακτίνα της δέσμης από τον άξονα (Σχήμα 3.2.8).



Σχήμα 3.2.8 Θέση της κοινής επιφάνειας τήγματος-ατμού στον άξονα της δέσμης και σε απόσταση r_1 από τον άξονα της δέσμης για κατανομή έντασης δέσμης κορυφής καπέλου με απορροφούμενη ισχύ στον άξονα της δέσμης $5\text{MW}/\text{cm}^2$ και για διάφορες ακτίνες δέσμης.

Αυτό εξηγείται γιατί η ταχύτητα του ρέοντος τήγματος καθορίζεται από την βαθμωτή μεταβολή της πίεσης αντίδρασης, η οποία παρουσιάζει μέγιστο για την περίπτωση της κατανομής έντασης δέσμης κορυφής καπέλου στην άκρη της δέσμης. Για δέσμη Gauss

η ακτινική κατανομή της βαθμωτής μεταβολής της πίεσης αντίδρασης είναι ομαλοποιημένη με το μέγιστό της κοντύτερα στον άξονα σε σύγκριση με την κατανομή έντασης δέσμης κορυφής καπέλου.

Το παραπάνω μοντέλο που αναφέραμε είναι η πρώτη προσπάθεια που έγινε να αναπτυχθεί ένα μοντέλο τροποποίησης της τραχύτητας για την υδροδυναμική διάτρηση (hydrodynamic drilling). Η προσέγγιση αυτή βασίστηκε στη δημιουργία ρέοντος τήγματος από την βαθμωτή μεταβολή της πίεση αντίδρασης που προκαλείται από την εξάτμιση. Από το μοντέλο που παρουσιάσαμε συμπεραίνουμε ότι για ένταση αλληλεπίδρασης τυπική όσον αφορά την τροποποίηση τραχύτητας με laser, η πίεση αντίδρασης της εξάτμισης είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας και υπερβαίνει άλλους μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται σε αντίστοιχα μοντέλα για την ανάπτυξη της ροής του τήγματος όπως το φαινόμενο Marangoni, η πίεση λόγω βαρύτητας (gravitational pressure) και η πίεση από τη ροή φωτονίων (pressure by the photon flux).

Τέλος το συμπέρασμα για την υπεροχή της πίεσης αντίδρασης μπορεί να επεκταθεί και στις περιπτώσεις μοντέλων κοπής και συγκόλλησης με laser, όπου η πίεση αντίδρασης λόγω εξάτμισης δεν λαμβανόταν υπόψη μέχρι πρόσφατα [3,4].

3.3 Μηχανισμός τροποποίησης της τραχύτητας μέσω εξάτμισης

Το υδροδυναμικό μοντέλο που παρουσιάσαμε παραπάνω περιγράφει πως μία τουλάχιστον από τις δύο παρακάτω συνθήκες πρέπει να ικανοποιείται ώστε να επικρατήσει ο μηχανισμός της απομάκρυνσης υλικού λόγω εξάτμισης (evaporation mechanism of material removal). Πρώτον, η διάρκεια του παλμού πρέπει να είναι σημαντικά μικρότερη από το χρόνο που απαιτείται να εδραιωθεί η ροή του τήγματος. Δεύτερον, ο ρυθμός εξάτμισης (evaporation rate) πρέπει να είναι τόσο υψηλός ώστε στην εξίσωση

$$V_{dm} = \left(\frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial y} \right) h_m \quad (18)$$

η συνιστώσα της ταχύτητας διάτρησης που οφείλεται στην εκτόξευση τήγματος V_{dm} να αμεληθεί, σε σχέση με τη συνιστώσα της ταχύτητας διάτρησης λόγω εξάτμισης V_{dv} . Για να ικανοποιηθεί η πρώτη συνθήκη, για δεδομένη διάρκεια παλμού, η ακτίνα της δέσμης πρέπει να είναι μεγάλη υπό τον όρο η απορροφούμενη ένταση να είναι μετρίου μεγέθους. Τότε, λόγω της μεγάλης διαμέτρου της δέσμης και συνεπώς, της χαμηλής βαθμωτής μεταβολής της πίεση αντίδρασης, ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία ρέοντος τήγματος είναι μεγάλος και μπορεί να υπερβεί τη διάρκεια του παλμού. Επομένως, η κίνηση του τήγματος μπορεί να αγνοηθεί.

Αν η ένταση της δέσμης αυξάνεται, ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία της ροής μπορεί να γίνει μικρότερος από τη διάρκεια του παλμού και ο υδροδυναμικός μηχανισμός εκτόξευσης τήγματος να κυριαρχήσει ξανά επειδή η αύξηση της απορροφούμενης έντασης έχει σαν αποτέλεσμα την υψηλή βαθμωτή μεταβολή της πίεσης αντίδρασης. Όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό εξάτμισης τόσο υψηλότερη είναι η βαθμωτή μεταβολή της πίεσης αντίδρασης. Το ποσοστό αυτό μπορεί να γίνει τόσο υψηλό ώστε παρά την υψηλή ταχύτητα της εκτόξευσης τήγματος, η εξάτμιση του τήγματος θα προηγηθεί από την κίνηση του τήγματος προς το χείλος της κοιλότητας. Τότε η δεύτερη συνθήκη θα ικανοποιείται.

Προφανώς, υπάρχει μία ελάχιστη τιμή ακτίνας δέσμης ώστε για όλες τις ακτίνες που είναι μεγαλύτερες από αυτήν την τιμή, η κατάσταση εξάτμισης με εκτοξευόμενο τήγμα να είναι η επικρατέστερη. Κάτω από τυπικές βιομηχανικές συνθήκες ο υδροδυναμικός μηχανισμός και ο μηχανισμός εξάτμισης ανταγωνίζονται και η επικράτηση του ενός ή του άλλου εξαρτάται από το αν οι συνθήκες που προαναφέραμε ικανοποιούνται ή όχι.

Μονοδιάστατα μοντέλα που ο μηχανισμός εξάτμισης κυριαρχεί κατά την εκτόξευση υλικού από τη ζώνη αλληλεπίδρασης της δέσμης [8,9] είναι η πρώτη σημαντική προσπάθεια για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ δέσμης-υλικού. Όταν δημιουργήθηκαν αυτά τα μοντέλα δεν είχε γίνει αντιληπτός ο ρόλος της πίεσης αντίδρασης και στα μοντέλα αυτά γινόταν προσπάθεια να εφαρμοστεί προσομοίωση της διάτρησης με χρήση μεσαίου επιπέδου έντασης παλμών laser, της τάξης του ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου οι οποίοι, όπως ξέρουμε πλέον, είναι η τυπική περίπτωση υδροδυναμικής εκτόξευσης τήγματος. Εν τούτοις, αν τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιηθούν κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες, παρά τις απλοποιήσεις, μπορούν να δώσουν εξαιρετικά αποτελέσματα, τα οποία συμπίπτουν με τα πειραματικά δεδομένα [31].

Το μοντέλο εξάτμισης [8,9] αντιπροσωπεύει μία συγκεκριμένη περίπτωση του παραπάνω υδροδυναμικού μοντέλου όπου η κίνηση του τήγματος μπορεί να αγνοηθεί. Επομένως, η μαθηματική διατύπωση του μοντέλου εξάτμισης μπορεί να επιτευχθεί εάν αφαιρεθεί ο όρος μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή από την εξίσωση ενεργειακής ισορροπίας στην υγρή φάση (εξίσωση 19) και η εξίσωση (10) να παραμείνει αναλλοίωτη. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\rho_l c_l \frac{\partial T}{\partial t} = -\left(\frac{\partial}{\partial x}(-k_l \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(-k_l \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(-k_l \frac{\partial T}{\partial z})\right) \quad (22)$$

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = -\left(\frac{\partial}{\partial x}(-k_s \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(-k_s \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(-k_s \frac{\partial T}{\partial z})\right) \quad (23)$$

Όπου οι δείκτες l, s αναφέρονται στην υγρή και τη στερεή φάση αντίστοιχα, ρ , c , T , k , είναι η πυκνότητα, η ειδική θερμότητα, η θερμοκρασία και η θερμική αγωγιμότητα αντίστοιχα. Οι οριακές συνθήκες θα είναι ίδιες με τις αντίστοιχες ((14) και (15)) του υδροδυναμικού μοντέλου:

$$\rho L_m V_m = k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=Z_m} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial z} \Big|_{z=Z_m} \quad (24)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} + \rho V_{dv} L_v = A I_{laser} \quad (25)$$

Η ταχύτητα του μετώπου του τήγματος V_m καθορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

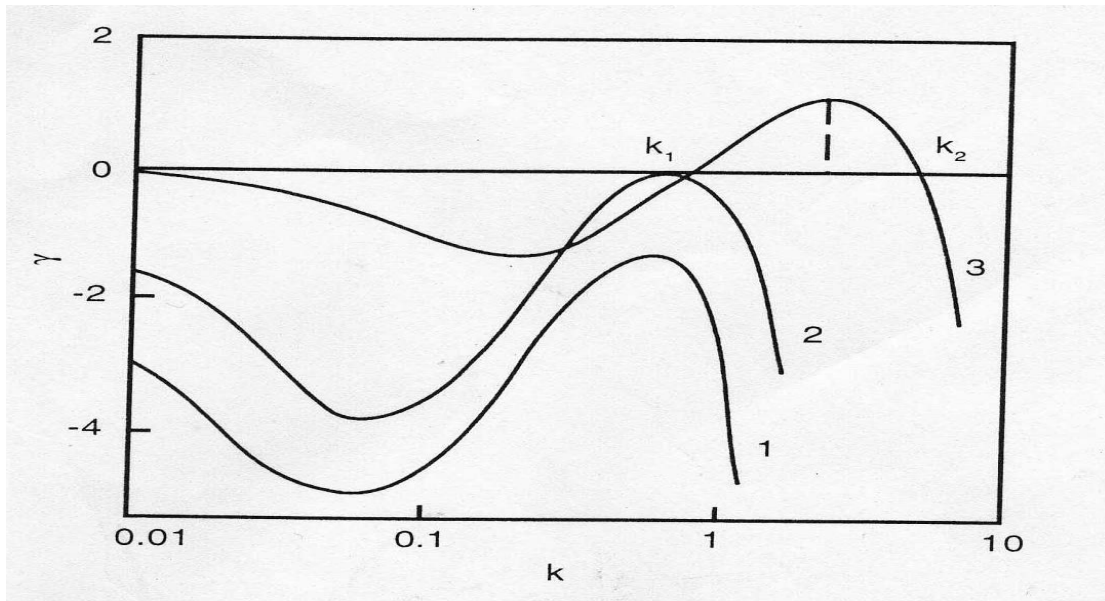
$$V_m = V_n [c_s (T_s - T_m) / L_m + (c_s T_m \sigma / \rho_s L_m^2)(1/R_1 + 1/R_2)] \quad (26)$$

Επειδή η κίνηση του τήγματος έχει αγνοηθεί στις μαθηματικές σχέσεις, η ταχύτητα διείσδυσης της δέσμης που περιγράφεται στην εξίσωση (19) δε θα περιέχει τη σχετική συνιστώσα που αφορά την κίνηση του τήγματος V_{dm} και το μέτωπο διάδοσης θα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_d = V_{dv} = V_0 \exp(-U / kT_s) \quad (27)$$

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι οι παραπάνω μαθηματικές διατυπώσεις λαμβάνουν ως δεδομένο την επιφανειακή απόθεση ενέργειας από τη δέσμη laser.

Οι διαταραχές του μετώπου εξάτμισης μεγαλώνουν αν ο αριθμός κυμάτων είναι εντός μίας συγκεκριμένης εμβέλειας η οποία καθορίζεται από τη θερμοκρασία της τηγμένης επιφάνειας, τις ιδιότητες του υλικού και το βάθος απορρόφησης του φωτός. Αυτή η κυμάτωση του σχήματος του μετώπου της εξάτμισης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία τραχύτητας επιφάνειας με συγκεκριμένη χωρική συχνότητα που αντιστοιχεί στον αριθμό κυμάτων της ασταθούς ανάπτυξης. Η επιστημονική εξέταση μας δείχνει ότι υπάρχει μία τιμή έντασης της δέσμης πάνω από την οποία ο επίπεδος κυματισμός της εξάτμισης γίνεται ασταθής. Η εξάρτηση του ρυθμού ανάπτυξης της αστάθειας από τον αδιάστατο αριθμό κυμάτων της διαταραχής κ φαίνεται στο Σχήμα 3.3.1.



Σχήμα 3.3.1 Η εξάρτηση της αναλογίας ανάπτυξης της αστάθειας από τον αριθμό κυμάτων της διαταραχής K για διάφορες εντάσεις ακτινοβολίας laser: $1-I=0.35I^*$, $2-I=I^*$, $3-I=3.33I^*$, $I^*=3.33 \times 10^{-3} \rho V_0 L_V$, $\Lambda=10^{-3}$.¹⁰

Παρατηρούμε ότι για υψηλές εντάσεις laser η αναλογία ανάπτυξης της αστάθειας παίρνει θετικές τιμές όταν το k παίρνει τιμές μεταξύ k_1 και k_2 οι οποίες είναι καθορισμένες [10].

Ο αριθμός κυμάτων k_m που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή για την αναλογία ανάπτυξης γ δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$k_m = (2\Lambda\Theta_0)^{-\frac{1}{3}} \quad (28)$$

όπου $\Lambda = \sigma\mu/\rho L_V$, $\Theta_0 = k\mu T_0/AI$, όπου σ είναι η επιφανειακή τάση, μ είναι ο συντελεστής απορρόφησης της δέσμης του laser (m^{-1}), ρ είναι η πυκνότητα του υλικού, L_V είναι η λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης, k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού, T_0 είναι η αρχική θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού, A είναι η απορροφητικότητα της επιφάνειας και I είναι η ένταση της δέσμης laser. Η αντίστοιχη χωρική συχνότητα του μετώπου κυμάτωσης είναι $\lambda_m = 2\pi/k_m\mu$.

Η ανάπτυξη του μετώπου αστάθειας της εξάτμισης απαιτεί ένα συγκεκριμένο χρόνο, ο οποίος, σύμφωνα με τις θεωρητικές μελέτες είναι συγκρίσιμος με το χρόνο που απαιτείται για την εδραίωση της μόνιμης κατάστασης της εξάτμισης $\tau_0 \sim \chi/V_s^2$ όπου χ είναι η θερμική διαχυτότητα και V_s είναι η ταχύτητα του μετώπου εξάτμισης. Επομένως, ακόμα και αν η ένταση της δέσμης laser υπερβεί την στάνταρ ελάχιστη τιμή, η κυμάτωση του μετώπου εξάτμισης δεν πραγματοποιείται αν ο χρόνος αλληλεπίδρασης είναι χαμηλότερος από τ_0 . Αν η επιφάνεια έχει αρχική τραχύτητα και οι παράμετροι αλληλεπίδρασης έχουν επιλεγεί έτσι ώστε ο αριθμός κυμάτων της τραχύτητας να βρίσκεται εντός της εμβέλειας που αντιστοιχεί σε αρνητική αναλογία ανάπτυξης της αστάθειας, αρκεί δηλαδή να μην βρίσκεται εντός του διαστήματος (k_1, k_2) , τότε η τραχύτητα της επιφάνειας αναμένεται να μειωθεί από την ακτινοβολία του laser.

Το εύρος της εφαρμοσιμότητας των μοντέλων εξάτμισης του Anisimov [10] με επικράτηση μηχανισμού αποβολής υλικού λόγω εξάτμισης και αστάθεια μετώπου

εξάτμισης είναι περιορισμένο σε περιπτώσεις όπου η κίνηση του τήγματος μπορεί να αμεληθεί. Όπως είδαμε από την υδροδυναμική τήξης, η ροή της υγρής φάσης δεν μπορεί να αμεληθεί εάν η διάρκεια του παλμού είναι μεγαλύτερη από το χρόνο που απαιτείται για την εδραίωση της ροής, ή, αν η ένταση της δέσμης είναι τόσο χαμηλή ώστε ο ρυθμός αποβολής υλικού λόγω εξάτμισης είναι σημαντικά μικρότερος από το ρυθμό εκτόξευσης τήγματος. Η κίνηση του τήγματος η οποία προκαλείται από την επιστρέφουσα δύναμη της εξάτμισης μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία είτε τραχείας επιφάνειας, είτε λείας επιφάνειας.

Κεφάλαιο 4 LST ΓΙΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ.

4.1. Περί Laser Surface Texturing (LST)

Η τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας με χρήση laser χρησιμοποιείται στη βιομηχανία μαγνητικής αποθήκευσης (magnetic storage industry) για την αποφυγή της στατικής τριβής κατά την εκκίνηση. Θα αναφερθούμε στη δυναμική της LST να οδηγεί σε αύξηση των τριβολογικών επιδόσεων κατά τη συνεχή λειτουργία.

Ερευνητές με καθοδηγητή τον Geiger [76,77] χρησιμοποίησαν το Excimer Laser με μία τεχνική προβολής και με χρήση προστατευτικής μάσκας. Η μάσκα είναι φωτισμένη με τη δέσμη laser και η γεωμετρική της πληροφορία προβάλλεται πάνω στην επιφάνεια. Αυτή η μέθοδος εφαρμόστηκε σε έμβολο πρέσας κατά τη σφυρηλάτηση σε διεργασία παραγωγής πριτσινιών (rivets) και έδειξε μία σημαντική αύξηση της ζωής του εργαλείου κατά τη σφυρηλάτηση εν ψυχρώ της τάξης του 169%. Επίσης έγιναν εφαρμογές στη Γερμανία [78] τόσο σε μηχανικά αεροστεγή στεγανωτικά (mechanical seals) όσο και σε χιτώνια κυλίνδρων (cylinder liners) για μηχανές εσωτερικής καύσης.

Σε πανεπιστήμιο της Ιαπωνίας [79] μελετήθηκε η εφαρμογή του laser CO₂ για τροποποίηση της τραχύτητας επιφανειών από SiC και η επίδραση που έχει η LST στη μετάβαση από την υδροδυναμική κατάσταση στην μικτή κατάσταση λίπανσης. Πειράματα εκτελέστηκαν σε ένα δίσκο και έναν κύλινδρο φορτισμένο αξονικά με τη χρήση νερού ως λιπαντικό. Ελέγχθηκε μία επιφάνεια μορφής μικρο-πόρων διαμέτρου 150μm και βάθους 8-10μm και συγκρίθηκε με δείγματα μη τροποποιημένης επιφάνειας. Βρέθηκε ότι το κρίσιμο φορτίο για τη μετάβαση από την υδροδυναμική κατάσταση στην μικτή κατάσταση λίπανσης, για τα δείγματα τροποποιημένης επιφάνειας, είναι 20% μεγαλύτερη από ότι στα μη τροποποιημένης επιφάνειας.

Εκτεταμένη ερευνητική εργασία έγινε και σε πανεπιστήμιο της Ελβετίας κάνοντας χρήση του Q-switched Nd:YAG laser αλλά κυρίως laser παλμού υπομικροσκοπικής κλίμακας (femtosecond lasers) [80-84]. Η εργασία αυτή σκόπευε στη μελέτη της ίδιας της διεργασίας τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας, όμως, περιορισμένες βασικές τριβολογικές δοκιμές έλαβαν χώρα σε συνεργασία με ερευνητές από άλλα ινστιτούτα. Για παράδειγμα έγινε η δοκιμή σφαίρας-δίσκου (ball-on disc) όπου παρέχεται ένα μικρό προκαθορισμένο ποσό λιπαντικού και παρακολουθείται και ελέγχεται η εξέλιξη του συντελεστή τριβής. Η διάρκεια ζωής του δείγματος ορίζεται ως το σημείο στο οποίο η τριβή αρχίζει να αυξάνεται ραγδαία. Βρέθηκε ότι η διάρκεια ζωής ενός τροποποιημένου δείγματος δίσκου μπορεί να είναι μέχρι και οκτώ φορές μεγαλύτερη από αυτήν του τροποποιημένου δείγματος.

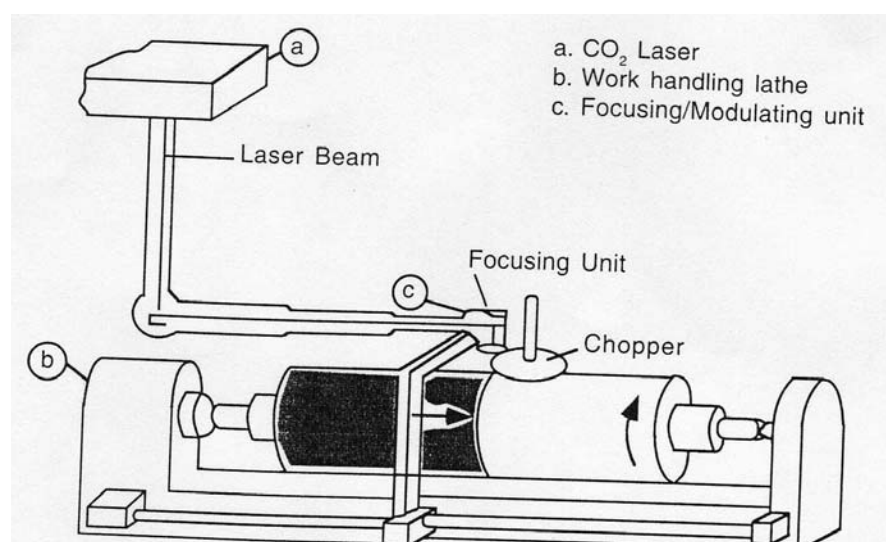
Στην Αμερική έγινε έρευνα για την επίδραση της LST στην μετάβαση από οριακή σε υδροδυναμική κατάσταση λίπανσης [85] κάνοντας μέτρηση της τριβής και της αντίστασης σε ηλεκτρική επαφή ενός δίσκου σε μη κατευθυνόμενη ολισθηρή σύμμορφη επαφή. Παρατηρήθηκε ότι η LST επεκτείνει την κατάσταση υδροδυναμικής λίπανσης ως προς την φόρτιση και την ολισθαίνουσα ταχύτητα. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η LST μειώνει σημαντικά το συντελεστή τριβής σε παρόμοιες συνθήκες λειτουργίας σε σύγκριση με μη τροποποιημένες επιφάνειες.

Υιοθετήθηκε μία προσέγγιση δοκιμής και σφάλματος κάθε φορά που γινόταν επιχείρηση βελτίωσης των διαστάσεων της τροποποίησης της τραχύτητας. Αυτός είναι πιθανόν ο λόγος για τις μεγάλες αποκλίσεις στις "βέλτιστες" διαστάσεις όπως αυτές ορίστηκαν από διάφορες ερευνητικές ομάδες. Η μέθοδος δοκιμής και σφάλματος ίσως είναι η μόνη βιώσιμη προσέγγιση σε περιπτώσεις όπως στεγνή ολίσθηση ή σε κατάσταση έλλειψης λιπαντικού όπου δεν υπάρχουν βασικά θεωρητικά μοντέλα. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι μικρο-κοιλότητες λειτουργούν ως

μικροσυλλέκτες μικρών σωματιδίων τριβής ή σαν μικρές δεξαμενές για την κατακράτηση του λιπαντικού. Όμως, σε άλλες περιπτώσεις όπου οι μικρο-κοιλότητες λειτουργούν σαν μικρο-υδροδυναμικά δοχεία, μπορεί να γίνει εκτενής θεωρητική έρευνα για τις βέλτιστες παραμέτρους της LST ώστε να έχουμε τη μέγιστη δυνατή τριβολογική απόδοση. Η ιδέα αυτή παρακίνησε ώστε να γίνουν εκτεταμένες έρευνες οι οποίες είχαν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία διάφορων μοντέλων για τη βελτιστοποίηση της LST σε διάφορες εφαρμογές.

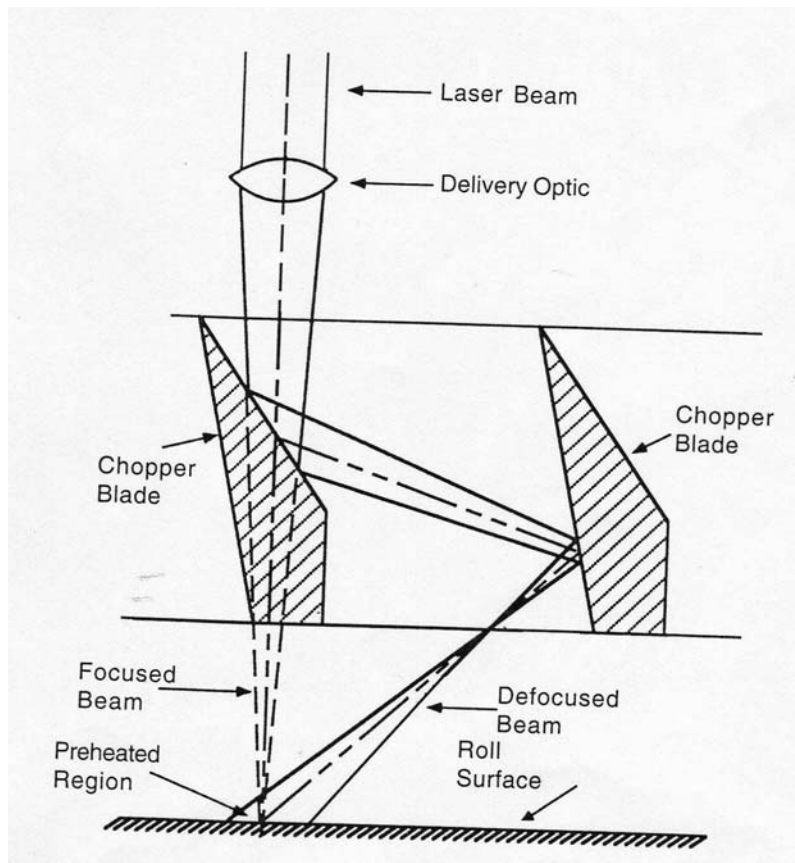
4.2 Εφαρμογές της Τροποποίησης της Τραχύτητας Κυλινδρικής Επιφάνειας με τη χρήση Laser.

Η εφαρμογή της τεχνολογίας δέσμης laser για τροποποίηση της επιφάνειας με εφαρμογή περιστρεφόμενου εργαλείου (ρολλού) (work roll surface) αναπτύχθηκε και εμπορευματοποιήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 70 σε Βελγικό Ερευνητικό κέντρο Μεταλλουργίας (Center for Research in Metallurgy, Cockerill Sambre, Belgium) [106]. Η βασική αρχή για την τροποποίηση της τραχύτητας κυλινδρικής επιφάνειας με laser (roll surface laser texturing) φαίνεται στο Σχήμα 4.2.1.



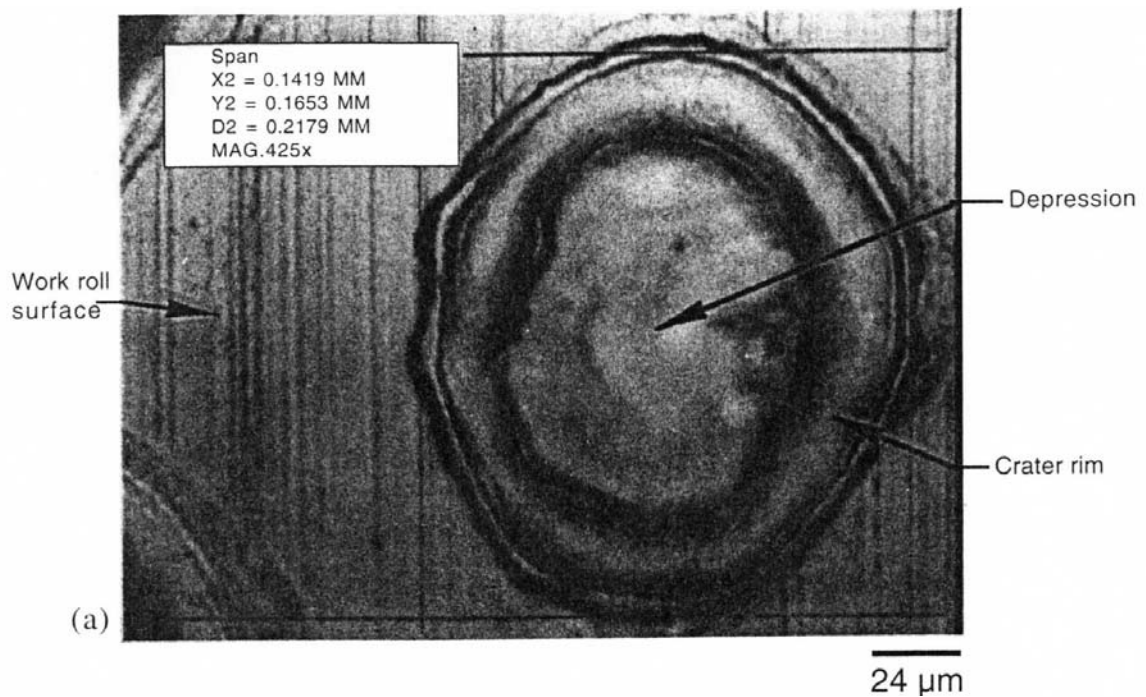
Σχήμα 4.2.1 Μονάδα τροποποίησης με Laser

Η δέσμη του cw CO₂ laser ρυθμίζεται-διακόπτεται η συνεχής λειτουργία του από ένα διακόπτη (chopper) και εστιάζεται πάνω στην επιφάνεια του περιστρεφόμενου κυλίνδρου. Η μονάδα εστίασης και ρύθμισης (focusing/modulating unit) μετατοπίζεται κατά μήκος του άξονα του κυλίνδρου (roll axis) ώστε να προσδώσει την τροποποίηση της τραχύτητας σε όλο το τμήμα της κυλινδρικής επιφάνειας (roll surface). Η δέσμη laser μαζί με τη μονάδα εστίασης και ρύθμισης κινούνται κατά το διάμηκες ως προς τον άξονα του περιστρεφόμενου κυλίνδρου, επομένως το μήκος της οπτικής διαδρομής από τον ακροδέκτη εξόδου της δέσμης laser προς τον φακό εστίασης διατηρείται σταθερό. Η ρύθμιση της δέσμης γινόταν με ένα συμβατικό διακόπτη (conventional chopper) του οποίου ο σχεδιασμός αργότερα βελτιώθηκε και η γενική διάταξή του πήρε τη μορφή του Σχήματος 4.2.2 [108].



Σχήμα 4.2.2. Μηχανισμός προθέρμανσης (pre-Heat) μιας κυλινδρικής επιφάνειας

Ο τυπικός κρατήρας που είναι το αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης ενός απλού παλμού και της μεταλλικής επιφάνειας φαίνεται στο Σχήμα 4.2.3.



Σχήμα 4.2.3 Μορφή ενός δακτυλοειδή κρατήρα σε μία κυλινδρική επιφάνεια.

Εκτός από τη βελτίωση της μορφής της επιφάνειας του φύλλου του μετάλλου, η τροποποίηση της τραχύτητας επιτυγχάνει τέτοια τοπογραφία στο φύλλο της επιφάνειας που να παρέχει υψηλής ποιότητας εμφάνιση της επιφάνειας μετά από βαφή [109].

Ιάπωνες ερευνητές κατέβαλαν σημαντική προσπάθεια στο να βρουν τις προϋποθέσεις διεργασίας, οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα την υψηλότερη καθαρότητα εικόνας (image clarity) μετά από βαφή (painting) μίας τροποποιημένης επιφάνειας [107, 110]. Είναι δύσκολο να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα [107] οι απαιτήσεις τόσο για τη μορφοποίηση (press formability) όσο και για την καθαρότητα της εικόνας (image clarity), όμως, βρέθηκαν διάφορες τοπογραφίες τροποποίησης (texturing topographies) οι οποίες εξασφαλίζουν τόσο αυξημένη καθαρότητα εικόνας όσο και βελτιωμένη μορφή.

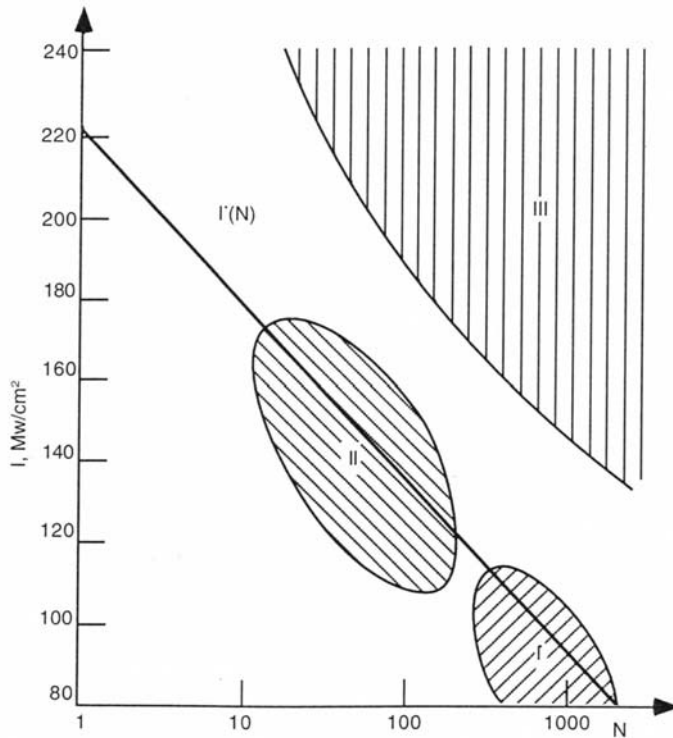
Σε μερικές εφαρμογές όπως κατά την κοπή νομισμάτων (coin stamping) απαιτείται σε ορισμένα τμήματα της μήτρας κοπής των νομισμάτων μια επιφάνεια. [111]. Συνήθως αυτό επιτυγχάνεται με αμμοβολή η οποία είναι αρκετά δύσκολη στην εφαρμογή της και χρονοβόρα. Διαπιστώθηκε [111] ότι τυχαία εμφάνιση μπορεί να παραχθεί σε γυαλισμένη μεταλλική επιφάνεια με χρήση laser παλμών 100-500μs σχετικά χαμηλής έντασης, της τάξης των 240-500 W/mm². Παρά το γεγονός ότι η ανομοιομορφία της τραχύτητας πέραν αυτής που επιτυγχάνεται με εφαρμογή του laser (laser spot) δεν επιτρέπει τέτοιες μεθόδους για τη δημιουργία μιας επιφάνειας κατά την παραγωγή των νομισμάτων, υπάρχουν άλλες εφαρμογές όπου απαιτείται η δημιουργία μιας επιφάνειας στην περιοχή της επιφάνειας.

Η τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας είναι ιδιαίτερα σημαντική στη κατασκευή σκληρών δίσκων στους υπολογιστές. Όμως, υψηλότερη τραχύτητα στην επιφάνεια των δίσκων έχει σαν αποτέλεσμα υψηλότερο προεξοχών ύψος, και συνεπώς μικρότερη πυκνότητα εγγραφής. Η λύση βρίσκεται στην τοπική τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας μόνο των ζωνών μεταξύ δύο ιχνών του σκληρού δίσκου [112].

Η μηχανική χάραξη, η ανοδίωση (anodizing) και η χημική χάραξη με οξύ (chemical etching) έχουν το κοινό μειονέκτημα ότι δεν είναι ικανές για τοπική τροποποίηση της τραχύτητας, και ο έλεγχος της προκύπτουσας τραχύτητας είναι ανεπαρκής. Σε αντίθεση με αυτές τις τεχνικές, η LST [112] μπορεί να δημιουργήσει τοπική τροποποίηση της επιφάνειας (local surface modification) με ελεγχόμενο σχήμα κρατήρων. Η χρήση του Q-switched Nd:YAG laser με παλμούς διάρκειας των 100ns, μέγιστης ισχύς 100kW και ρυθμό επανάληψης του παλμού 20kHz εφαρμόστηκε για τοπική τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας μόνο των ζωνών μεταξύ δύο ιχνών του σκληρού δίσκου. Η δύναμη της δέσμης ελαττώνεται για τη δημιουργία του επιθυμητού σχήματος των κρατήρων. Η ηλεκτρονική μέθοδος των παλμών επιτρέπει την επίτευξη εξαγωνικού τύπου κρατήρων πάνω στην επιφάνεια.

Επιφάνειες με διαφορετικές τραχύτητες μπορούν να παραχθούν μεταβάλλοντας τις παραμέτρους διεργασίας. Η αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της συνάφειας [113] ή σε αύξηση της απορρόφησης της δέσμης laser για διαδοχική διεργασία με laser μετάλλων υψηλής ανακλαστικότητας [114]. Η εκτρέχυνση της επιφάνειας μπορεί να εκπληρωθεί σε αυτήν την περίπτωση με τη χρήση του Excimer Laser [114], επειδή η απορροφητικότητα των μεταλλικών επιφανειών στο μήκος κύματος του Excimer Laser είναι σημαντικά υψηλότερη συγκριτικά με του CO₂ Laser ή του Nd:YAG Laser.

Ανάλογα με τις συνθήκες διεργασίας και το υπό κατεργασία υλικό, μπορούν να επιτευχθούν [115] διαφορετικές μορφολογίες της επιφάνειας. Το διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 4.2.4 μας δείχνει το πεδίο των παραμέτρων που ανταποκρίνονται σε διαφορετική υφή της επιφάνειας του ηλεκτρολυτικού χαλκού (electrolytic copper) συναρτήσει της έντασης της δέσμης laser και του αριθμού των παλμών που εφαρμόζονται.

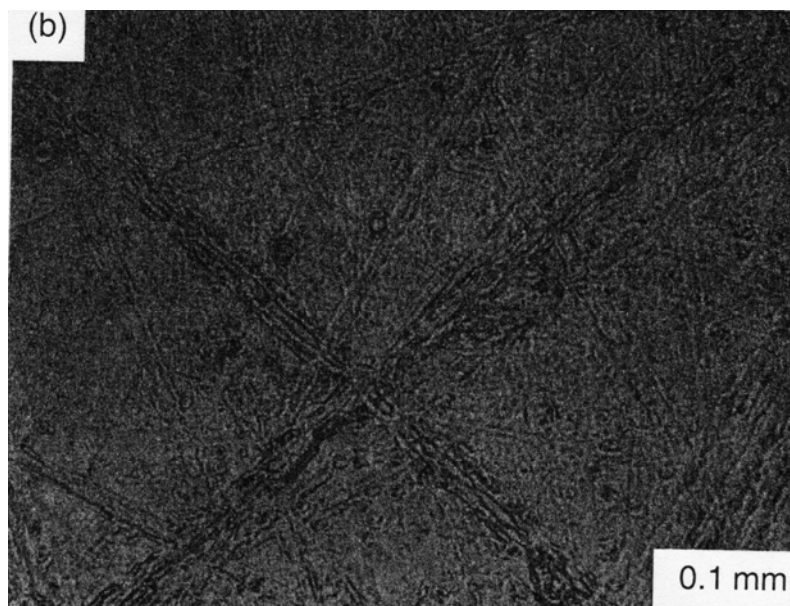
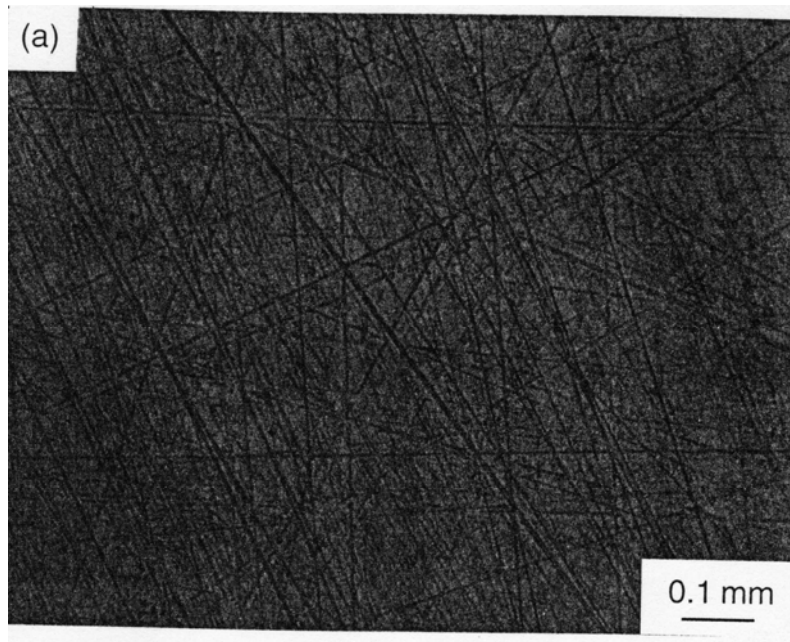


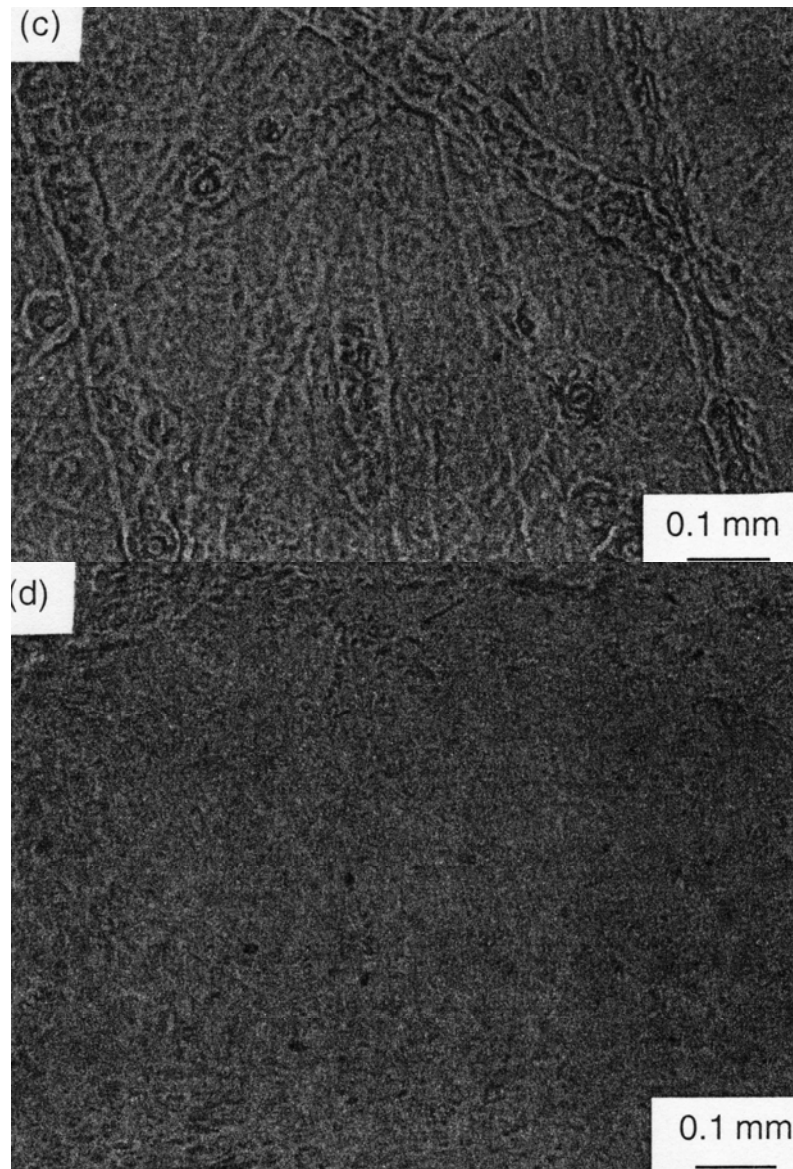
Σχήμα 4.2.4 Διάγραμμα Έντασης δέσμης συναρτήσει του αριθμού παλμών του ηλεκτρολυτικού χαλκού.

Στη περιοχή I έχουμε άτακτη σύνθεση της επιφάνειας με σταγονίδια 2-5 μ m ενώ εμφανίζεται και θερμική ρωγμάτωση (thermal cracking). Τόσο η άτακτη όσο και η μονοδιάστατη σύνθεση της ακόλουθης επιφάνειας στην εξωτερική επιφάνεια των ορίων των κόκκων παρουσιάζεται στη περιοχή II. Στην περιοχή III έχουμε μία δισδιάστατη δομή της επιφάνειας η οποία ανταποκρίνεται σε συνήθους κατανομής κωνικούς σχηματισμούς. Η δισδιάστατη δομή παρατηρήθηκε υπεράνω της οριακής τιμής του σχηματισμού πλάσματος $I^*(N)$ και επομένως εκχωρείται στην αλληλεπίδραση πλάσμα-επιφάνεια. Πρέπει να τονίσουμε εδώ ότι η εξάρτηση της οριακής τιμής της έντασης της δέσμης για το σχηματισμό πλάσματος από τον αριθμό των παλμών του laser που φαίνεται στο Σχήμα 4.2.4 αντιπροσωπεύει μόνο τη συγκεκριμένη περίπτωση του χαλκού. Για διαφορετικά μέταλλα αυτή η εξάρτηση μπορεί να έχει τελείως διαφορετικό χαρακτήρα [115].

Επομένως, ο σχηματισμός μίας δισδιάστατης δομής μπορεί να εξηγηθεί καλύτερα με την αστάθεια του μετώπου εξάτμισης [10] παρά με την επίδραση του πλάσματος. Σε υψηλότερες εντάσεις [116] δέσμης laser η υδροδυναμική της τήξης επηρεάζει την εμφάνιση της επιφάνειας. Τότε παρατηρείται μία ιδιαίτερα άτακτη μορφολογία της επιφάνειας. Αυτό καθορίζεται από την τυρβώδη φύση της ροής του τήγματος, η οποία πιθανόν απορρέει από την αστάθεια εξάτμισης.

Η ανύψωση του χείλους του κρατήρα που παρατηρείται σε αυτήν την κατάσταση οφείλεται στην εκτόξευση τήγματος από τη ζώνη αλληλεπίδρασης. Υπό συγκεκριμένη κατάσταση ακτινοβολίας, μπορεί να επιτευχθεί ομαλοποίηση της επιφάνειας. Για μεταλλικές επιφάνειες η ομαλοποίηση της επιφάνειας απαιτεί χαμηλής έντασης δέσμη η οποία ίσα-ίσα να μπορεί να τήξει το δείγμα της επιφάνειας [117]. Η ροή του τήγματος δεν λαμβάνει χώρα υπό συνθήκες χαμηλής έντασης και αυτό γιατί η πίεση αντίδρασης κατά την εξάτμιση είναι μικρή. Αν επιπροσθέτως η κατανομή της έντασης της δέσμης είναι ομοιόμορφη [117], τότε ούτε ροή Marangoni λαμβάνει χώρα. Υπό συνθήκες μηδενικής ροής του τήγματος, το τήγμα στερεοποιείται δημιουργώντας μία ομαλοποιημένη επιφάνεια. Η αλλαγή της τοπογραφίας της επιφάνειας με εναλλαγή της έντασης της δέσμης laser φαίνεται στο Σχήμα 4.2.5.





Σχήμα 4.2.5 Τηγμένη επιφάνεια Αλουμινίου μέσω εφαρμογής Excimer Laser.

- a) Επιφάνεια όπως λαμβάνεται.
- b) Αρχική τήξη
- c) Εκτεταμένη τήξη με ανάπτυξη εγκλεισμάτων
- d) Τελική μορφή επιφάνειας με υψηλή ομοιομορφία.

Σε χαμηλότερες εντάσεις δέσμης, η τήξη επέρχεται στη μηχανική χάραξη (mechanical scratching). Καθώς η ένταση της δέσμης αυξάνεται, μεγάλες περιοχές της επιφάνειας τήκονται μέχρι να επιτευχθεί η ομαλοποίηση της επιφάνειας. Για μεσαίου επιπέδου ένταση, η εξάτμιση των εγκλεισμάτων δημιουργεί κρατήρες στην επιφάνεια (Σχήμα 4.2.5.c) οι οποίοι εξαφανίζονται σε υψηλότερες εντάσεις (Σχήμα 4.2.5d).

Τέτοια ομαλοποίηση της μεταλλικής επιφάνειας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης σε διάβρωση και προβολή από οξύ [117]. Η ομαλοποίηση της επιφάνειας αναφέρεται για μη μεταλλικά υλικά όπως το διαμάντι [118] και τηγμένο διοξείδιο του πυριτίου [119]. Αυτή η διεργασία είναι απαραίτητη για τη βελτίωση των οπτικών χαρακτηριστικών των τεχνητά αναπτυσσόμενων λεπτών μεμβρανών από διαμάντι ή για την αύξηση της οριακής έντασης της προβολής του laser στο λεπτό στρώμα επιφάνειας.

Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η επιφάνεια της στερεοποιημένης λίμνης είναι ανυψωμένη σε σύγκριση με την επιφάνεια του δείγματος. Ένας πιθανός λόγος για αυτό του είδους την ανύψωση είναι ότι η συρρίκνωση του τοιχώματος του κρατήρα λόγω της παραμένουσας θερμικής τάσης έχει ως αποτέλεσμα την αποβολή του υγρού τήγματος, το οποίο μετά τη στερεοποίηση σχηματίζει δομή σε σχήμα θόλου.

Επίσης, ο σχηματισμός μιας φάσης με διαφορετική πυκνότητα μετά τη στερεοποίηση, η ύπαρξη μικρών πόρων, και η δημιουργία μικρορωγμών, μπορούν να οδηγήσουν σε ανύψωση της συγκολλημένης επιφάνειας. Η ανύψωση στο σημείο συγκόλλησης μπορεί να ελεγχθεί ελέγχοντας το θερμικό πεδίο που επιφέρεται στο δείγμα, ή την ποσότητα του τήγματος που δημιουργείται κατά την εφαρμογή της δέσμης laser. Πιθανόν η μέθοδος αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ενός προτύπου δείγματος με συμμετρικές προεξοχές στη μεταλλική επιφάνεια, εντούτοις, τέτοια εφαρμογή δεν έχει ακόμα αναφερθεί.

4.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση της Τεχνικής της Τροποποίησης της Τραχύτητας της Επιφάνειας με τη χρήση Laser για Τροβολογικές Εφαρμογές.

Η τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας με σκοπό την αύξηση των τριβολογικών ιδιοτήτων των μηχανικών συστατικών της είναι ευρέως γνωστή εδώ και αρκετά χρόνια. Ίσως η πιο διαδεδομένη εφαρμογή είναι το "ακόνισμα" σε χιτώνια κυλίνδρων (cylinder liners honing) [53-54], ενώ οι επιφάνειες των σύγχρονων μαγνητικών εξαρτημάτων αποθήκευσης (magnetic storage devices) είναι κοινώς τροποποιημένες [55-56] και η τροποποίηση της τραχύτητάς τους θεωρείται σαν ένα μέσο για καταπολεμηθεί η προσκόλληση και η στατική τριβή στις συσκευές MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) [57]. Ουσιαστική πειραματική εργασία τροποποίησης τραχύτητας της επιφάνειας γίνεται σε διάφορες μορφές και σχήματα για τριβολογικές εφαρμογές από ερευνητικές ομάδες σε όλο τον κόσμο και στις μελέτες αυτές χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές τροποποίησης της τραχύτητας όπως μηχανική τροποποίηση (machining texturing), τροποποίηση με δέσμη ιόντων (ion beam texturing), τροποποίηση μέσω χάραξης με οξύ (etching texturing) και τροποποίηση με laser (laser texturing).

Στο πέρασμα των χρόνων αναπτύχθηκαν διάφορες τεχνικές για την τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας με σκοπό την αύξηση των τριβολογικών της επιδόσεων. Η μέθοδος παλλόμενης κύλισης (vibrorolling) που αναπτύχθηκε από τον Schneider το 1984 [63] απαρτίζεται από την παραγωγή ρηχών αυλακώσεων (shallow grooves) με πλαστική παραμόρφωση χρησιμοποιώντας ένα οδοντωτό εργαλείο που δημιουργεί αυλακώσεις με την εφαρμογή του σε μεταλλικά τμήματα. Εκτεταμένη εργασία έγινε με τη μέθοδο παλλόμενης κύλισης (vibrorolling) στην Ανατολική Ευρώπη [64] ενώ στην Αμερική [65] ο Suh παρουσίασε την ιδέα της διαμορφωμένης επιφάνειας για την απομάκρυνση ακαθαρσιών αποτέλεσμα της φθοράς από οξείδωση, από τη διεπιφάνεια των ηλεκτρικών επαφών.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε μία τεχνική χάραξης με οξύ (etching technique) η οποία αργότερα αντικαταστάθηκε από αποξεστική μηχανική εργασία για το σχηματισμό αυλακώσεων οι οποίες τελικά σχημάτιζαν μία κυματιστή επιφάνεια [66-69].

Η λειτουργία των κυματισμών είναι να δρουν ως παγίδες για της ακαθαρσίες λόγω φθοράς (wear debris) και συνεπώς να μειώνουν τις συνιστώσες τριβής και φθοράς.

Η χάραξη με οξύ ενεργού ιόντος (reactive ion etching) RIE χρησιμοποιήθηκε από ερευνητές με οδηγό τον Kato στην Ιαπωνία [70-72] για να μελετηθεί η επίδραση της τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας στο σχηματισμό μικρο-αυλακώσεων σε παράλληλες ολισθηρές όψεις του SiC σε νερό. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται διάφορες τεχνικές που αναπτύχθηκαν όπως η Abrasive jet machining [73], η LIGA [74], η lithography and anisotropic etching [75], και βλέπουμε και το παγκόσμιο ενδιαφέρον που αναπτύχθηκε γύρω από την τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας.

Πίνακας 1: Διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας εκτός της LST.

Technique	Institute	References	Comments
Vibrorolling	Institute of Mechanical Engineering Problems, Petersburg, Russia	[63,64]	Various mechanical components
Undulated surfaces	MIT, Cambridge, USA	[65–69]	Wear particle trapping sites
Reactive ion etching ~RIE!	Tohoku University, Sendai, Japan	[70–72]	Laboratory tests and limited theoretical modeling
Abrasive jet machining and excimer laser	FCRA and AIST, Nagoya, Japan	[73]	Pin on disk tests
LIGA	University of Kentucky, Lexington, USA	[74]	Laboratory tests on thrust rings. Limited
Lithography and anisotropic etching	Uppsala University, Uppsala, Sweden	[75]	Reciprocating test rig

Οι περισσότερες από τις εργασίες που αναφέρονται είναι πειραματικές και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι σύνθετα και σε λίγες περιπτώσεις μπορούν να περιγραφούν αναλυτικά. Όμως, παρά την έλλειψη των εκτεταμένων θεωρητικών μοντέλων παρουσιάστηκαν αξιοσημείωτες βελτιώσεις όσον αφορά τη μείωση της φθοράς και της τριβής.

Οι περισσότερες από αυτές τις ερευνητικές μελέτες είναι σε πειραματικό στάδιο και βασίζονται στο συλλογισμό ότι η τροποποίηση της τραχύτητας παρέχει τη δημιουργία μικρο-κοιλοτήτων οι οποίες χρησιμεύουν στο να αυξάνεται η κατακράτηση λιπαντικών ή ακόμα να χρησιμοποιούνται ως συλλέκτες μικρο-ρωγμών και φθορών. Συνήθως, η βελτιστοποίηση των διαστάσεων της τροποποίησης της τραχύτητας γίνεται με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος.

Αρχικά ο Hamilton παρουσίασε το 1966 [58] την τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας με τη μορφή μικρο-εξογκωμάτων οι οποίες λειτουργούν ως μικρο-υδροδυναμικά δοχεία. Η ιδέα αυτή αναπτύχθηκε αρχικά για παράλληλη ολίσθηση όπως στην περίπτωση των μηχανικών αεροστεγών στεγανωτικών (mechanical seals) [59-60]. Η τροποποίηση μέσω χάραξης με οξύ εφαρμόστηκε τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο σε μία προσπάθεια να βελτιστοποιηθούν οι διαστάσεις της τροποποίησης της τραχύτητας.

Το 1996 παρουσιάστηκε από τους Etsion και Burstein [61] ένα μοντέλο για μηχανικά αεροστεγή στεγανωτικά με συνήθη μικρο-επιφανειακή δομή το οποίο έδειξε ότι υπάρχει σημαντική βελτίωση στην απόδοση του αεροστεγούς στεγανωτικού (seal) όταν υπάρχουν ομοιόμορφα κατανομημένες ημισφαιρικές κοιλοότητες σε μία από τις επιφάνειες του υπό σύνδεσης αεροστεγούς στεγανωτικού. Ακολουθήθηκε πειραματική μελέτη [62] στην οποία αεροστεγείς στεγανωτικοί δακτύλιοι δοκιμάστηκαν σε λάδι. Η μελέτη έδειξε ότι το σφαιρικό σχήμα των κοιλοτήτων μπορεί να βελτιστοποιηθεί και ότι υπάρχει ένα βέλτιστο βάθος της κοιλοότητας το οποίο μεγιστοποιεί τη δυσκαμψία του λεπτού στρώματος.

Από όλες τις μεθόδους τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας που εφαρμόζονται με σκοπό την βελτίωση των τριβολογικών ιδιοτήτων της, η

τροποποίηση με laser είναι η πιο υποσχόμενη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είναι εξαιρετικά γρήγορη, είναι φιλική προς το περιβάλλον, και παρέχει πλήρη έλεγχο του σχήματος και του μεγέθους των κοιλοτήτων. Ελέγχοντας την πυκνότητα της ενέργειας, το laser μπορεί να τροποποιήσει σκληρυνθέντες χάλυβες, κεραμικά, πολυμερή, καθώς και κρυσταλλικές κατασκευές. Πράγματι, η LST κερδίζει όλο και περισσότερη προσοχή από την κοινότητα της τριβολογίας και αυτό είναι εμφανές και από τον αυξανόμενο αριθμό των δημοσιεύσεων για αυτήν. Ο σκοπός αυτής της ενότητας είναι να κάνουμε μία ανασκόπηση για τους διάφορους τρόπους τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας γενικά, και για το laser ειδικά.

4.4 Μικρο-τροποποίηση Επιφάνειας Εργαλειογάλυβα με σκοπό τη βελτίωση των Τριβολογικών του Επιδόσεων

4.4.1 Εισαγωγή

Με τη χρήση του laser σε διάφορα υλικά όπως μέταλλα, γυαλιά, κεραμικά και πολυμερή, μπορούν να δημιουργηθούν τοπογραφικά χαρακτηριστικά υψηλής ακρίβειας και ευκαμψίας. Η μικρο-τροποποίηση (microtexturing) της επιφάνειας λειτουργικών εργαλείων προσφέρει την δυνατότητα μείωσης της φθοράς και της τριβής κατά τη διεργασία μορφοποίησης, αυξάνει τη διάρκεια ζωής του εργαλείου και μειώνει την ποσότητα του λιπαντικού. Εφαρμόστηκε Q-switched Nd:YAG laser σε εργαλειογάλυβα M3 (S653, DIN 1.3344) με σκοπό τη δημιουργία καλά οριοθετημένων μικρό-πόρων στην επιφάνεια οι οποίοι μπορούν να δράσουν σαν μικρό-δεξαμενές λιπαντικών καθώς και σαν μικρό-συλλέκτες φθορών.

Για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διεργασίας τροποποίησης με laser, έγινε συστηματική έρευνα με χρήση παλμών διάφορων ενεργειών, διαφορετικών αριθμών παλμού και δύο συστήματα εστίασης. Οι μικρο-τροποποιήσεις είναι ευδιάκριτες με οπτικό μικροσκόπιο και με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Για τριβολογικές δοκιμές, μία λεπτή στρώση από ορυκτέλαιο τοποθετείται στην τροποποιημένη επιφάνεια. Οι μετρήσεις σε δίσκους κατέδειξαν την επίδραση της τροποποίησης στη διάρκεια ζωής του τριβό-συστήματος.

Η σημασία των τοπογραφικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας στη φθορά, τη τριβή και τη λίπανση, έχει γίνει σημείο αναφοράς από αρκετούς ερευνητές, μηχανικούς και βιομηχανικούς κατασκευαστές. Η λειτουργική απόδοση των εργαλείων και των εξαρτημάτων μπορεί να ποικίλει με βάση ποια χαρακτηριστικά επικρατούν στην επιφάνεια. Για παράδειγμα, η διεργασία μορφοποίησης μετάλλων περιλαμβάνει τη μεταβίβαση υψηλών δυνάμεων λόγω τριβής στην αλληλεπίδραση μεταξύ του εργαλείου και του προς κατεργασία τεμαχίου. Κατά τη διάρκεια της μορφοποίησης του τεμαχίου λαμβάνει χώρα σημαντική ολίσθηση μεταξύ των επιφανειών του τεμαχίου και του εργαλείου.

Η διαδικασία μορφοποίησης συχνά συνοδεύεται από φθορά και μεταφορά υλικού. Αν το υλικό προσκολληθεί στην επιφάνεια του εργαλείου σχηματίζεται ένα επικαλυπτικό στρώμα το οποίο σκληραίνει και συνεπώς αλλάζει την τοπογραφία του εργαλείου. Αυτό συνεπάγεται αυξημένη τριβή στην κοινή επιφάνεια μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου γεγονός που μειώνει τη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Επιπλέον, η προσκόλληση μπορεί να οδηγήσει σε ένα μη επιθυμητό υποβαθμισμένο προϊόν παραγωγής το οποίο να περιέχει ραβδώσεις στην επιφάνεια, εγκοπές και χαραγές.

Η χρήση μεταλλικού ελάσματος με καθορισμένη τοπογραφία επιφάνειας θεωρείται το υψηλότερο επίπεδο επιστήμης. Υπάρχει αρκετή πειραματική βιβλιογραφία η οποία εξετάζει την απόδοση της τοπογραφίας της επιφάνειας ενός τροποποιημένου τεμαχίου σε επιλεγμένες διεργασίες μορφοποίησης [140,141,142].

Είναι εφικτός ο έλεγχος της τριβής σε επιθυμητά επίπεδα μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού της τοπογραφίας της επιφάνειας του εργαλείου. Έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία στη βελτιστοποίηση της λίπανσης της κοινής επιφάνειας μέσω του σχεδιασμού της τοπογραφίας της επιφάνειας των εργαλείων μορφοποίησης. Ο σχεδιασμός αυτός περιλαμβάνει την μικρο-τροποποίηση (microtexture) με σκοπό να επιτευχθεί ένας ικανοποιητικός αριθμός πόρων οι οποίοι να παγιδεύουν μικροσκοπικές ποσότητες λιπαντικού και να παρέχουν τη διατήρησή του στην επιφάνεια. Κατά τη μορφοποίηση, οι πόροι αυτοί, οι οποίοι καλούνται και θύλακες λιπαντικού (lubricant pockets), έχουν την λειτουργικότητα να μεταφέρουν και

ακολουθώς να εκβάλλουν το λιπαντικό στην κοινή επιφάνεια μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου. Επιπλέον, οι πόροι μπορούν να συλλέγουν σωματίδια φθοράς και να τα απομακρύνουν από τη ζώνη μορφοποίησης. Η συνήθης τραχύτητα της επιφάνειας δεν παγιδεύει αποτελεσματικά το λιπαντικό μιας και δεν υπάρχει φυσικός μηχανισμός μέσω του οποίου το λιπαντικό να μπορεί να συγκρατηθεί κατά τη μορφοποίηση του μετάλλου.

Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η ιδανική τοπογραφία της επιφάνειας αποτελείται από μία σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή μικροσκοπικών πόρων όπου ο κάθε ένας έχει γεωμετρικές διαστάσεις παρόμοιες με τους γειτονικούς του. Τέσσερις διεργασίες είναι επί του παρόντος σε εμπορική χρήση για τη τροποποίηση των επιφανειών: η μηχανική διεργασία, η λιθογραφική διεργασία, η διεργασία με δέσμης ενέργειας και η διεργασία με επικαλυπτικό στρώμα. Μερικά παραδείγματα από διαφορετικές τεχνικές τροποποίησης συνοψίζονται στο πίνακα 4.4.1.1.

Πίνακας 4.4.1.1. Διάφορες Διεργασίες για τροποποίηση Λειτουργικών Συμπαγών Επιφανειών.

Μηχανική Διεργασία	Λιθογραφική Διεργασία	Διεργασία με Δέσμη Ενέργειας	Διεργασία με Επικάλυψη
Λείανση (grinding)	Χημική	Δέσμη Laser	Φυσική Απόθεση Ατμού (Physical vapor deposition (PVD))
Σφαιροβολή (shotblasting)	Ηλεκτροχημική	Δέσμη Ηλεκτρονίων	Χημική Απόθεση Ατμού (Chemical vapor deposition CVD)
Χάραξη (engraving)	Δέσμη Ιόντος	Ηλεκτρική Εκκένωση	Ηλεκτροχημική Απόθεση Ατμού (Electrochemical deposition ECD)

Η τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας με τη χρήση εστιασμένης δέσμης ενέργειας έχει τη δυναμική να αντικαταστήσει σε συγκεκριμένες εφαρμογές κάποιες άλλες τεχνικές όπως της χαμηλού κόστους μηχανικές. Η χρήση δέσμης laser κατά τη διεργασία επιτρέπει τη δημιουργία τοπογραφικών χαρακτηριστικών σε σχεδόν κάθε υλικό όπως τα μέταλλα, το γυαλί, τα κεραμικά και τα πολυμερή [143-147].

Οι εστιασμένες δέσμες παλμικού laser μπορούν να δημιουργούν κοιλότητες στην επιφάνεια, οι οποίες περιβάλλονται από ένα λείο δακτύλιο ή από στερεοποιημένο τήγμα, χωρίς φυσική επαφή. Η τοπογραφία των πόρων είναι αναπαραγωγίσιμη και μπορεί να ρυθμιστεί μεταβάλλοντας τις παραμέτρους αλληλεπίδρασης, όπως ενέργεια δέσμης, κατανομή έντασης, μορφή και διάρκεια παλμού. Η διεργασία με laser μπορεί να εκτελεστεί είτε με άμεση εστίαση στην επιφάνεια είτε με χρήση μάσκας αποβολής μετά την ανάπτυξη της δέσμης. Η προσπίπτουσα ενέργεια και ο χρόνος αλληλεπίδρασης μεταξύ της δέσμης laser και της υπό κατεργασία επιφάνειας καθορίζουν τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα:

Ένα μεγάλο εύρος διεργασιών μπορεί να προκληθεί από τοπική θέρμανση μέχρι να γίνει η πολύ ακριβής απομάκρυνση του υλικού, χωρίς να επηρεαστούν οι περιβάλλοντες ζώνες, όταν χρησιμοποιηθούν πάρα πολύ μικροί παλμοί δέσμης laser. Η χρήση πάρα πολύ μικρών παλμών laser σε εύρος χρόνου υπομικροσκοπικής κλίμακας έγινε με σκοπό τη δημιουργία διαφόρων μικροδομών σε διαφορετικά υλικά [148].

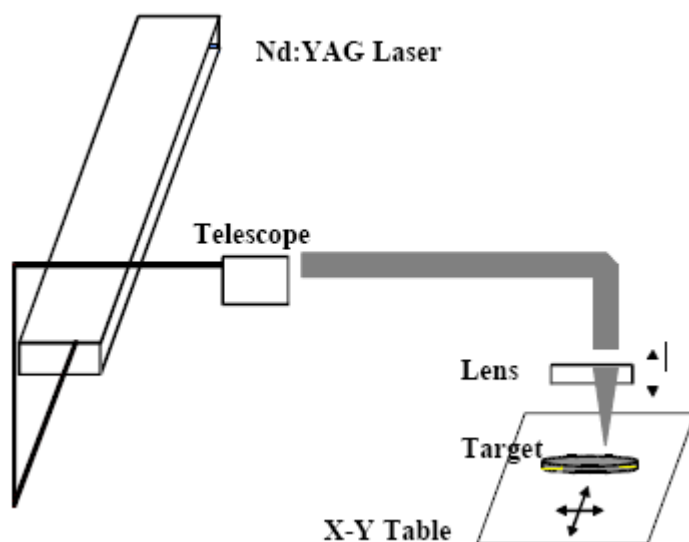
Αυτός ο τύπος laser έχει έλλειψη αποδοτικότητας για τη δημιουργία πρότυπου δείγματος επιφανειών και είναι ιδιαίτερα ακριβός.

Ο σκοπός της μελέτης αυτής είναι να ερευνηθούν οι πιθανότητες της εφαρμογής Nd:YAG laser για μικρο-τροποποίηση του εργαλείοχάλυβα M3 (S653) με σκοπό τη βελτίωση των τριβολογικών του ιδιοτήτων. Η μικρο-τροποποίηση της λειτουργικής επιφάνειας των εργαλείων προσφέρει τη δυνατότητα μείωσης της φθοράς και της

τριβής κατά τη διεργασία μορφοποίησης, αυξάνει τη διάρκεια ζωής του εργαλείου και μειώνει την σημαντικότητα του λιπαντικού.

4.4.2 Πειραματικό Στάδιο

Σε αυτή τη μελέτη εφαρμόζεται το Q-switched Nd:YAG laser (Σχήμα 4.4.2.1).



Σχήμα 4.4.2.1. Πειραματική εγκατάσταση για μικρο-τροποποίηση με laser των χαλύβδινων δειγμάτων.

Το μέγεθος του στίγματος της εστιασμένης δέσμης εξαρτάται από το εύρος, την ποιότητα της αρχική δέσμης και την εστιακή απόσταση του εστιάζοντος στοιχείου. Η παρακολούθηση της εφαρμογής της δέσμης laser έγινε με ένα τηλεσκόπιο με μεταβαλλόμενη μεγέθυνση. Η τροποποίηση έλαβε χώρα με παλμούς ενέργειας μεταξύ 20-350 μJ . Επίσης ερευνήθηκε η επίδραση της αύξησης της ενέργειας του παλμού καθώς και το αποτέλεσμα της εφαρμογής πολλαπλών παλμών laser στο ίδιο σημείο. Χρησιμοποιήθηκαν δύο συστήματα εστίασης για να επιτευχθεί υψηλός λόγος διαστάσεων τροποποίησης με την ελάχιστη δυνατή τηγμένη περιφέρεια.

Οι μικρο-τροποποιήσεις παρατηρούνται μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και μικροσκοπίου ατομικής δύναμης. Η θερμική επίδραση στο κύριο όγκο του υλικού λόγω της απορρόφησης ενέργειας του laser καθορίζεται από μετρήσεις νανο-σκληρότητας.

Η τριβολογική απόδοση των μικρο-τροποποιημένων χαλύβδινων επιφανειών αποτιμήθηκε μέσω τριβόμετρου γεωμετρίας επίπεδο προς επίπεδο (flat on flat geometry). Τα πλακίδια του ηλεκτρονικού κυκλώματος (chips) είναι κατασκευασμένα από σκληρυμένο χάλυβα διαστάσεων 4x4 mm. Όλα τα τροποποιημένα με laser M3 χαλύβδινα δείγματα έχουν διάμετρο 20mm και πάχος 5mm. Για τις δοκιμές τριβής χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω συνθήκες:

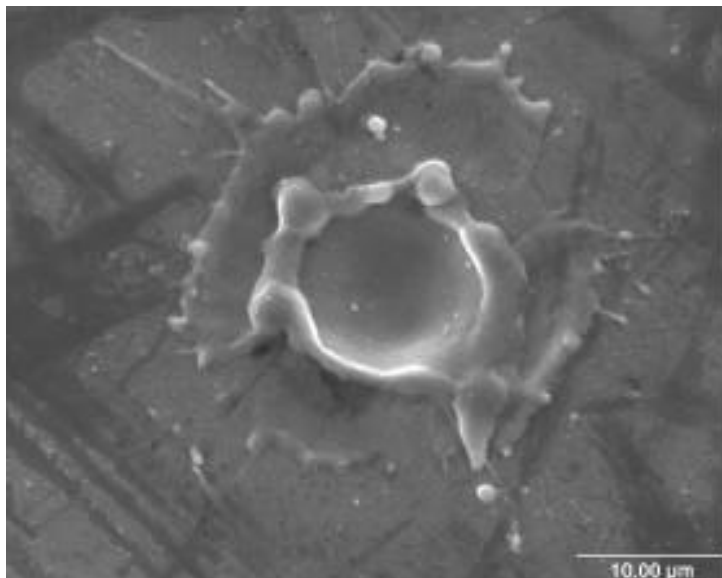
- Ταχύτητα ολίσθησης 5cm/sec,
- Κάθετη δύναμη 20N,
- Θερμοκρασία $22^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$,
- Σχετική υγρασία περιβάλλοντος $50 \pm 5\%$.

Τροποποίηση της Τραχύτητας Επιφανειών με χρήση Laser (Laser Surface Texturing)

Το λιπαντικό κατά τη δοκιμή είναι ορυκτέλαιο με δυναμικό ιξώδες 96cP. Η λίπανση των δειγμάτων του χάλυβα έγινε μέσω τεχνικής ψεκασμού, παρέχοντας έτσι ποσότητα λιπαντικού 0.05g σε κάθε δείγμα. Οι δοκιμές τριβής διακόπτονται αυτόματα μόλις ο συντελεστής τριβής λάβει την οριακή τιμή $\mu_{\min}=0.3$

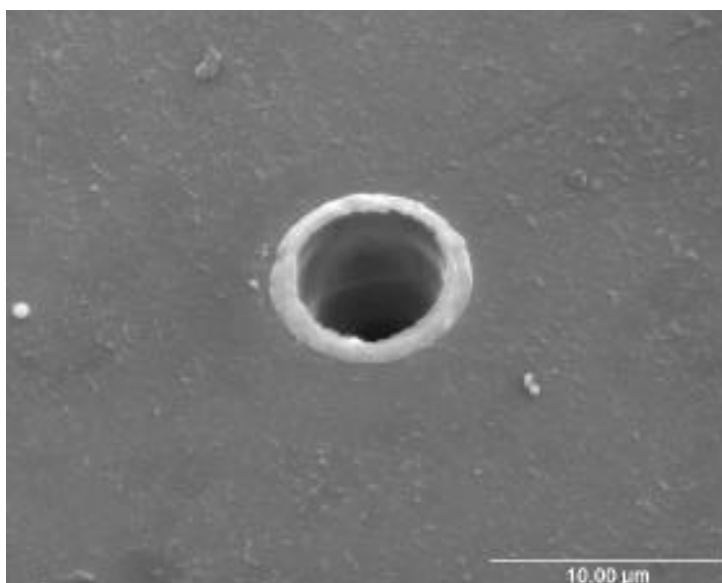
4.4.3 Αποτελέσματα

Οι έρευνες, με χρήση διαφορετικών συστημάτων εστίασης, με αριθμητικό διάφραγμα φακού από $0.1 \div 0.4$, λαμβάνουν χώρα με σκοπό την εύρεση του κατάλληλης διαμόρφωσης που θα παρέχει δακτυλιοειδείς πόρους ή κρατήρες με τηγμένη περιφέρεια που να έχει το ελάχιστο δυνατό ύψος. Ένα παράδειγμα ανεπιθύμητης μορφής κρατήρα φαίνεται στο Σχήμα 4.4.3.1.



4.4.3.1 Εικόνα μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) μη επιθυμητού κρατήρα σε μία χαλύβδινη επιφάνεια

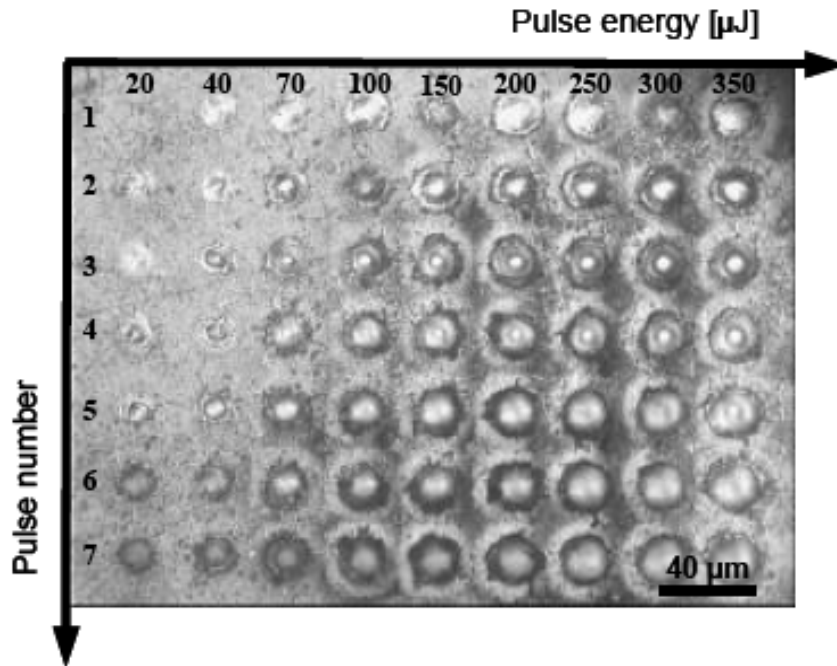
Ο κρατήρας αυτός επιτεύχθηκε με ζεύγος συστήματος εστίασης, εστιακού μήκους 100mm (N.A. =0.2), το εύρος της δέσμης είναι 9.1mm και ο λόγος μεταξύ της μέγιστης ενέργειας πυκνότητας και της οριακής τιμής αποβολής υλικού είναι 2.4. Ένας καταλληλότερος κρατήρας που έχει ληφθεί με ένα σύστημα αντικειμενικών φακών με N.A.=0.25 φαίνεται στο Σχήμα 4.4.3.2.



4.4.3.2 Εικόνα μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) μη επιθυμητού κρατήρα σε μία χαλύβδινη επιφάνεια

Το εύρος της δέσμης είναι 5.2μm και ο λόγος που αναφέραμε παραπάνω είναι 7.5. Το εύρος της δέσμης εκτιμάται από την κατανομή και τη διάμετρο του κρατήρα που επιφέρει σε διαφορετικά υλικά η χρήση δύο συστημάτων εστίασης.

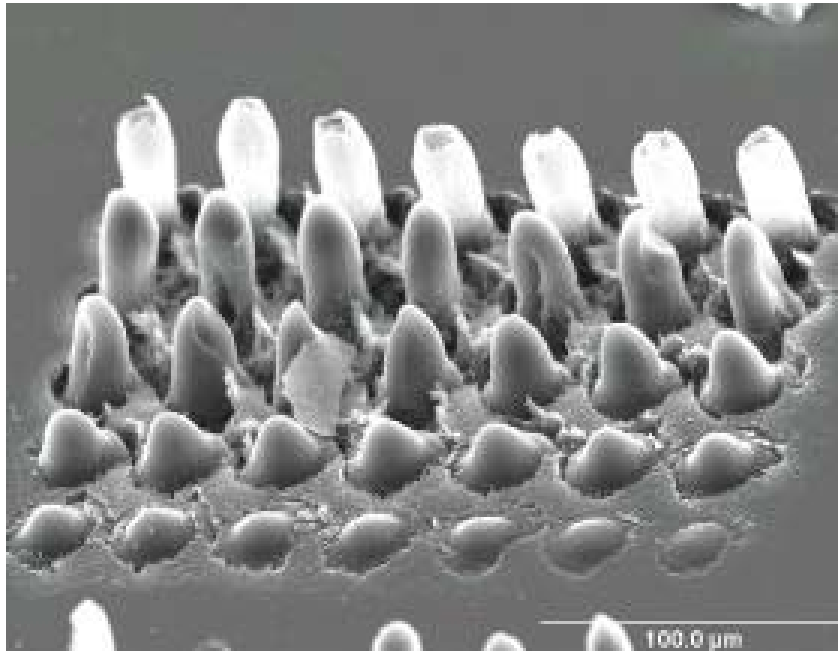
Ερευνήθηκε η επίδραση της αύξησης της ενέργειας του παλμού (Σχήμα 4.4.3.3) καθώς και το αποτέλεσμα εφαρμογής πολλαπλών παλμών δέσμης laser στο ίδιο σημείο εστίασης (spot).



Σχήμα 4.4.3.3. Υφή του κρατήρα σε χαλύβδινη επιφάνεια μέσω εφαρμογής laser. Η μορφολογία του κρατήρα είναι συναρτήσε του αριθμού παλμών laser (1 έως 7) καθώς και της ενέργειας του παλμού (20 έως 350 μJ).

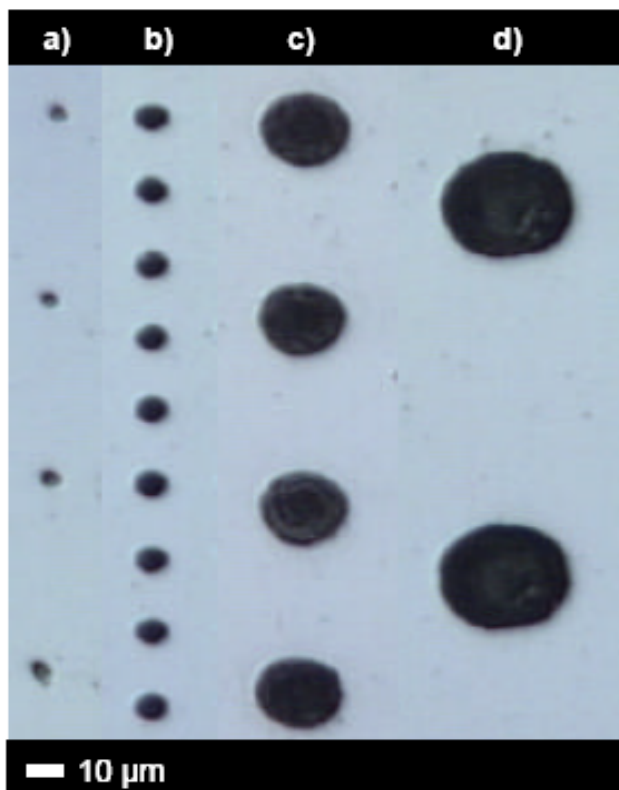
Οι πειραματικές δοκιμές κατέδειξαν ότι μία αύξηση στην ενέργεια του προσπίπτοντος laser αποφέρει μεγαλύτερου βάθους μικροπόρους μέχρι την τιμή κορεσμού. Πολλαπλός παλμός αποβολής υλικού με βελτιστοποιημένη ενέργεια οδηγεί σε επακριβή έλεγχο του βάθους της αποβολής.

Το σχήμα, η διάμετρος και το βάθος των κρατήρων μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια με τη χρήση της τεχνικής πιστών αντιγράφων. Για πλαστικές αντιγραφές χρησιμοποιείται οξικό άλας μεθυλίου στην τροποποιημένη επιφάνεια σε υγρή μορφή το οποίο αποσπάται μόλις ξηραθεί και εξετάζεται με SEM. Ένα παράδειγμα τροποποίησης ενός τέτοιου κρατήρα φαίνεται στο Σχήμα 4.4.3.4.



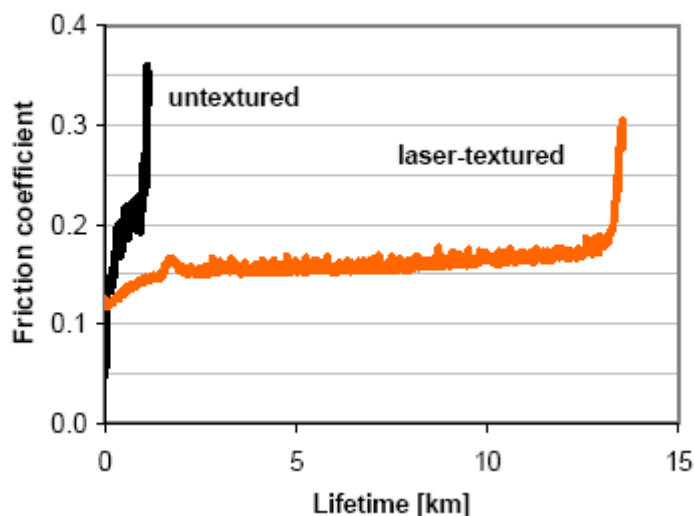
Σχήμα 4.4.3.4 Εικόνα μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) μη επιθυμητής τροποποιημένης επιφάνειας. Οι κρατήρες δημιουργήθηκαν με ενέργεια παλμού 200μJ και ποικίλο αριθμό παλμών.

Για τις τριβολογικές δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν ορθογώνια δείγματα πόρων με διάφορα μεγέθη και βάθους των πόρων. Η διάμετρος και το βάθος των δακτυλοειδών πόρων κυμαίνονται από 5÷50μm και 5÷20μm αντίστοιχα (Σχήμα 4.4.3.5).



Σχήμα 4.4.3.5 Τροποποιημένη χαλύβδινη επιφάνεια με πόρους διάφορων διαστάσεων: a) 5 μm, b) 10 μm, c) 25 μm, d) 50 μm.

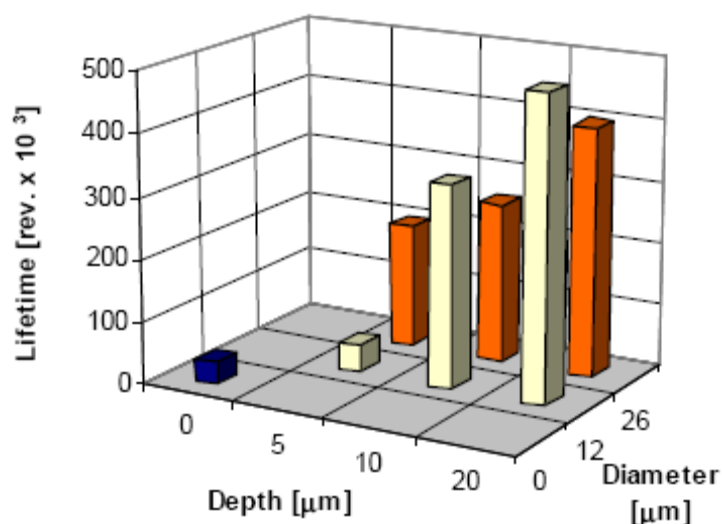
Οι μικρο-τροποποιήσεις επηρεάζουν σημαντικά το συντελεστή τριβής. Στο Σχήμα 4.4.3.6 βλέπουμε την εξέλιξη του συντελεστή τριβής όπως καταγράφηκε κατά τη διάρκεια των τριβολογικών δοκιμών για τροποποιημένο και μη τροποποιημένο χαλύβδινο δείγμα.



Σχήμα 4.4.3.6 Συντελεστής τριβής συναρτήσει της διάρκειας ζωής για τροποποιημένα και μη τροποποιημένα χαλύβδινα δείγματα.

Η καμπύλη τριβής των μη τροποποιημένων δειγμάτων ξεκινάει από την αρχική τιμή 0.05. μετά από μικρό χρονικό διάστημα αυξάνει ραγδαία και ο συντελεστής τριβής ξεπερνάει την οριακή τιμή 0.3. Για την περίπτωση των τροποποιημένων με laser δειγμάτων μπορούμε να παρατηρήσουμε μια πιο ομαλή ανάπτυξη της τριβής. Κατά το τέλος της διάρκειας ζωής του δοκιμίου η καμπύλη αυξάνεται ραγδαία μέχρι την οριακή τιμή 0.3. Συνεπώς, η τροποποίηση της επιφάνειας προκαλεί αύξηση της διάρκειας ζωής κατά δέκα φορές σε σχέση με τα μη τροποποιημένα δείγματα.

Η τεχνική με laser προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας τροποποιημένων επιφανειών που να ποικίλουν σε γεωμετρία, μέγεθος και πυκνότητα πόρων. Η επίδραση της διαμέτρου και του βάθους των πόρων εκτιμάται από δοκιμές. Η περιοχή επαφής της επιφάνειας είναι 90% και διατηρείται σταθερή σε όλες τις δοκιμές. Στο Σχήμα 4.4.3.7 βλέπουμε τη διάρκεια ζωής ενός μικρο-τροποποιημένου δείγματος εργαλειοχάλυβα M3 συναρτήσει της διαμέτρου και του βάθους των πόρων. Τα τροποποιημένα δείγματα έχουν σαφέστατα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τα αντίστοιχα μη τροποποιημένα. Για την ίδια διάμετρο πόρου, η διάρκεια ζωής αυξάνεται με αύξηση του βάθους του πόρου. Πόροι της ίδιας διαμέτρου παρέχουν τα ίδια αποτελέσματα ανεξάρτητα από την τιμή της διαμέτρου.

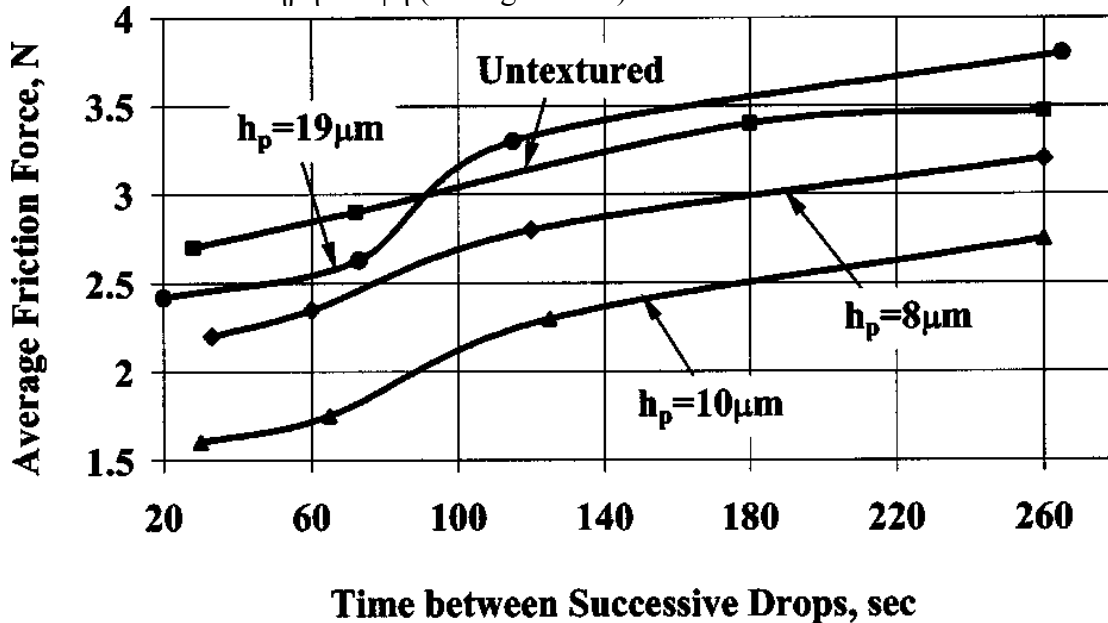


Σχήμα 4.4.3.7 Διάρκεια ζωής ενός μικρο-τροποποιημένου δείγματος εργαλειοχάλυβα M3 συναρτήσει της διαμέτρου και του βάθους των πόρων.

Εν κατακλείδι, χρησιμοποιήθηκε Q-switched Nd:YAG laser για μικρο-τροποποίηση επιφανειών δειγμάτων από M3 εργαλειοχάλυβα με σκοπό την βελτίωση των τριβολογικών τους ιδιοτήτων. Έγινε ο σχεδιασμός ορθογώνιας διάταξης από μικροσκοπικούς πόρους με σκοπό να διατηρούν το λιπαντικό εντός της επιφάνειας αλληλεπίδρασης. Αυτού του είδους η τροποποίηση παρέχει ένα δίκτυο συμπαγούς πορώδους. Παρατηρήθηκε ότι οι πόροι μειώνουν την τριβή και αυξάνουν τη διάρκεια ζωής σε σχέση με τα μη τροποποιημένα δείγματα. Επομένως η τροποποίηση με laser λειτουργικών επιφανειών δίνει τη δυνατότητα της βελτίωσης των τριβολογικών τους ιδιοτήτων, την επίτευξη μεγαλύτερης διάρκειας ζωής, και την αποτελεσματική λίπανση με τις ελάχιστες δυνατές ποσότητες λιπαντικού.

4.5 Εφαρμογές της LST σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης.

Το όφελος από την εφαρμογή LST σε δακτυλίους εμβόλου (piston rings) μελετήθηκε τόσο θεωρητικά [93] όσο και πειραματικά [94]. Υπολογίστηκαν [93] οι βέλτιστες παράμετροι για την ελάχιστη δύναμη τριβής σε πλήρως τροποποιημένους δακτυλίους και βρέθηκε μείωση 30% σε σχέση με μη τροποποιημένους δακτυλίους υπό συνθήκες πλήρους λίπανσης. Επιπλέον βρέθηκε ότι η βέλτιστη τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας είναι ευεργετική και υπό συνθήκες έλλειψης λίπανσης μιας και οι κοιλότητες λειτουργούν σαν μικρές δεξαμενές κατακράτησης λιπαντικών. Στο Σχήμα 4.5.1. βλέπουμε τα αποτελέσματα [94] για κατάσταση πλήρους τροποποίησης της επιφάνειας που έχει εφαρμοστεί σε δείγματα που προσομοιώνουν δακτυλίους εμβόλου, όπου οι συνθήκες κυμαίνονται από κατάσταση πλήρους λίπανσης έως κατάσταση έλλειψης λίπανσης μέσω του ελέγχου της ροής του λιπαντικού σε ολισθηρή επαφή (sliding contact).



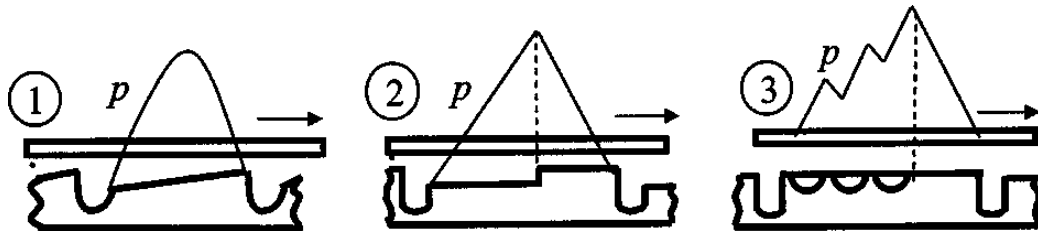
Σχήμα 4.5.1 Επίδραση της έλλειψης λίπανσης στη Μέση Δύναμη Τριβής για διάφορα βάθη κοιλοτήτων h_p .

Το πείραμα έγινε λιπαίνοντας σταγόνα σταγόνα και μεταβάλλοντας το χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών σταγόνων. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι το όφελος από τη χρήση της LST είναι η μείωση της τριβής, τόσο σε κατάσταση πλήρους λίπανσης που χαρακτηρίζεται από το πέρας 30 sec μεταξύ δύο διαδοχικών σταγόνων, όσο και σε κατάσταση έλλειψης λίπανσης που χαρακτηρίζεται από το πέρας 260sec μεταξύ δύο διαδοχικών σταγόνων.

Η χρήση της LST για το σχηματισμό μικρο-αυλακώσεων σε χιτώνια κυλίνδρων (cylinder liners) σε μηχανές εσωτερικής καύσεως είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί η κατανάλωση και η τριβή. Η τεχνική αυτή που ονομάζεται "ακόνισμα με laser" (laser honing), είναι τώρα εμπορικά διαθέσιμη από την Gehring Company στη Γερμανία [96].

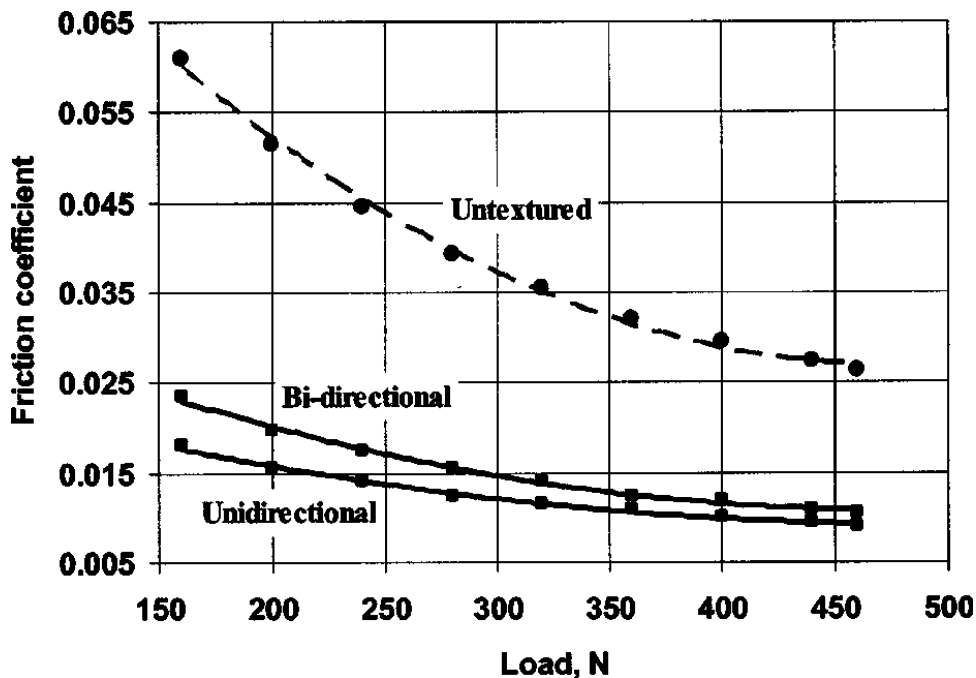
Η ανάλυση της LST σε υδροδυναμικά ωστικά έδρανα (hydrodynamic thrust bearings) των παράλληλων ολισθηρών δίσκων [97] έδειξε την προοπτική και τη δυναμική της LST σε αυτήν την εφαρμογή. Αυτοί οι τριβείς (bearings) συναντώνται συνήθως σε μη στεγανωτικές αντλίες μαγνητικών δίσκων (magnetic drive seal-less pumps) όπου το διερχόμενο ρευστό λειτουργεί ως λιπαντικό για τους τριβείς των αντλιών (pump bearings). Βρέθηκε ότι μερική τροποποίηση της επιφάνειας με LST

μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη χωρητικότητα μεταφοράς φορτίου αυτών των τριβέων και να τα κάνει συγκρίσιμα με μειωμένης διατομής ολισθητήρες ή με βαθμιδωτούς ολισθητήρες. Το σκεπτικό της δημιουργίας χωρητικότητας μεταφοράς φορτίου καταδεικνύεται στο Σχήμα 4.5.2.



Σχήμα 4.5.2 Τυπική κατανομή πίεσης σε τρία συστήματα τριβέων ολίσθησης . 1-plane slider 2-stepped slider 3-textured slider.

Το τροποποιημένο τμήμα του ολισθητήρα (slider) παρέχει σημαντικά μεγαλύτερη χάρη-διάκενο από ότι το μη τροποποιημένο τμήμα και γι αυτό ο ολισθητήρας συμπεριφέρεται ως βαθμιδωτός ολισθητήρας. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι σε νερό σε 1500rpm και 3000rpm [98] ο τροποποιημένος τριβέας λειτουργεί με διάκενο που είναι τρεις φορές μεγαλύτερο και τριβή που είναι τρεις φορές μικρότερη από την περίπτωση του τριβέα που η επιφάνεια του είναι μη τροποποιημένη, για όλο το εύρος των φορτίων που δοκιμάστηκαν. Στο Σχήμα 4.5.3 φαίνεται η συμπεριφορά των τροποποιημένων και των μη τροποποιημένων τριβέων.



Σχήμα 4.5.3 Σύγκριση του Συντελεστής Τριβής συναρτήσει του φορτίου για μερικώς τροποποιημένο, μη κατευθυνόμενο και διπλής κατεύθυνσης τριβέα σε σχέση με ένα μη τροποποιημένο.

Η τροποποίηση της τραχύτητας με laser χρησιμοποιείται εκτενώς στη μορφοποίηση μετάλλων (metal forming) σα μέσο δευτερεύοντος μηχανισμού υδροδυναμικής λίπανσης, ο οποίος καλείται micro-pool ή micro-plastic hydrodynamic lubrication [99]

4.6 Τροποποίηση της Τραχύτητας της Επιφάνειας με χρήση Laser για εξαρτήματα Αυτοκινητοβιομηχανίας.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μία εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της δομής της μικρό-επιφάνειας (micro-surface structure) που δημιουργείται από την τροποποίηση της τραχύτητας με laser με σκοπό τη βελτίωση των τριβολογικών ιδιοτήτων παλινδρομικών αυτοκινούμενων εξαρτημάτων. Θα γίνει περιγραφή του εξοπλισμού με τον οποίο θα γίνουν οι δοκιμές καθώς και των δειγμάτων και θα παρουσιαστούν κάποια από τα αποτελέσματα αυτά. Βρέθηκε ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων και των θεωρητικών προβλέψεων για τη μείωση της τριβής στο δείγμα. Επίσης θα γίνει αναφορά για το πιθανό όφελος από την εφαρμογή της τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας με χρήση laser υπό συνθήκες έλλειψης λίπανσης. Τέλος, θα καταδειχθεί η μείωση της τριβής τόσο σε δακτυλίους εμβόλων (piston rings) όσο και σε χιτώνια κυλίνδρων (cylinder liners).

4.6.1 Εισαγωγή

Η ποσοτική εκτίμηση των απωλειών τριβής στο αρχικό στάδιο σχεδιασμού μίας μηχανής εσωτερικής καύσης είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας, ο οποίος καθορίζει τόσο την οικονομία στο καύσιμο όσο και την απόδοση του αυτοκινήτου. Η ανάλυση που έγινε [123] δείχνει τη σημασία διάφορων συνιστωσών στις τελικές απώλειες τριβής σε μία μηχανή και την επιρροή του σχεδιασμού και άλλων μεταβλητών στις απώλειες αυτές. Συγκεκριμένα, το σύστημα εμβόλου –κυλίνδρου είναι υπεύθυνο για ένα μεγάλο μέρος των συνολικών απωλειών τριβής σε μία μηχανή. Αρκετοί ερευνητές [124,125,126] αντιμετώπισαν το ζήτημα της τριβής και κατέληξαν στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Περίπου 50% των απωλειών τριβής μίας μηχανής εσωτερικής καύσης οφείλονται στο σύστημα εμβόλου –κυλίνδρου, από τις οποίες το 70-80% προέρχεται από τους δακτυλίους εμβόλων (piston rings).
- Η συμβολή της παρυφής του εμβόλου (piston skirt) στις συνολικές απώλειες τριβής του συστήματος εμβόλου –κυλίνδρου ίσως αυξηθεί εάν το διάκενο (clearance) μεταξύ του εμβόλου και του χιτωνίου κυλίνδρου (cylinder liner) μειωθεί και η συχνότητα επαφών μεταξύ τους αυξηθεί.

Η κατάλληλη λίπανση και η τραχύτητα της επιφάνειας είναι σημαντικότερα θέματα στη μείωση της τριβής ενός συστήματος εμβόλου –κυλίνδρου.

Επιστήμονες [127] εξέτασαν θεωρητικά και πειραματικά την επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας στη λίπανση μεταξύ ενός δακτυλίου εμβόλου και ενός χιτωνίου κυλίνδρου. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας εμφανίζεται στην αύξηση της δύναμης τριβής με την μείωση του πάχους της λεπτής μεμβράνης πριν λάβει χώρα η ανεπαίσθητη επαφή.

Η τριβή στο χιτώνιο του δακτυλίου μετρήθηκε [128] σε μία κεφαλή κυλίνδρου μηχανής αυτοκινήτου χωρίς πίεση στο κύλινδρο. Οι μετρήσεις της τριβής επισήμαναν τη σημασία της μεικτής λίπανσης στην επαφή του χιτωνίου του δακτυλίου για χαμηλές ταχύτητες ή για χαμηλό ιξώδες λιπαντικού. Βρέθηκε ότι επιλέγοντας κατάλληλη τραχύτητα ή χρησιμοποιώντας λάδι με συγκεκριμένο βελτιωτικό δείκτη ιξώδους, μπορούν να μειωθούν σημαντικά οι απώλειες τριβής.

Ο Nakada [129] εξέτασε διάφορες μεθόδους για τη βελτίωση της οικονομίας στο καύσιμο και τη μείωση των απωλειών τριβής σε μηχανή εσωτερικής καύσης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μείωση του συντελεστή τριβής, η οποία μπορεί να επιτευχθεί μέσω κατεργασίας της επιφάνειας νέας τεχνολογίας, τόσο στην επιφάνεια του εμβόλου, όσο και στην επιφάνεια του δακτυλίου του εμβόλου. Κάποιες από αυτές

τις κατεργασίες επέδειξαν συντελεστή τριβής χαμηλότερο από αυτόν για επιμετάλλωση με χρώμιο η οποία είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη για συμβατικούς δακτυλίους εμβόλων.

Η κατεργασία της ολισθηρής επιφάνειας του δακτυλίου εμβόλου επηρεάζει τη φθορά και το γδάρσιμο της επιφάνειας. Η ανάπτυξη μίας νέας μεθόδου κατεργασίας της επιφάνειας που να μπορεί να ικανοποιήσει τις δύο απαιτήσεις, της χαμηλής τριβής και καλής συμπεριφοράς στη φθορά, είναι ένα αρκετά σημαντικό θέμα.

Αρκετοί ερευνητές ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη δοκιμών και μεθόδων για τη μέτρηση της τριβής δακτυλίων εμβόλου καθώς και με μετρήσεις του πάχους λεπτού στρώματος από λάδι. Ο Ting [130] ανέπτυξε μία μέθοδο με σκοπό τη δημιουργία δεδομένων για το συντελεστή τριβής δακτυλίου εμβόλου, και την παρουσίαση βασικών τριβολογικών μελετών σε διάφορα εξαρτήματα της μηχανής.

Μετρήθηκε η τριβή του δακτυλίου εμβόλου ενώ διατηρήθηκε ένα ρεαλιστικό μήκος στη διαδρομή εμβόλου μηχανής κατά τη συμπίεση του δακτυλίου και την ελεύθερη κίνησή του κατά την επαναφορά. Τα δείγματα δακτυλίου και χιτωνίου ήταν προετοιμασμένα για μηχανές παραγωγής ώστε να διασφαλίσουν ρεαλιστική τελειοποίηση της επιφάνειας και μεταλλουργία των υλικών. Η δύναμη τριβής μετρήθηκε με ένα στοιχείο φορτίου (load cell) πάνω σε ένα μετατοπιζόμενο χιτώνιο ή στο υποστήριγμα του παλινδρομικού δακτυλίου. Με την ανάκτηση των δεδομένων και την ανάλυση του συστήματος, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μία καμπύλη του συντελεστή τριβής που έχει τη μορφή θηλιάς Stribeck (looping type Stribeck) και είναι άμεσα εφαρμόσιμη για εκτίμηση των απωλειών τριβής της μηχανής.

Οι Dearlove και Cheng [131] δημιούργησαν ένα μηχανισμό δοκιμών στον οποίο η τριβή ενός δακτυλίου εμβόλου μετρήθηκε μέσω ενός τομέα του μετατοπιζόμενου χιτωνίου. Το πάχος του λεπτού στρώματος από λάδι μετρήθηκε ταυτόχρονα στη μέση της διαδρομής του εμβόλου μηχανής με χρήση της μεθόδου LIF (Laser Induced Fluorescence). Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν, για όλα τα λιπαντικά που δοκιμάστηκαν, αύξηση του συντελεστή τριβής για αύξηση του φορτίου ή για μείωση του ιξώδους του εμβόλου. Παρατηρήθηκαν καταστάσεις τόσο μεικτής όσο και υδροδυναμικής λίπανσης.

Πρόσφατα παρουσιάστηκε μία νέα ιδέα για περαιτέρω μείωση της τριβής σε μηχανικά εξαρτήματα. Βασίζεται στη χρήση δομής μικρό-επιφανειών για το σχηματισμό μικρό-κοιλοτήτων όπως αυτές εμφανίζονται από την τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας με laser. Η κάθε μικρό-κοιλότητα δρά ως μικρό-υδροδυναμικός τριβέας που αυξάνει την υδροδυναμική λίπανση. Παρουσιάστηκαν θεωρητικά μοντέλα αεροστεγών στεγανωτικών τροποποιημένα με laser [132,133] καθώς και πειραματική επιβεβαίωσή τους [132,134]. Η χωρητικότητα μεταφοράς φορτίου που παρέχει κάθε μικρό-κοιλότητα οφείλεται στην κατανομή της ασύμμετρης υδροδυναμικής πίεσης σε όλο το μήκος της κοιλότητας, η οποία οφείλεται στην τοπική δημιουργία κοιλοτήτων στην απομακρυσμένη περιοχή μέσα στη κοιλότητα.

Παρουσιάστηκε ένα θεωρητικό μοντέλο λίπανσης και τριβής μεταξύ επίπεδων δακτυλίων εμβόλου τροποποιημένων με laser, και χιτωνία κυλίνδρων [135]. Η ανάλυση έδειξε ότι οι κύριες γεωμετρικές παράμετροι της τροποποίησης της τραχύτητας με laser που επηρεάζουν την τριβή μεταξύ ενός δακτυλίου εμβόλου και ενός χιτωνίου κυλίνδρου είναι ο λόγος του βάθους της κοιλότητας προς τη διάμετρό της, και η πυκνότητα της περιοχής των κοιλοτήτων. Κάποια προκαταρκτικά πειραματικά αποτελέσματα τα οποία δείχνουν τη δυναμική της LST σε παλινδρομικά συστήματα όπως στο σύστημα εμβόλου-κυλίνδρου παρουσιάζονται στο [136].

Η αξιόπιστη λειτουργία της μηχανής υπό κατάσταση έλλειψης λίπανσης στις επαφές μεταξύ εμβόλου, δακτυλίου εμβόλου και ενός χιτωνίου κυλίνδρου είναι ένα

σημαντικό ζήτημα για τα μελλοντικά υβριδικά αυτοκίνητα όπου πολυάριθμα συμβάντα έναρξης-τερματισμού θα λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια ζωής της μηχανής. Οι LST τροποποιημένες επιφάνειες θα έχουν ικανότητα κατακράτησης του λαδιού η οποία θα προστατεύει τις ολισθηρές επιφάνειες έναντι της εμπλοκής. Παρακάτω θα γίνει η περιγραφή ενός ειδικού μηχανήματος δοκιμής (special test rig) το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει τα παλινδρομικά εξαρτήματα αυτοκινήτου και να μελετήσει την επίδραση της τροποποίησης της τραχύτητας στην τριβή υπό καταστάσεις τόσο πλήρους όσο και έλλειψης λίπανσης. Οι δοκιμές έγιναν για δύο διαφορετικές αντιπροσωπευτικές διατάξεις.

- Επίπεδες επιφάνειες.
- Τμήμα δακτυλίου εμβόλου με τμήμα χιτωνίου κυλίνδρου.

4.6.2 Περιγραφή Συστήματος Δοκιμής (test rig).

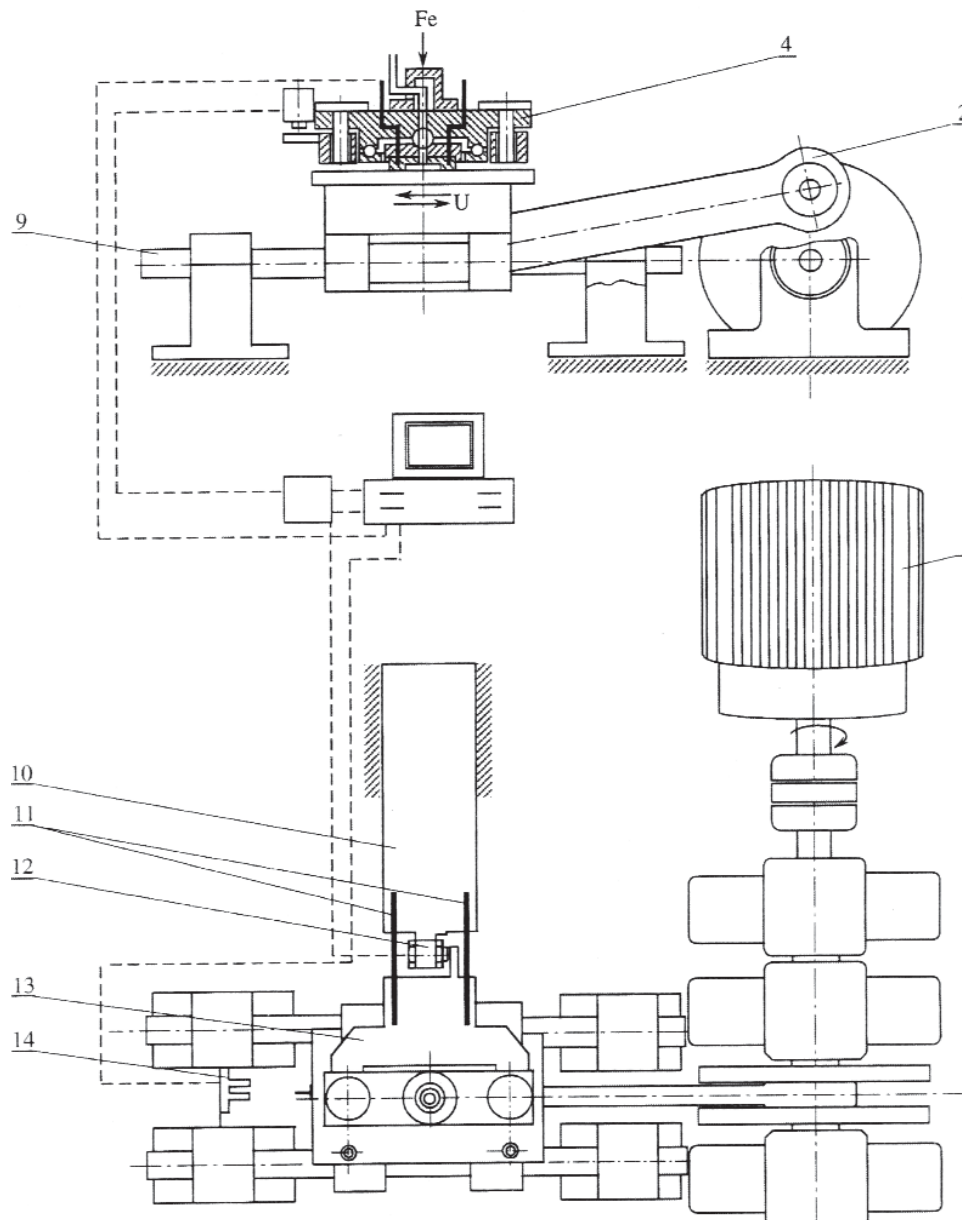
Το σύστημα δοκιμής (test rig) σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μετρά τη δύναμη τριβής, τη φθορά και τη θερμοκρασία της επιφάνειας. Έχει τις παρακάτω μέγιστες δυνατότητες:

Μέση ταχύτητα παλινδρομικής κίνησης	5 m/s
Ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα	1500 r.p.m.
Διαδρομή του εμβόλου κυλίνδρου	0.10 m
Πίεση επαφής μεταξύ ολισθηρών επιφανειών	0.5 MPa

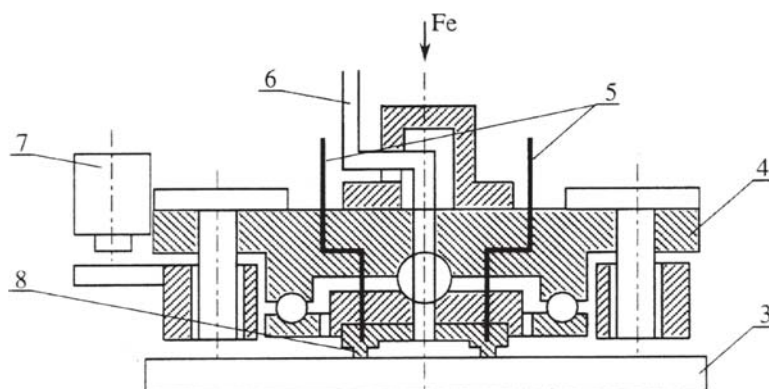
Οι παρακάτω παράμετροι μπορούν να μετρηθούν κατά τη διάρκεια δοκιμών:

1. Δύναμη τριβής.
2. Ταχύτητα κίνησης.
3. Συνήθης δύναμη που εφαρμόζεται στο δείγμα.
4. Θερμοκρασία της επιφάνειας του δείγματος στη ζώνη τριβής.
5. Φθορά ολισθηρών επιφανειών.
6. Ποσότητα ροής του λιπαντικού το οποίο τροφοδοτείται στη ζώνη τριβής.

Τα κύρια δομικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος δοκιμής (test rig) φαίνονται στο Σχήμα 4.6.2.1a και 4.6.2.1b.



Σχήμα 4.6.2.1a Σύστημα δοκιμής (test rig).



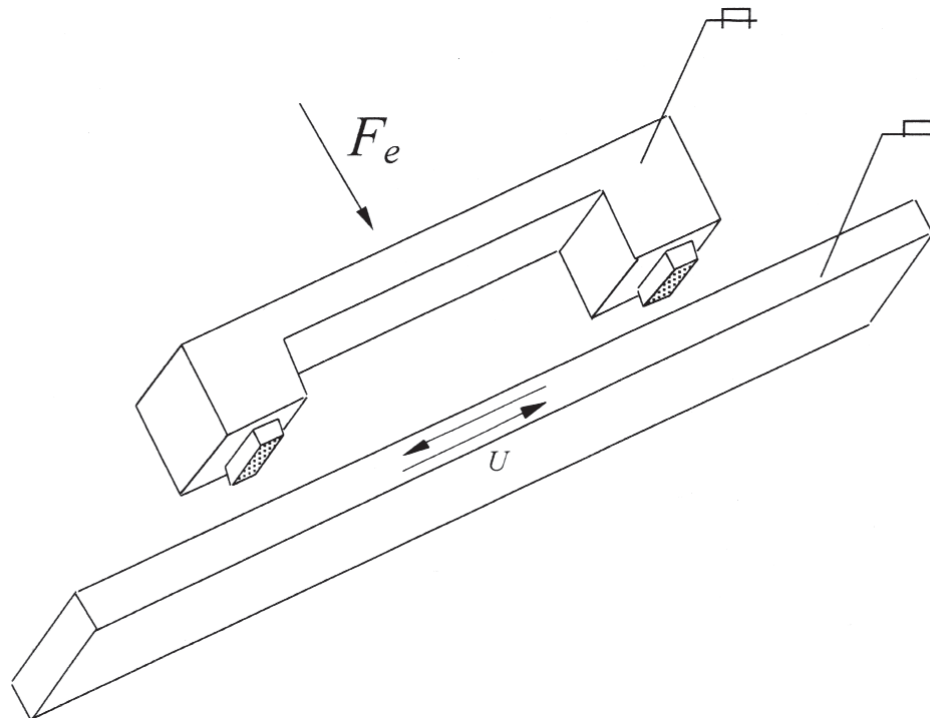
Σχήμα 4.6.2.1b. Αυτό-ευσυγγραμμίζόμενος μηχανισμός συγκράτησης.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας (1) με μεταβαλλόμενη γωνιακή ταχύτητα κατευθύνει τον στρόφαλο του κυλίνδρου (2) ώστε να εξασφαλίσει την παλινδρομική κίνηση της μη

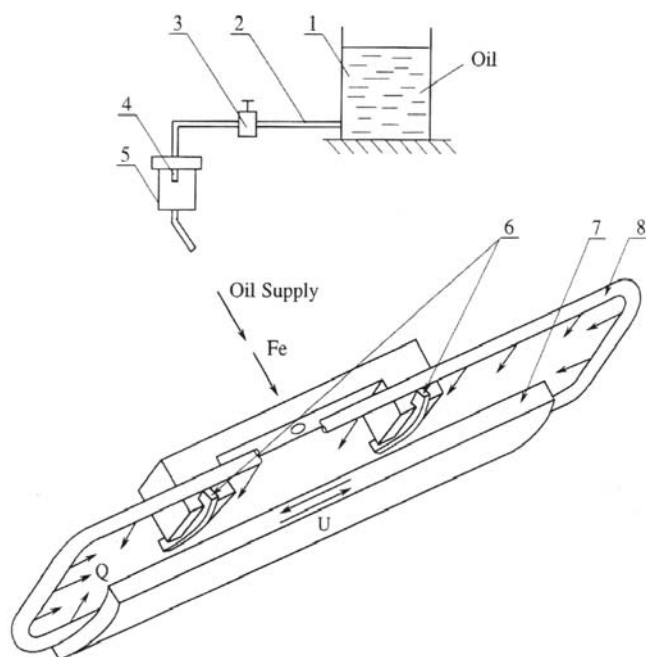
τροποποιημένης επίπεδης πλάκας ή του κυλίνδρου (3) με ταχύτητα U κατά μήκος των δύο οδηγών (9). Σταθεροποιημένα σε μία κοινή βάση και απομονωμένα από τον όροφο του εργαστηρίου μέσω ειδικής ελαστομερούς βάσης στήριξης η οποία ελαττώνει προοδευτικά το πλάτος της ταλάντωσης, έχουμε μείωση της επίδρασης των δονήσεων του μηχανήματος δοκιμών κατά την μέτρηση των παραμέτρων.

Για τη διατήρηση της σταθερότητας, της μακράς διάρκειας ζωής και ακρίβειας της παλινδρομικής κίνησης, παρέχεται ειδικό λιπαντικό και σύστημα ψύξης με κυκλοφορία λαδιού μέσω των κοίλων οδηγών, με σκοπό τη μείωση της τριβής στα γραμμικά έδρανα των οδηγών και την απομάκρυνση της θερμότητας από τις επιφάνειες τριβής των οδηγών. Ένας ειδικά σχεδιασμένος αυτό-ευθυγραμμιζόμενος μηχανισμός συγκράτησης (4) Σχήμα 4.6.2.1b εξασφαλίζει την ευθυγράμμιση των δειγμάτων ή των τμημάτων δακτυλίου εμβόλου (8) σχετικά με τη συμπληρωματική επίπεδη πλάκα ή το τμήμα του χιτωνίου κυλίνδρου αντίστοιχα. Επίσης, επιτρέπει την εφαρμογή ενός συνήθους φορτίου Fe στη συσκευή συγκράτησης (4) καθώς και τον εφοδιασμό με λιπαντικό στη ζώνη επαφής μέσω των σωληνώσεων λαδιού (6), και την απομάκρυνση των καλωδίων των θερμοστοιχείων (5) τα οποία είναι ενσωματωμένα μέσα στη συσκευή συγκράτησης. Ο γειτονικός μεταλλικός ακροδέκτης (7) παρέχει on line μέτρηση της φθοράς των δύο τριβόμενων επιφανειών (3), (8).

Μία ειδική συσκευή σχεδιάστηκε για τη μέτρηση της δύναμης τριβής μέσω ελαστικών δεσμών (11). Οι δέσμες αυτές καθιστούν δυνατή τη μετατόπιση ενός βραχίονα (13), ο οποίος εκτρέπεται λόγω της δύναμης τριβής που δρα μεταξύ των δύο επιφανειών. Ο γειτονικός μεταλλικός ακροδέκτης (12), ο οποίος είναι στερεωμένος μεταξύ του μετατοπισμένου βραχίονα και ενός σταθερού βραχίονα (10) καταγράφει την απόσταση μεταξύ τους ανά μεταβαλλόμενα χρονικά διαστήματα, τα οποία αντιστοιχούν στις μεταβολές της δύναμης τριβής. Η μέση τριβή λαμβάνεται με on line ολοκλήρωση της εξαρτημένης από το χρόνο δύναμης τριβής για ένα κύκλο. Η ανάλυση της μέτρησης της δύναμης τριβής είναι 0.1N και η ακρίβεια 5%. Η μέτρηση της ταχύτητας παλινδρόμησης, συμπεριλαμβανομένης μίας μέσης ταχύτητας και της συχνότητας περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα λαμβάνεται με ένα οπτικό όργανο μέτρησης (14). Ένα σχέδιο του πειράματος για τις επίπεδες τριβόμενες επιφάνειες παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6.2.2.a.



Σχήμα 4.6.2.2a. Επίπεδες Επιφάνειες στο Σύστημα Δοκιμών.



Σχήμα 4.6.2.2b. Σύστημα Δακτυλίου- Εμβόλου και Χιτωνίου Κυλίνδρου.

Σε αυτήν την περίπτωση, ένα μεταλλικό δείγμα (1) με δύο LST τροποποιημένες επιφάνειες και επικαλυμμένες με χρώμιο, πλάτους 3mm και μήκους 11 mm έκαστος, στερεώνονται σε μία ειδική συσκευή συγκράτησης. Το μη τροποποιημένο παλινδρομικό επίπεδο έλασμα (2), είναι φτιαγμένο από χυτοσίδηρο. Στο Σχήμα 4.6.2.2b περιγράφεται η δοκιμή δύο τμημάτων δακτυλίου εμβόλου κατασκευασμένα από ειδικό χάλυβα με τριβόμενες επιφάνειες και ένα τμήμα χιτωνίου κυλίνδρου (7) κατασκευασμένο από ειδικό χυτοσίδηρο. Η γωνιακή έκταση της επαφής μεταξύ των επιφανειών του δακτυλίου και του χιτωνίου κυλίνδρου είναι 40 μοίρες. Λάδι μηχανής

Ultra-40 με δείκτη ιξώδους 95 τροφοδοτείται από τη δεξαμενή (1) μέσω ενός αγωγού (2) μίας στρόφιγγας (cock) (3), και ενός ακροφυσίου εισόδου (4). Το ακροφύσιο είναι υπεύθυνο για το σχηματισμό των επιθυμητών σταγόνων από λάδι. Η συχνότητα με την οποία στάζει το λάδι καθορίζεται με τη χρήση διαφόρων ακροφυσίων με ποικίλες διατομές, ένα διαφανές κύπελλο (5) και ένα χρονόμετρο. Το βάρος του λαδιού που στάζει, G, μετριέται με μία ηλεκτρονική ζυγαριά με ανάλυση 1mg και υπολογίστηκε $G=0.01g (\pm 3mg)$ για όλα τα ακροφύσια. Το σύστημα τροφοδότησης λαδιού χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την κατανάλωση του λαδιού στη μηχανή καθώς και τα διάφορα επίπεδα έλλειψης λίπανσης. Το μηχάνημα δοκιμών (test rig) είναι εξοπλισμένο με μία πηγή θερμότητας (8), η οποία αποτελείται από ένα ηλεκτρικό θερμικό στοιχείο με χειροκίνητο έλεγχο της ηλεκτρικής τάσης για να θερμαίνεται η ζώνη τριβής και να διατηρείται η επιλεγμένη θερμοκρασία. Το λειτουργικό φορτίο Fe εφαρμόστηκε στα δείγματα με συστήματα ακριβής μεταφοράς βάρους.

Οι παράμετροι που μπορούν να μεταβληθούν κατά την πορεία της δοκιμής είναι οι παρακάτω:

1. Φορτίο Λειτουργίας Fe.
2. Ταχύτητα ολίσθησης U.
3. Θερμοκρασία περιβάλλοντος.
4. Ρυθμός τροφοδότησης λαδιού.
5. Παράμετροι της τροποποίησης της τραχύτητας με laser.

Οι διαφορές που υπάρχουν στις δύο διαφορετικές δοκιμές είναι οι παρακάτω:

- Το φορτίο λειτουργίας σε όλες τις δοκιμές με τα επίπεδα δείγματα είναι ρυθμισμένο για πίεση επαφής των 0.6Μpa. Η διαδρομή εμβόλου μηχανής σε αυτές τις δοκιμές είναι 100mm. Η τραχύτητα της επιφάνειας τόσο της επίπεδης όσο και της τροποποιημένης επιφάνειας (περιοχή μεταξύ των κοιλοτήτων) είναι $Ra=0.04\mu m$.
- Το φορτίο λειτουργίας για τη δοκιμή με τον δακτύλιο εμβόλου και το χιτώνιο κυλίνδρου μεταβάλλεται για εύρος στην πίεση επαφής από 0.1Μpa έως 0.3Μpa. Η χαμηλότερη πίεση επαφής αντιπροσωπεύει τυπικές τιμές που λαμβάνονται σε μία μηχανή από την ελαστικότητα του ίδιου του δακτυλίου. Η υψηλότερη τιμή της πίεσης επαφής αντιστοιχεί στην περίπτωση της επιπρόσθετης μέσης πίεσης αερίου καυσίμου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας, η οποία, για μεσαίας ισχύος βενζινοκίνητης μηχανής είναι 0.2Μpa. Η διαδρομή εμβόλου μηχανής σε όλες τις δοκιμές των δακτυλίων εμβόλου είναι 80mm.

Η ταχύτητα ολίσθησης του δακτυλίου εμβόλου καθορίζεται από τη γωνιακή ταχύτητα του στροφαλοφόρου άξονα η οποία κυμαίνεται μεταξύ 500-1500 rpm. Ρυθμίζοντας τη θερμοκρασία στη ζώνη τριβής, το ιξώδες του λαδιού μπορεί να διατηρείται κοντά στην τιμή που έχει σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της μηχανής. Το δυναμικό ιξώδες του λαδιού μηχανής ULTRA-40 στους $40^{\circ}C$ και στους $100^{\circ}C$ είναι 113 mPa.sec και 12.3 mPa.sec αντίστοιχα. Με βάση αυτά τα στοιχεία η εμπειρική σχέση ιξώδους-θερμοκρασίας για το λάδι είναι:

$$\ln(\ln \mu) = 22.302 - 3.611 \ln(T^{\circ}C + 273) \quad (1)$$

Η αλλαγή του δυναμικού ιξώδους σε θερμοκρασίες άνω των $70^{\circ}C$ είναι μικρή. Επομένως, για τις δοκιμές με τους δακτυλίους εμβόλου, ο θερμοαντήρας ρυθμίζεται

ώστε να παρέχει θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 65°C και 75°C στη ζώνη τριβής. Οι δοκιμές με τα επίπεδα δείγματα επίσης έλαβαν χώρα σε θερμοκρασία δωματίου.

Με βάση τα πειραματικά δεδομένα [137,138] για κατανάλωση λαδιού 2g/h για ένα κύλινδρο 15kW και δεδομένου ότι η περιοχή τριβής μεταξύ δακτυλίου εμβόλου-χιτωνίου κυλίνδρου στο μηχάνημα δοκιμών είναι περίπου στο 0.11 του πραγματικού κυλίνδρου μηχανής, ο ρυθμός ροής του λαδιού για τις δοκιμές δακτυλίων εμβόλου ρυθμίζεται στα 0.22g/h . Δίνοντας μία σταγόνα βάρους 0.01g απαιτείται χρόνος 165sec που πρέπει να παρεμβληθεί μεταξύ δύο διαδοχικών σταγόνων ώστε να έχουμε την επιθυμητή ροή λαδιού. Ο ρυθμός αυτός που προσομοιώνει την λίπανση να είναι ίδια με αυτής της μηχανής έχει σταθεροποιηθεί για τη δοκιμή με το τμήμα του δακτυλίου εμβόλου.

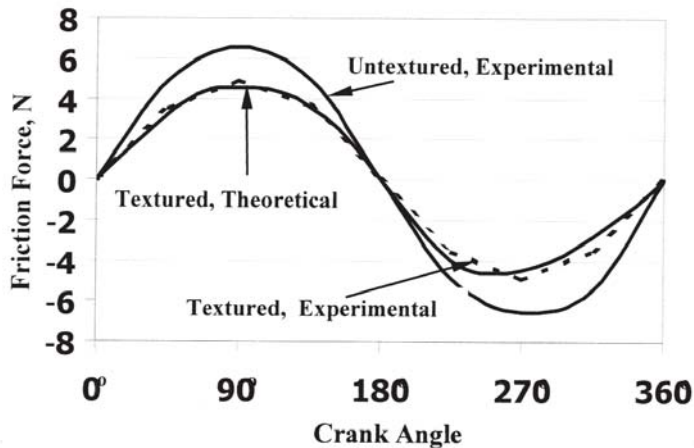
Με τα επίπεδα δείγματα χρησιμοποιούνται διαφορετικά ακροφύσια ώστε να είναι δυνατό να επιτευχθούν καταστάσεις από πλήρη λίπανση (τρεις σταγόνες το λεπτό) μέχρι έλλειψη λίπανσης.

Η διαδικασία ελέγχου λειτουργίας εκτελέστηκε σε όλα τα δείγματα για να επιβεβαιωθεί η πλήρης επαφή των επιφανειών. Η διαδικασία ελέγχου λειτουργίας αποτελείται από προοδευτική αύξηση του φορτίου σε χαμηλή ταχύτητα ολίσθησης (sliding speed) των $250\text{-}300\text{ r.p.m.}$ έως την ονομαστική τιμή του. Η σταθεροποίηση της συνεχώς υπό παρακολούθηση δύναμης τριβής κάτω από τη μέγιστη πίεση επαφής χρησιμεύει ως ένδειξη ότι η διαδικασία ελέγχου λειτουργίας έχει ολοκληρωθεί. Η τροποποίηση της τραχύτητας με laser εφαρμόζεται μετά το πέρας της διαδικασίας. Ο αυτό-ευθυγραμμιζόμενος μηχανισμός συγκράτησης, με κινηματικό πλαίσιο στήριξης εγγυάται την ακριβή ευθυγράμμιση όταν τα τροποποιημένα δείγματα επανεγκατασταθούν. Όλες οι δοκιμές ξεκινούν από 500 r.p.m. και ακολουθούν βαθμωτές αυξήσεις των 100 r.p.m. μέχρι τη μέγιστη ταχύτητα των 1300 r.p.m. Απαιτείται χρόνος $5\text{'-}7\text{'}$ ώστε η θερμοκρασία της επιφάνειας να σταθεροποιηθεί για το κάθε επίπεδο ταχύτητας, εκτός από το αρχικό επίπεδο όπου απαιτούνται 25' . Μόλις επιτευχθεί η σταθερή θερμοκρασία γίνεται μέτρηση της τριβής για το εκάστοτε επίπεδο ταχύτητας. Όλα τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται σε έναν υπολογιστή και έτσι καθίσταται δυνατή ο on-line υπολογισμός της μέσης δύναμης τριβής μετά από κάθε κύκλο περιστροφής και για την εκάστοτε ταχύτητα του στροφάλου του κυλίνδρου.

4.6.3 Αποτελέσματα.

Αποτελέσματα για τις Επίπεδες Επιφάνειες.

Η δυνατότητα μείωσης της τριβής μέσω της τροποποίησης της τραχύτητας με laser περιγράφεται μέσω της διάταξης των επίπεδων επιφανειών ((Σχήμα 4.6.2.2a). Στο Σχήμα 4.6.3.1.1 βλέπουμε τυπικά αποτελέσματα δοκιμών για τη δύναμη τριβής υπό κατάσταση πλήρους λίπανσης συναρτήσει της γωνίας του στροφάλου του κυλίνδρου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου.



Σχήμα 4.6.3.1. Συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων της δύναμης Τριβής συναρτήσει της γωνίας του στροφάλου του κυλίνδρου.

Γίνεται σύγκριση για μη τροποποιημένες και βέλτιστα τροποποιημένες επιφάνειες στις 1000 r.p.m. Επιλέχθηκαν οι βέλτιστες παράμετροι τροποποίησης με βάση το θεωρητικό μοντέλο [135]. Αυτές είναι οι εξής: Διάμετρος κοιλότητας 100μm, βάθος κοιλότητας 10μm και πυκνότητα περιοχής 13% που συνεπάγεται 12 γραμμές κοιλότητας εγκαρσίως στα 3mm πλάτος του καθενός από τους δύο επίπεδους δακτυλίους εμβόλου. Θα πρέπει να αναφέρουμε εδώ ότι η καλύτερη τροποποίηση εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας. Όμως, βρέθηκε [135] ότι εάν ο λόγος βάρους προς διάμετρο κοιλότητας, που είναι και η πιο σημαντική παράμετρος για βέλτιστα αποτελέσματα, είναι περίπου 0.1, καλύπτεται ένα σχετικά μεγάλο εύρος των συνθηκών λειτουργίας.

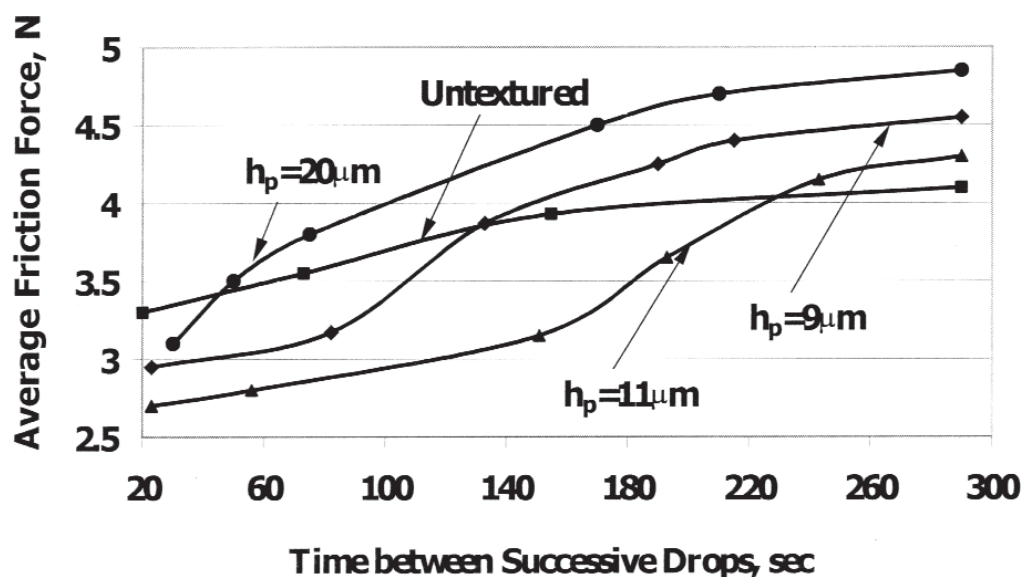
Επίσης, στο Σχήμα 4.6.3.1.1 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών (διακεκομμένη γραμμή) και των θεωρητικών αποτελεσμάτων για την περίπτωση τροποποιημένης επιφάνειας. Όπως βλέπουμε η τροποποίηση μειώνει τη μέγιστη δύναμη τριβής από 6.7N σε 4.8 N, μία μείωση της τάξης του 30%, που συμφωνεί ικανοποιητικά με την πρόβλεψη [135] η οποία παρέχει μόνο προσεγγιστικές τιμές τριβής για μη τροποποιημένες επιφάνειες καθώς το βάθος της κοιλότητας πλησιάζει το μηδέν. Μέσες τιμές για ένα πλήρη κύκλο έδειξαν σε μερικές περιπτώσεις μείωση μέχρι και 40% της τριβής. Το πραγματικό ιξώδες του λαδιού είναι αναγκαίο για να εισαχθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου στη σύγκριση με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μετρούμενης θερμοκρασίας και της εξίσωσης (1). Η θερμοκρασία μετριέται στο κύριο σώμα του δείγματος, περίπου 1.4mm κάτω από την επιφάνεια επαφής του προεξέχοντος επίπεδου δείγματος Σχήμα 4.6.2.2a.

Λόγω της απομάκρυνσης της θερμότητας διαμέσου των πλευρών των προεξοχών, η μετρούμενη θερμοκρασία θα μπορούσε να είναι μικρότερη από την πραγματική και

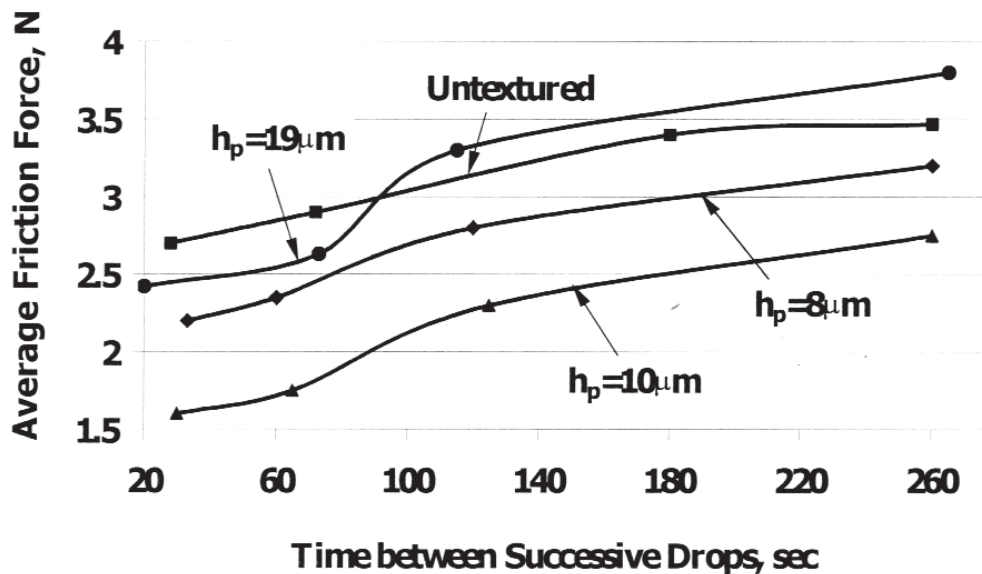
γι αυτό το λόγο θα πρέπει να διορθωθεί για καλύτερη ταύτιση με τα πειραματικά αποτελέσματα της τριβής. Η μετρούμενη θερμοκρασία στη συγκεκριμένη δοκιμή που φαίνεται στο Σχήμα 4.6.3.1.1 είναι περίπου 40°C . Με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος βρέθηκε ότι μία προσθήκη της τάξης των 15°C δίνει την καλή συσχέτιση που φαίνεται στο σχήμα. Κάποια επιπρόσθετα πειραματικά αποτελέσματα που κατέδειξαν τα οφέλη της τροποποίησης της τραχύτητας με laser παρουσιάστηκαν στο [139].

Γενικά η συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δοκιμών και του μοντέλου βελτιώνεται σε υψηλότερες ταχύτητες και υψηλότερες θερμοκρασίες. Για υψηλότερες ταχύτητες, το μοντέλο, το οποίο βασίζεται στην υπόθεση για κατάσταση υδροδυναμικής λίπανσης, προσομοιώνει ικανοποιητικά τις υπάρχουσες συνθήκες των δοκιμών. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η χρονική απόκλιση του ιξώδους του λαδιού κατά τη διάρκεια ενός κύκλου είναι μικρή σύμφωνα με την υπόθεση σταθερού ιξώδους που έχει γίνει στο μοντέλο.

Η επίδραση της τροποποίησης της τραχύτητας με laser στη τριβή υπό συνθήκες έλλειψης λίπανσης για διαμόρφωση επίπεδων επιφανειών παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.6.3.1.2 και 4.6.3.1.3 για διαφορετικό βάθος κοιλότητας.



Σχήμα 4.6.3.2 Επίδραση της έλλειψης λίπανσης στη μέση τιμή δύναμη τριβής για διάφορα βάθη κοιλότητων h_p (υψηλό ιξώδες).



Σχήμα 4.6.3.3. Επίδραση της έλλειψης λίπανσης στη μέση τιμή δύναμη τριβής για διάφορα βάθη κοιλοτήτων h_p (χαμηλό ιξώδες).

Παρουσιάζεται η μέση δύναμη τριβής κατά τη διάρκεια ενός κύκλου στις 900 r.p.m. για ελαττωμένες τιμές του ρυθμού τροφοδότησης λαδιού. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με την περίπτωση των μη τροποποιημένων επιφανειών. Η πρώτη δοκιμή (Σχήμα 4.6.3.1.2) εκτελέστηκε με σχετικά υψηλό ιξώδες σε θερμοκρασίες μεταξύ 37°C - 48°C , ενώ η δεύτερη δοκιμή (Σχήμα 4.6.3.1.3) για σχετικά χαμηλό ιξώδες σε θερμοκρασίες μεταξύ 62°C - 72°C . Η πτώση του ιξώδους του λαδιού από τους 37°C στους 48°C είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν από 62°C στους 72°C . Το χαμηλότερο επίπεδο τριβής στην περίπτωση του χαμηλού ιξώδους υποδηλώνει μία υδροδυναμική κατάσταση ή πιθανόν μία κατάσταση μεικτής λίπανσης.

Τόσο στο υψηλό όσο και στο χαμηλό ιξώδες υπάρχει ένα βέλτιστο βάθος κοιλότητας που ελαχιστοποιεί την τριβή. Το βάθος αυτό είναι περίπου στα $10\text{-}11\mu\text{m}$ και είναι το ίδιο τόσο για κατάσταση έλλειψης όσο και για κατάσταση πλήρους λίπανσης. Ενδιαφέρον προκαλεί η υψηλή τριβή, η οποία είναι ακόμα υψηλότερη από την περίπτωση της μη τροποποιημένης επιφάνειας, και η οποία συνδέεται με τις βαθύτερες κοιλότητες μόλις υπάρξει πτώση του ρυθμού τροφοδότησης. Αναμενόταν ότι οι μικρό-δεξαμενές που είναι χαρακτηριστικό της τροποποίησης θα επιτυγχάνονταν πιο εύκολα με βαθιές κοιλότητες αλλά από τα αριθμητικά αποτελέσματα βλέπουμε ότι αυτό δεν συμβαίνει. Είναι πιθανόν ότι καθώς το ποσό του λιπαντικού που βρίσκεται μεταξύ των δύο επιφανειών ελαττώνεται, η κατανομή του πάνω στην επιφάνεια είναι διαφορετική για μη τροποποιημένες ή τροποποιημένες.

Είναι λογικό να υποθέσουμε ότι στην πρώτη περίπτωση το λιπαντικό είναι εξ ίσου κατανομημένο πάνω σε ολόκληρη την επιφάνεια ενώ στη δεύτερη περίπτωση συγκεντρώνεται στη γειτνιάζουσα περιοχή γύρω από τις κοιλότητες. Σε αυτήν την περίπτωση, η υδροδυναμική επίδραση των "μικρο-υδροδυναμικών δοχείων" είναι περιορισμένη σε μικρότερη περιοχή της επιφάνειας σε σχέση με την πλήρη λίπανση και η χάρη μεταξύ των επιφανειών που ολισθαίνουν μειώνεται ραγδαία. Αυτό ίσως μπορεί να εξηγήσει στη ζώνη μετάβασης μία πιο απότομη αύξηση της τριβής με μείωση του ρυθμού τροφοδότησης για την περίπτωση τροποποιημένων επιφανειών, η οποία διαφέρει από τη βαθμιαία αύξηση της τριβής για την περίπτωση μη

τροποποιημένων επιφανειών. Επειδή η υδροδυναμική ή μικτή λίπανση διατηρείται, το βέλτιστο βάθος κοιλότητας είναι σε ισχύ.

Με περαιτέρω μείωση του ρυθμού τροφοδότησης, η ζώνη επαφής μπορεί να τελέσει υπό κατάσταση υψηλής έλλειψης λίπανσης και υπό συγκεκριμένες συνθήκες η τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας μπορεί να γίνει επιζήμια αντί για ευεργετική. Θεωρείται πιθανό ότι με μικρή ποσότητα λιπαντικού οι βαθύτερες κοιλότητες είναι εν μέρει άδειες, και επομένως, μπορούν να λειτουργήσουν ως μικρό-παγίδες και να απομακρύνουν από την γειτνιάζουσα περιοχή οποιαδήποτε μικρή ποσότητα λιπαντικού το οποίο ειδικά θα παρέμενε σε μία μη τροποποιημένη επιφάνεια ή σε μία τροποποιημένη επιφάνεια με ρηχές κοιλότητες.

Πράγματι, από το Σχήμα 4.6.3.1.2 μπορούμε να δούμε ότι με κοιλότητες βάθους 20μm και με μικρότερη ρευστότητα λόγω του υψηλού ιξώδους του λαδιού, το φαινόμενο που αναφέραμε παραπάνω λαμβάνει χώρα ταχύτερα από ότι για την περίπτωση με χαμηλό ιξώδες όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6.3.1.3. Επίσης η διαφορά στη τριβή μεταξύ των βαθύτατα τροποποιημένων και των μη τροποποιημένων) είναι πολύ υψηλότερη για την περίπτωση υψηλού ιξώδους του Σχήματος 4.6.3.1.2.

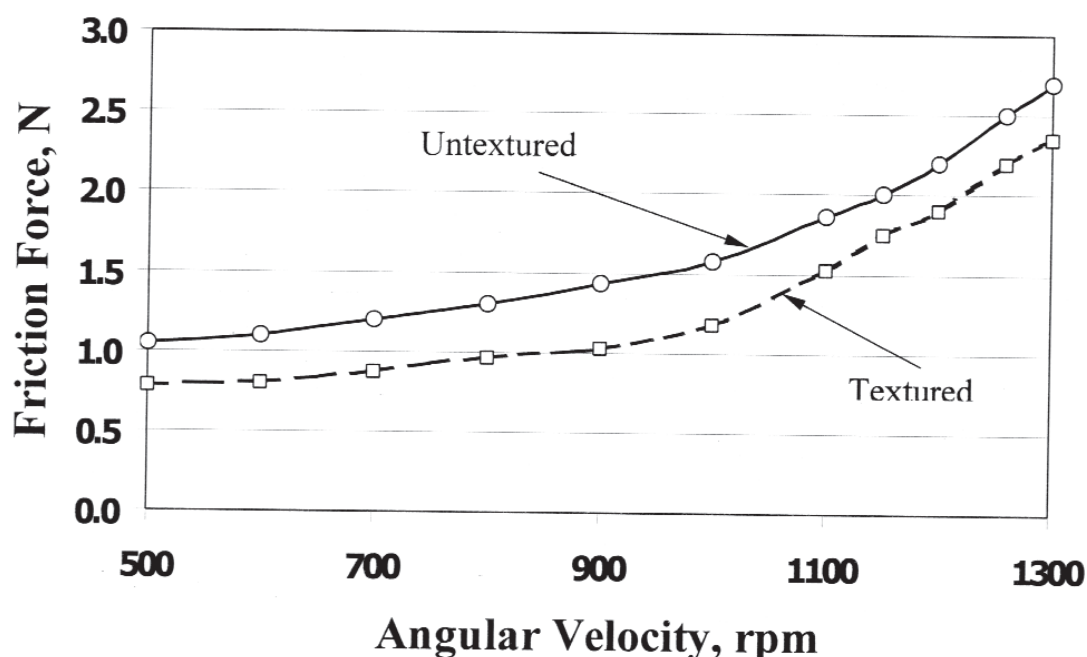
Στην περίπτωση χαμηλού ιξώδους (Σχήμα 4.6.3.1.3) οι ρηχότερες κοιλότητες σε καμία στιγμή δεν οδηγούν σε υψηλότερη τριβή από τις μη τροποποιημένες επιφάνειες. Αυτή η περίπτωση του χαμηλού ιξώδους ανταποκρίνεται καλύτερα στις πραγματικές συνθήκες μίας μηχανής. Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι τα αποτελέσματα των Σχημάτων 4.6.3.1.2.,4.6.3.1.3 δεν μπορούν να επεκταθούν σε ακόμα χαμηλότερους ρυθμούς τροφοδότησης από αυτούς που παρουσιάζονται. Και αυτό γιατί σε ιδιαίτερα χαμηλούς ρυθμούς έχουμε εμπλοκή (seizure) με απότομη αύξηση της δύναμης τριβής.

Αποτελέσματα για Τμήματα Δακτυλίων Εμβόλου και Χιτωνίων Κυλίνδρου.

Τα τμήματα των δακτυλίων εμβόλου λαμβάνονται από ένα δακτύλιο εμβόλου παραγωγής (production piston ring) με εξωτερική διάμετρο 82mm και αξονικό πλάτος δακτυλίου 1.2mm (Σχήμα 4.6.2.2b). Οι παράμετροι τροποποίησης της τραχύτητας με laser είναι οι εξής:

1. διάμετρος κοιλότητας 100μm
2. βάθος κοιλότητας 10μm
3. πυκνότητα της περιοχής των κοιλοτήτων 20%

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα των σχηματισμό 12 γραμμών κοιλότητας εγκάρσιως κατά το πλάτος του δακτυλίου. Στο σχήμα 4.6.3.2.1 βλέπουμε την επίδραση της γωνιακής ταχύτητας και της τροποποίησης της επιφάνειας στη μέση δύναμη τριβής σε σύγκριση με μη τροποποιημένους δακτυλίους.



Σχήμα 4.6.3.4. Μέση τιμή δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας

Η μείωση της τριβής λόγω της τροποποίησης κυμαίνεται μεταξύ 20-30%, ενώ αυξάνεται η γωνιακή ταχύτητα αυξάνεται και η τριβή [135,139]. Η ελαφρώς μικρότερη μείωση της τριβής από ότι στην περίπτωση των επίπεδων επιφανειών οφείλεται στον μικρότερο αριθμό των γραμμών κοιλότητας που είναι μόνο 4 για την περίπτωση του δακτυλίου σε σύγκριση με τους 12 των επίπεδων επιφανειών. Αυτό ερμηνεύεται πλήρως στο θεωρητικό μοντέλο [135] όπου εξηγείται το πλεονέκτημα που υπάρχει από την αύξηση των γραμμών σε 12 στην μείωση της τριβής.

Τα αποτελέσματα του Σχήματος 4.6.3.2.1 ελήφθησαν για σταθερό εξωτερικό φορτίο F_e το οποίο συνεπάγεται σταθερή πίεση των 0.2 Mpa. Δοκιμές με άλλα υπερεσιακά φορτία τα οποία οδηγούν σε χαμηλότερες ή υψηλότερες πιέσεις στο εύρος των 0.1-0.3 Mpa έδωσαν παρεμφερή αποτελέσματα με αυτά που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6.3.2.1. Μόνο το επίπεδο τριβής είναι υψηλότερο ή χαμηλότερο ανάλογα την πίεση επαφής, αλλά η μείωση της τριβής είναι η ίδια.

4.6.4 Συμπέρασμα

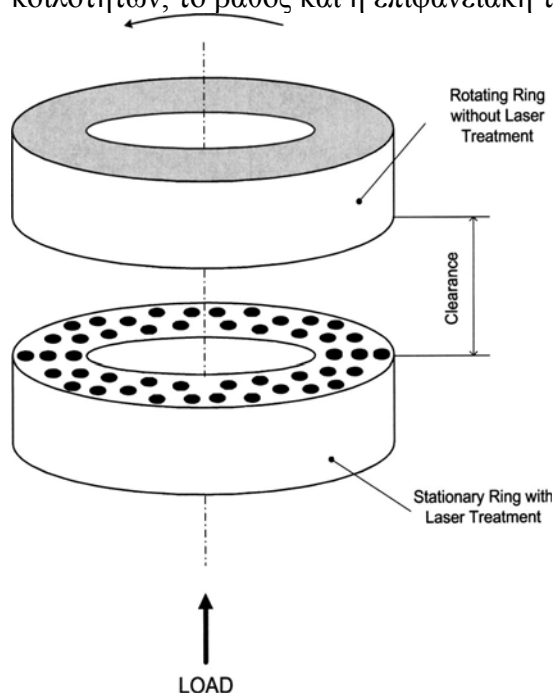
Αναλύσαμε μία πειραματική μελέτη που έγινε με σκοπό να αποτιμήσει την επίδραση της τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας (LST) στο σχηματισμό μικρό-κοιλοτήτων σε παλινδρομικά εξαρτήματα αυτοκινήτων. Αναλύθηκαν δύο αντιπροσωπευτικά δείγματα διάταξης, ένα με επίπεδες επιφάνειες και ένα με ζεύγος δακτυλίου- χιτωνίου. Για την πρώτη διάταξη βρέθηκε μείωση της τάξης του 40% ενώ για τη δεύτερη διάταξη της τάξης του 30%.

Ο συσχετισμός μεταξύ των θεωρητικών αποτελεσμάτων και του μοντέλου το οποίο προσομοιώνει τη διάταξη των επίπεδων επιφανειών είναι καλός. Οι βέλτιστες παράμετροι της τροποποίησης της τραχύτητας με laser είναι σύμφωνες με τις θεωρητικές προβλέψεις. Η επίδραση της τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας υπό κατάσταση έλλειψης λίπανσης παρουσιάστηκε για τη διάταξη των επίπεδων επιφανειών. Φάνηκε ότι με βέλτιστη διάμετρο κοιλότητας και χαμηλό ιξώδες λιπαντικού η τροποποίηση είναι ευεργετική για όλο το εύρος των ρυθμών ροής. Για βαθύτερες κοιλότητες ή για υψηλότερο ιξώδες η τροποποίηση της επιφάνειας μπορεί να είναι επιζήμια υπό ορισμένες συνθήκες λειτουργίας.

Κεφάλαιο 5. LST ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΣΤΕΓΑΝΩΤΙΚΑ.

5.1 LST σε Μηχανικά Αεροστεγή Στεγανωτικά.

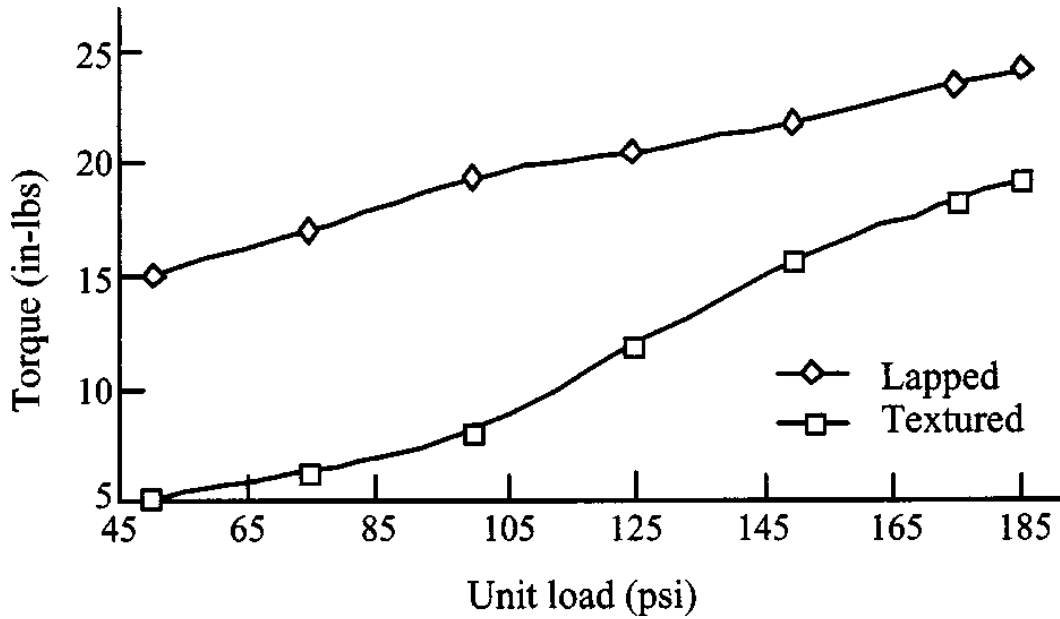
Οι τρεις διαστάσεις που χαρακτηρίζουν την LST είναι η διάμετρος των κοιλοτήτων, το βάθος και η επιφανειακή τους πυκνότητα.



Σχήμα 5.1.1. Μοντέλο Μηχανικού αεροστεγούς στεγανωτικού.

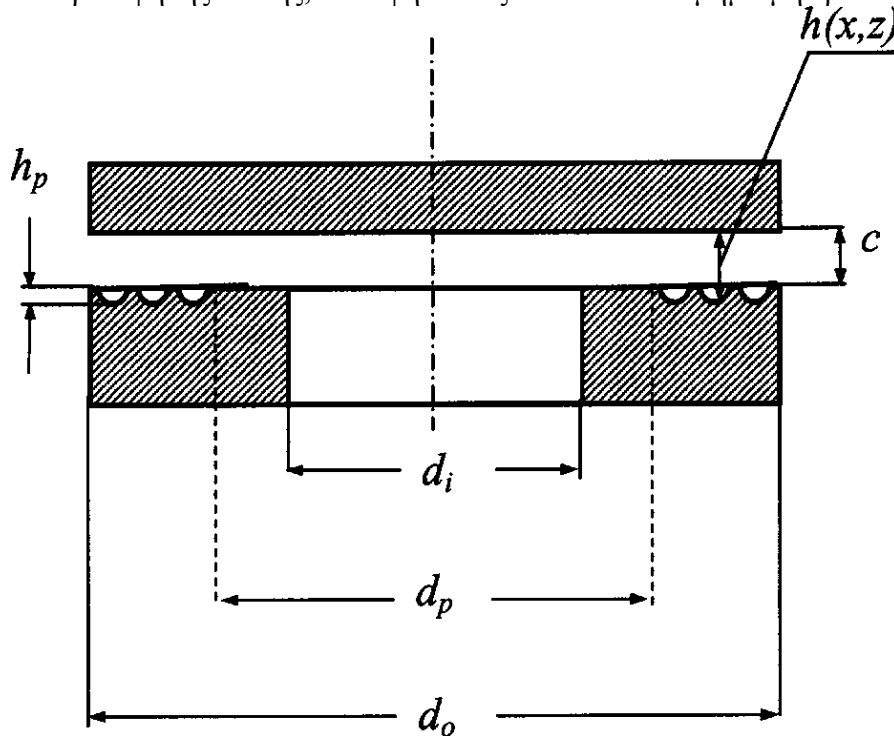
Σε έρευνα που έγινε πάνω σε μηχανικό αεροστεγές στεγανωτικό όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1.1. βρέθηκε ότι το ακριβές σχήμα των μικρο-κοιλοτήτων δεν παίζει σημαντικό ρόλο και ότι η πιο σημαντική παράμετρος για τη βέλτιστη χωρητικότητα φορτίου είναι ο λόγος του βάθους της κοιλοτήτας προς τη διάμετρο.

Το πειραματικό μοντέλο βασίστηκε στην επίλυση της εξίσωσης Reynolds για την κατανομή της υδροδυναμικής πίεσης και την εύρεση της μέσης πίεσης στο φράγμα στεγανοποίησης για διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Ακολούθησε έρευνα και πλήρης συμφωνία μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για υψηλής ακαμψίας υγρή μεμβράνη με διάκενο μικρότερο από 1 μ m. Περαιτέρω έρευνα για αεροστεγή στεγανωτικά στο νερό [87] έδειξε μείωση μέχρι και 65% της ροπής της τριβής και της επιφανειακής θερμοκρασίας. Παρόμοια αποτελέσματα χαμηλότερης τριβής και επιφανειακής θερμοκρασίας βρέθηκαν [88] και για αεροστεγή στεγανωτικά των οποίων η επιφάνεια έχει τροποποιηθεί με χρήση laser. Δακτύλιοι από SiC όπου έχουν τροποποιηθεί συγκρίνονταν με κοινούς δακτυλίους σε λάδι. Δοκιμές που έγιναν στη Γερμανία για μηχανικά αεροστεγή στεγανωτικά των οποίων η επιφάνεια είχε τροποποιηθεί έδειξαν 40% μείωση της ροπής της τριβής και σχεδόν διπλασιασμό της διάρκειας ζωής τους.



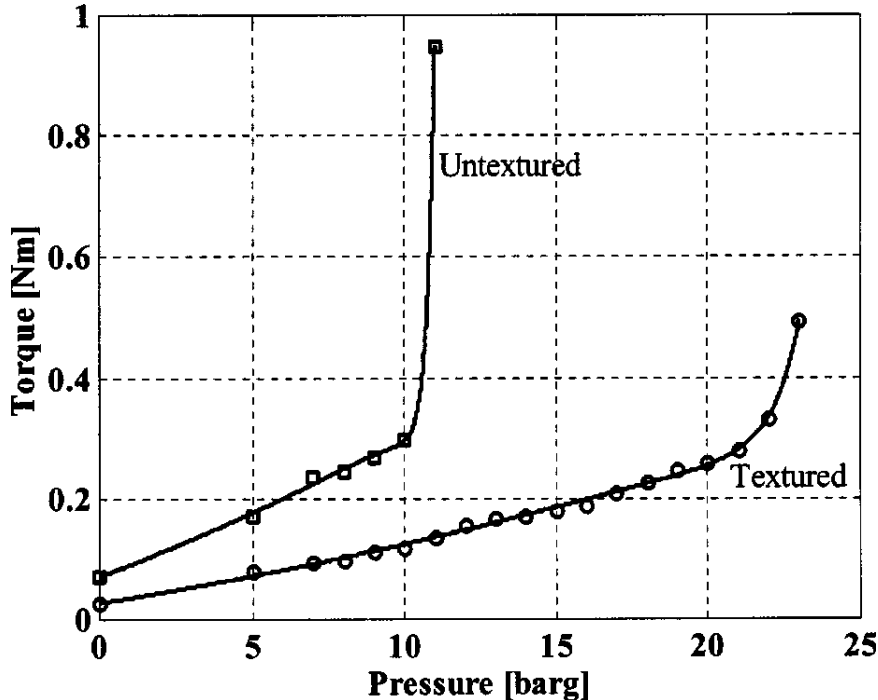
Σχήμα 5.1.2. Διάγραμμα Ροπής τριβής συναρτήσεως Μετωπικού Φορτίου για τροποποιημένο και μη τροποποιημένο στεγανωτικό μέσα σε νερό.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.1.2, η μείωση της ροπής της τριβής ελαττώνεται βαθμιαία σε υψηλότερες πιέσεις που υφίστανται αντίστοιχα σε υψηλότερα φορτία. Για να ξεπεραστεί η χαμηλή απόδοση σε υψηλές πιέσεις, αναπτύχθηκε μία μέθοδος που αυξάνει τις υδροστατικές επιδράσεις στα υψηλής πίεσης αεροστεγή στεγανωτικά [89]. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εφαρμογή υψηλότερης πυκνότητας LST πάνω από ένα τμήμα του φράγματος στεγανοποίησης Σχήμα 5.1.3, παρακείμενο στην πλευρά υψηλής πίεσης, και αφήνοντας το υπόλοιπο τμήμα μη τροποποιημένο.



Σχήμα 5.1.3. Σχέδιο ενός μερικής Τροποποιημένου Μηχανικού Στεγανωτικού.

Το τροποποιημένο τμήμα παρέχει ένα ισοδύναμα μεγαλύτερο διάκενο, έτσι ώστε τελικά να έχουμε ένα συγκλίνουσας μορφής διάκενο του στεγανωτικού κατά τη διεύθυνση της πτώσης της πίεσης, το οποίο έτσι παρέχει υδροστατική επίδραση. Στο Σχήμα 5.1.4. βλέπουμε το αποτέλεσμα για απλά αεροστεγή στεγανωτικά κατηγοριοποιημένα από τον κατασκευαστή για μέγιστη πίεση λειτουργίας 12 bar.



Σχήμα 5.1.4. Ροπή Τριβής συναρτήσεως της Πίεσης για μη τροποποιημένα και μερικώς τροποποιημένα Μηχανικά Στεγανωτικά.

Πράγματι, το πείραμα με τα μη τροποποιημένα αεροστεγή στεγανωτικά έπρεπε να τερματίσει στα 12bar λόγω της πολύ υψηλής ροπής της τριβής της τάξης των 5 N*m που καθιστούν την έναρξη μίας σοβαρής επιφανειακής επαφής. Η αντίστοιχη ροπή της τριβής του τροποποιημένου αεροστεγούς στεγανωτικού είναι μόνο 0,16 N*m εξ ου και η μείωση της τριβής σε ποσοστό πάνω από 90%. Τα τροποποιημένα αεροστεγή στεγανωτικά μπορούν εύκολα να λειτουργήσουν μέχρι πίεση της τάξης των 23bar και για αυτή τη σχετικά υψηλή πίεση η αντίστοιχη ροπή της τριβής είναι μόνο 0,5 N*m, μία τιμή που μπορεί να επιτευχθεί για μη τροποποιημένα αεροστεγή στεγανωτικά μόνο για πίεση κάτω των 11 bar. Γι αυτόν το λόγο η ικανότητα λειτουργίας των τροποποιημένων αεροστεγών στεγανωτικών σε υψηλή πίεση είναι σημαντικά υψηλότερη από των μη τροποποιημένων.

Επίσης, έγινε μελέτη [90] τόσο σε πλήρως όσο και σε μερικώς τροποποιημένα αεροστεγή στεγανωτικά η οποία έδειξε την θετική επίδραση της τροποποίησης τραχύτητας μικρο-επιφανειών στη μείωση της αποχωριζόμενης ροπής και το σχηματισμό φυσαλίδων σε συνήθεις επιφάνειες μηχανικών αεροστεγών στεγανωτικών από γραφίτη.

Τα πλεονεκτήματα της LST δεν περιορίζονται μόνο στην υγρή λίπανση, μιας και τα ξηρά αεροστεγή στεγανωτικά μπορούν να επωφεληθούν από αυτήν [91]. Η βασική διαφορά είναι στο βέλτιστο λόγο του βάθους της κοιλότητας προς τη διάμετρό της, όπου στην περίπτωση εφαρμογής με αέριο είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με αυτόν κατά την περίπτωση εφαρμογής με υγρό. Το όφελος της εφαρμογής της LST σε ένα ξηρό αεροστεγές στεγανωτικό με χρήση αερίου έγινε αντικείμενο έρευνας. Για 12000 rpm και με αυξανόμενη μονάδα φορτίου έγινε σύγκριση της απόδοσης ενός

τροποποιημένου με ενός μη τροποποιημένου αεροστεγούς στεγανωτικού. Παρατηρήθηκε σημαντική μείωση τόσο στη ροπή της τριβής όσο και στην επιφανειακή θερμοκρασία στο LST τροποποιημένο στεγανωτικό, καθώς και πιο σταθερή λειτουργία σε σχέση με το μη τροποποιημένο στεγανωτικό. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι τροποποιώντας τη μία επιφάνεια από τις όψεις του στεγανωτικού που έρχονται σε επαφή έχουμε μείωση της τριβής κατά 40% σε σχέση με την περίπτωση μη τροποποίησης.

5.2 Τροποποίηση της Τραχύτητας της Επιφάνειας Επαφής Αεροστεγών Στεγανωτικών.

5.2.1 Αντικειμενικός Σκοπός

- Να εκτιμηθεί η επίδραση της φθοράς και της τριβής σε τροποποιημένες με laser επιφάνειες.
- Να εκτιμηθεί η απόδοση τροποποιημένων με laser επιφανειών για ειδικές εφαρμογές.
- Να βελτιστοποιηθεί το μέγεθος, το βάθος και η πυκνότητα των μικροκοιλιοτήτων (microdimples) ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή επίδοση.
- Να διερευνηθούν οι επιδράσεις των επικαλυπτικών στρωμάτων πολύ χαμηλής τριβής (super low friction coatings) στην απόδοση των επιφανειών με κοιλότητες.

5.2.2 Προσέγγιση

- Εφαρμογή τροποποίησης της τραχύτητας με laser στο μέτωπο αεροστεγούς στεγανωτικού από κεραμικό καρβίδιο του πυριτίου (SiC) το οποίο χρησιμοποιείται σε αντλίες νερού, και εκτίμηση της απόδοσής του σε κατάλληλη συσκευή ελέγχου στεγανωτικών.
- Διεξαγωγή δοκιμών φθοράς και τριβής σε τροποποιημένες με laser χαλύβδινες επιφάνειες για σύμμορφες και ασύμμορφες επαφές με χρήση τόσο μη κατευθυνόμενης όσο και παλινδρομικής ολίσθησης.
- Συνδυασμός σχεδόν τέλεια λείων ανθρακούχων επικαλυπτικών στρωμάτων (near frictionless carbon(NFC) coatings) και άλλων επικαλυπτικών στρωμάτων με χαμηλή τριβή και αντίσταση στη φθορά (low friction and wear-resistant coatings) με τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας (LST) για ωφέλιμες επιδράσεις τόσο στα κεραμικά αεροστεγή στεγανωτικά (ceramic seals) όσο και στις λιπασμένες χαλύβδινες επαφές (lubricated steel contacts).

5.2.3 Επίτευξη

- Χαρακτηρισμός του μεγέθους, σχήματος, βάθους και πυκνότητας των μικροκοιλιοτήτων του μετώπου των αεροστεγών στεγανωτικών από καρβίδιο του πυριτίου (SiC) και των χαλύβδινων δειγμάτων με χρήση τρισδιάστατου μικροεπιφανειακού οπτικού προφιλόμετρου, και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.
- Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών στα αεροστεγή στεγανωτικά οι επιφάνειες με κοιλότητες που έχουν δημιουργηθεί από laser μείωσαν τη ροπή τριβής κατά 40%÷60% ανάλογα με τις συνθήκες κατά τις δοκιμές.
- Οι τροποποιημένες με laser επιφάνειες των αεροστεγών στεγανωτικών από καρβίδιο του πυριτίου (SiC) έδειξαν κάποια σημάδια φθοράς ειδικά μετά από δοκιμές με υψηλή μετωπική πίεση.
- Για σύμμορφη, μη κατευθυνόμενη επαφή ολίσθησης, η LST μείωσε το συντελεστή τριβής των χαλύβδινων επιφανειών σημαντικά, ειδικά υπό κατάσταση οριακής και μεικτής λίπανσης.
- Η τροποποίηση της τραχύτητας με laser επέκτεινε το εύρος των παραμέτρων λειτουργικής επαφής για κατάσταση υδροδυναμικής λίπανσης σε χαμηλότερες ταχύτητες και υψηλότερα φορτία.

5.2.4 Γενικά

Η SurTech Ltd. ανέπτυξε μία τεχνολογία τροποποίησης της επιφάνειας η οποία αυξάνει τη συνολική τριβολογική απόδοση των λιπασμένων ολισθαινουσών και περιστρεφόμενων επιφανειών. Η τεχνολογία αυτή περιλαμβάνει τη δημιουργία μικροκοιλοτήτων (διαμέτρου 100μm και βάθους περίπου 10μm) μέσω ενός συνήθους προτύπου που εφαρμόζεται στη ζητούμενη επιφάνεια μέσω της παλμικής δέσμης laser.

Υπό υδροδυναμική λίπανση και για σύμμορφη επαφή, οι μικρο-κοιλοότητες στην επιφάνεια επαφής μπορούν να μειώσουν τους συντελεστές τριβής και πιθανόν να μειώσουν τη φθορά. Υπό συνθήκες λίπανσης με νερό ή λάδι, οι ρηχές κοιλοότητες μπορούν να λειτουργήσουν σαν μικρό-δεξαμενές για το νερό ή το λάδι αντίστοιχα και επομένως να αυξήσουν την αποδοτικότητα της υδροδυναμικής λίπανσης των επιφανειών αυτών. Η τεχνολογία χαμηλής τριβής έχει τη δυνατότητα για εφαρμογές σε διάφορα εξαρτήματα μηχανών, όπως στην κοινή επιφάνεια μεταξύ αεροστεγούς στεγανωτικού και χιτωνίου κυλίνδρου δακτυλίου εμβόλου (between seal and cylinder liner piston ring).

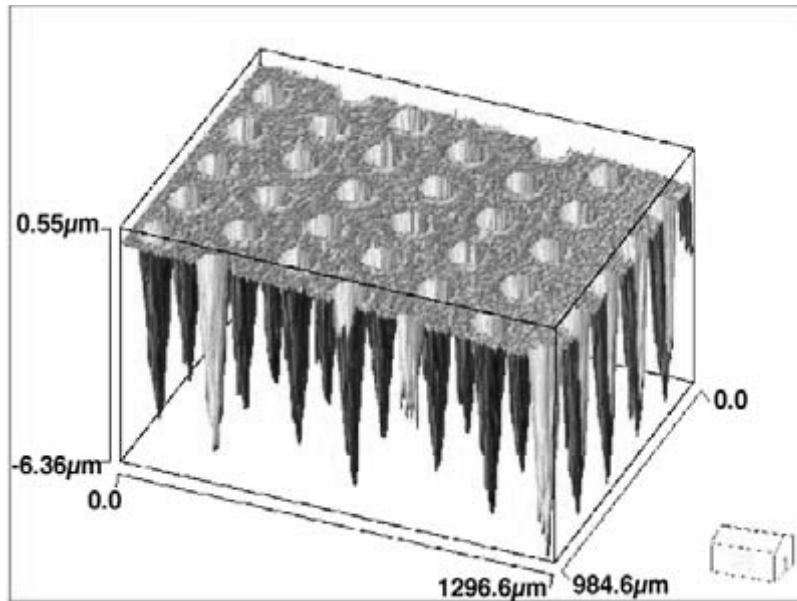
Ο αντικειμενικός σκοπός της μελέτης αυτής είναι η δημιουργία καλά ελεγχόμενων κοιλοτήτων σε ολισθαίνουσες και περιστρεφόμενες σύμμορφες επιφάνειες και η εκτίμηση των τριβολογικών τους ιδιοτήτων υπό το εύρος των συνθηκών που μπορεί να βρεθούν τόσο στις μηχανές όσο και σε περιστρεφόμενα τμήματα.

Σε αυτό το αρχικό στάδιο η τριβολογική εκτίμηση θα εστιαστεί κυρίως σε μέτωπα περιστρεφόμενων αεροστεγών στεγανωτικών και σε εξαρτήματα μηχανών σε κατάσταση λίπανσης. Το ζήτημα της αντοχής των κοιλοτήτων και η βελτιστοποίηση του μεγέθους, του βάθους και του γενικού σχεδιασμού των κοιλοτήτων για ποικίλες καταστάσεις λίπανσης είναι επίσης υπό έρευνα. Επίσης, τα πιθανά οφέλη από την εφαρμογή σκληρής και μαλακής προστατευτικής επικάλυψης η οποία έχει χαμηλής τριβής ιδιότητες είναι ένα εξίσου σημαντικό ζήτημα.

Στο Argonne National Laboratory έγινε σημαντική προσπάθεια για να αποτιμηθεί το αποτέλεσμα της εφαρμογής της LST σε αεροστεγή στεγανωτικά αντλιών νερού και σε χαλύβδινες επιφάνειες υπό λίπανση λαδιού. Διάφορα αεροστεγή στεγανωτικά από καρβίδιο του πυριτίου (SiC) και ορθογώνια χαλύβδινα δείγματα τροποποιήθηκαν μέσω laser στην επιφάνεια με μικροκοιλοότητες από την SurTech Ltd. Τα δείγματα αυτά επιστράφηκαν στο Argonne National Laboratory για να τεθούν σε μηχανικές δοκιμές, να μελετηθούν ως προς την φθορά και να υποβληθούν σε υψηλής ακρίβειας μετρήσεις της ροπής. Επίσης μελετήθηκε η εφαρμογή των σχεδόν τέλεια λείων ανθρακούχων επικαλυπτικών στρωμάτων σε αεροστεγή στεγανωτικά για περαιτέρω αύξηση της απόδοσής τους όσον αφορά τη συμπεριφορά τους σε φθορά και την τριβή.

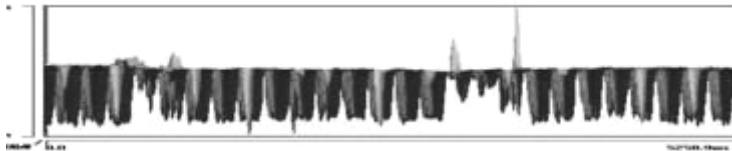
5.2.5 Αποτελέσματα: Δοκιμές Στεγανωτικών

Σε μία σειρά δοκιμών, το Argonne National Laboratory διερεύνησε τη συμπεριφορά ως προς τη τριβή της τροποποιημένης επιφάνειας των στεγανωτικών από καρβίδιο του πυριτίου (SiC). Στο Σχήμα 5.2.5.1. βλέπουμε μία τρισδιάστατη εικόνα της επιφάνειας εφαρμογής ενός τέτοιου στεγανωτικού.



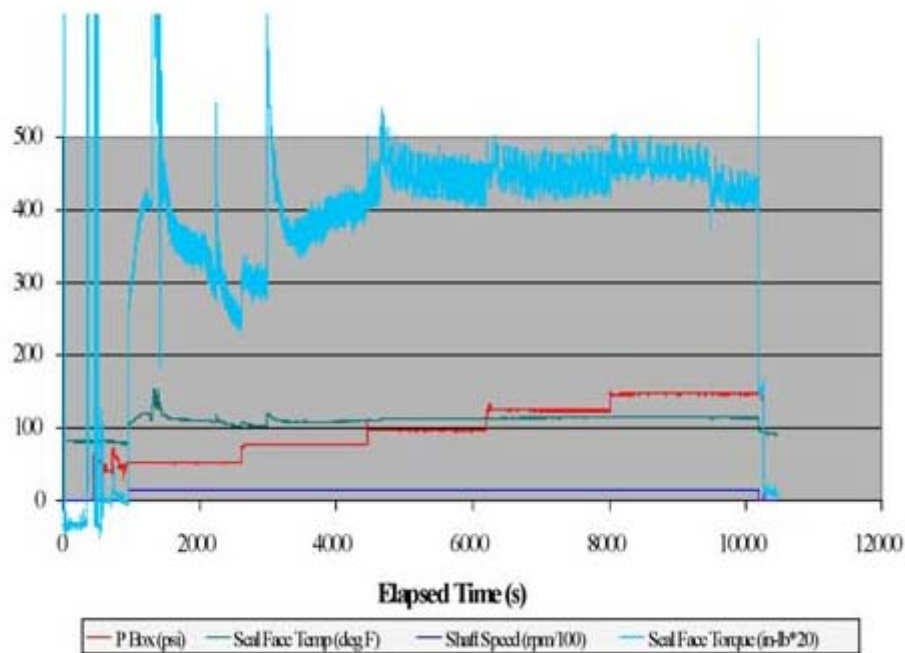
Σχήμα 5.2.5.1. Τρισδιάστατη εικόνα της επιφάνειας εφαρμογής ενός Στεγανωτικού του οποίου οι κοιλότητες έχουν δημιουργηθεί με LST.

Βλέπουμε ότι οι κοιλότητες που έχουν δημιουργηθεί έχουν παραταχθεί γεωμετρικά με πάχος $4\mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$ και διάμετρο περίπου $100\mu\text{m}$. Αφού οι επιφάνειες υποβλήθηκαν σε δοκιμές φθοράς και σε μετωπικές πιέσεις που έφθαναν τα 50psi, οι κοιλότητες παρέμειναν σχεδόν ανέπαφες ενώ σε αρκετά υψηλότερες μετωπικές πιέσεις ήταν εμφανή κάποια σημάδια φθοράς ειδικά κοντά στο κέντρο του ίχνους της φθοράς όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.5.2.



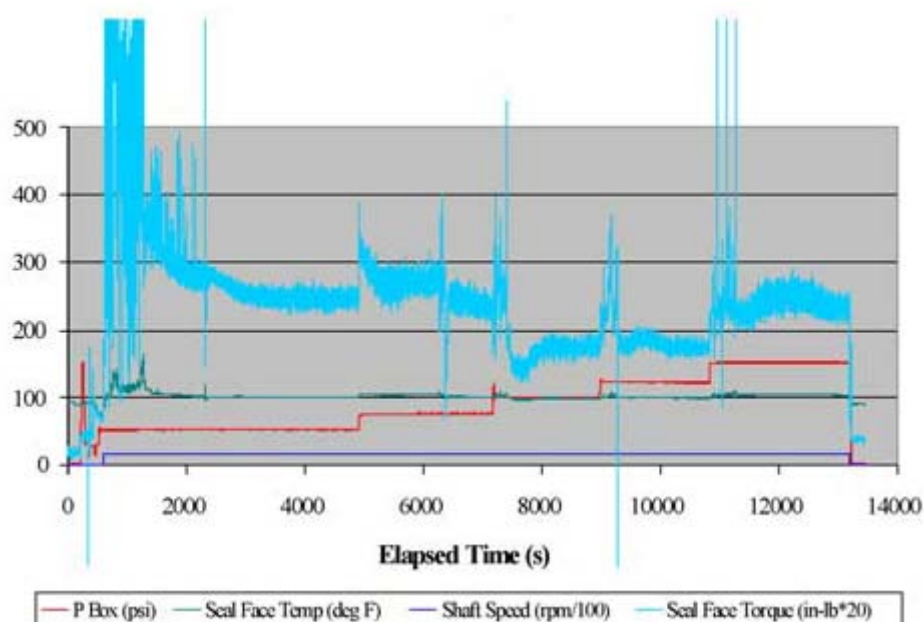
Σχήμα 5.2.5.2. Τροποποιημένη με LST επιφάνεια μετά από δοκιμή τριβής υπό μετωπική πίεση 100 psi.

Το βάθος της αυλάκωσης λόγω της φθοράς είναι περίπου $1\mu\text{m}$. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι κάποιες από τις κοιλότητες είχαν πληρωθεί με ακαθαρσίες που ήταν προϊόντα φθοράς. Οι μετρήσεις ροπής των τροποποιημένων αεροστεγών στεγανωτικών έλαβε χώρα σε ειδικό δοκιμαστικό μηχάνημα στεγανωτικών στο Western Michigan University. Οι δοκιμές περιλαμβάνουν δύο στεγανωτικά ελέγχου από πορώδες καρβίδιο του πυριτίου με πλήρως εξομαλυμένες επιφάνειες, και δύο τροποποιημένα με laser στεγανωτικά. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, δύο επαναλαμβανόμενες δοκιμές στα στεγανωτικά ελέγχου έδειξαν παρόμοια αποτελέσματα υποδεικνύοντας ότι το πρωτόκολλο των δοκιμών είναι πλήρως αξιόπιστο. Ένα από τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2.5.3.



Σχήμα 5.2.5.3 Θερμοκρασία και Ροπή της επιφάνειας εφαρμογής του Στεγανωτικού Ελέγχου συναρτήσει του χρόνου. Η ροπή είναι πολλαπλασιασμένη X20 ενώ η ταχύτητα περιστροφής διαιρεμένη κατά 8. Συνεπώς η ταχύτητα περιστροφής η οποία είναι 1800 rpm φαίνεται ως 18 rpm.

Αντίστοιχα, οι τροποποιημένοι με Laser δακτύλιοι συμπεριφέρθηκαν στις δοκιμές εξίσου καλά. Τα αποτελέσματα των δοκιμών ενός από τους δακτυλίους φαίνονται στο Σχήμα 5.2.5.4.



Σχήμα 5.2.5.4. Θερμοκρασία και Ροπή της επιφάνειας εφαρμογής του Τροποποιημένου με Laser Στεγανωτικού συναρτήσει του χρόνου όπου πιστοποιείται η σημαντική μείωση στη τριβή. Η ροπή είναι πολλαπλασιασμένη X20 ενώ η ταχύτητα περιστροφής διαιρεμένη κατά 8. Συνεπώς η ταχύτητα περιστροφής η οποία είναι 1800 rpm φαίνεται ως 18 rpm.

Το ξεκίνημα και οι μεταβολές υπό πίεση κατά τη διάρκεια των δοκιμών συχνά προκαλεί μία αστάθεια στη λειτουργία όπως αποδεικνύεται και από την αύξηση τόσο στη ροπή όσο και στη θερμοκρασία του στεγανωτικού. Αυτή είναι συνήθως μία βραχυπρόθεσμη κατάσταση και είναι συνήθως ορατή στη λειτουργία όλων των συμβατικών στεγανωτικών. Όμως, οι τροποποιημένοι με laser δακτύλιοι έχουν τιμές ροπής σημαντικά μικρότερες από αυτές των δακτυλίων ελέγχου για τις ίδιες πιέσεις λειτουργίας, γεγονός που καταδεικνύει ότι η τροποποίηση της τραχύτητας με laser έχει θετική επίδραση στην απόδοση των στεγανωτικών από καρβίδιο του πυριτίου. Μία αμυδρή μείωση της θερμοκρασίας παρατηρήθηκε για το μέτωπο του τροποποιημένου με laser στεγανωτικού.

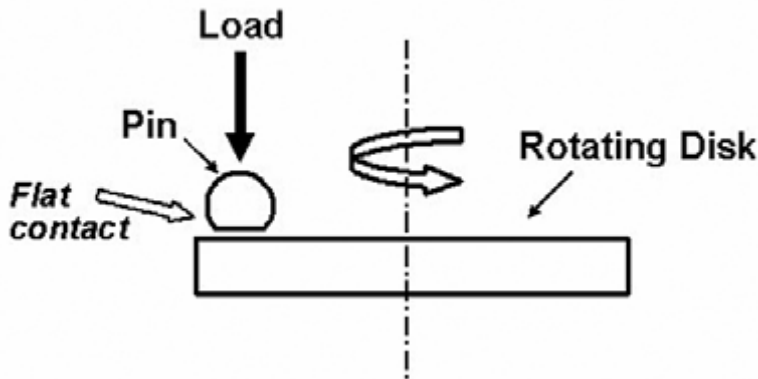
Μετά τις μετρήσεις ροπής, ερευνήθηκε η φθορά των περιστρεφόμενων επιφανειών με χρήση τρισδιάστατου μικροεπιφανειακού οπτικού προφιλόμετρου (three-dimensional (3D) microsurface optical profilometer). Τα αποτελέσματα αυτών των μελετών συνοψίζονται στο πίνακα 1. Όπως φαίνεται από τα στοιχεία στον πίνακα η φθορά της επιφάνειας εφαρμογής των τροποποιημένων στεγανωτικών είναι ελαφρώς υψηλότερη από αυτή των στεγανωτικών ελέγχου. Παρουσιάζουν όμως υψηλότερη εσωτερική φθορά η οποία πιθανόν να οφείλεται στο ότι έχουν τραχύτερη επιφάνεια.

Πίνακας 5.2.5. Μέγεθος της φθοράς της επιφάνειας εφαρμογής των στεγανωτικών ελέγχου και των τροποποιημένων στεγανωτικών

SiC Δακτύλιοι	Insert No	Φθορά Δακτυλίου (μm)	Εσωτερική φθορά	Comments
Ελέγχου	1	0.55	0.2	
Laser	2	0.71	1.26	
Τροποποιημένοι				

5.2.6. Αποτελέσματα: Δοκιμές Χαλύβδινων Δοκιμών

Έγιναν δοκιμές μη κατευθυνόμενης ολίσθησης σε αεροστεγή στεγανωτικά με λίπανση λαδιού μέσω ενός εμπορικά διαδεδομένου συστήματος δοκιμών για διάταξη επαφής στυλίσκου-δίσκου. Ο στυλίσκος αποτελείται από μία 9.55 χιλιοστών σκληρυμένη χαλύβδινη μπάλα (9.55 mm diam hardened 52100 steel ball) με ονομαστική σκληρότητα 60 Rc πάνω στην οποία μία επίπεδη περιοχή 4.7 χιλιοστών δημιουργείται με τρόχισμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μία σύμμορφη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με τον περιστρεφόμενο δίσκο όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.6.1.



Σχήμα 5.2.6.1. Διάταξη συστήματος επαφής μεταξύ δίσκου και στυλίσκου.

Τα 50 χιλιοστών διαμέτρου και 10 χιλιοστών πάχους δείγματα δίσκων είναι κατασκευασμένα από σκληρυμένο H-13 χάλυβα και έχουν ονομαστική σκληρότητα 60 Rc. Οι δοκιμές έγιναν σε δείγματα δίσκων τα οποία είχαν γυαλισμένες και με κοιλότητες επιφάνειες. Οι δοκιμές διεξήχθησαν με ονομαστικά φορτία των 2,5,10 και 20N και ταχύτητες ολίσθησης των 0.015 και 0.75m/sec. Όλοι οι δίσκοι έχουν λιπανθεί με κοινό λάδι μηχανής. Η διαδικασία της δοκιμής αποτελείται από την έναρξη των δοκιμών στη χαμηλή ταχύτητα των 0.015m/sec και υπό συνεχές φορτίο. Η ταχύτητα ολίσθησης αυξάνεται σε βήματα των 0.05m/sec κάθε τρία λεπτά. Το πρωτόκολλο των δοκιμών διαβεβαιώνει ότι κάθε επαφή ξεκινάει με κατάσταση οριακής λίπανσης και περνάει σε κατάσταση μικτής λίπανσης και τελικώς σε κατάσταση υδροδυναμικής λίπανσης καθώς η ταχύτητα ολίσθησης αυξάνεται. Όσον αφορά τη μεταβολή του συντελεστή τριβής με το χρόνο και την ταχύτητα ολίσθησης, ισχύουν τα εξής:

- Η συμπεριφορά της τριβής για τις δοκιμές με τις επιφάνειες έχει τη μορφή της καμπύλης Streibeck, στην οποία ο συντελεστής τριβής στη κατάσταση οριακής λίπανσης είναι υψηλός, λαμβάνοντας μία τυπική τιμή της τάξης των 0.12. Όσο η ταχύτητα ολίσθησης αυξάνει, το πάχος της λεπτής μεμβράνης λαδιού επίσης αυξάνει. Μετά το πέρας 180 sec ο λόγος του πάχους της λεπτής μεμβράνης λαδιού προς την τραχύτητα της επιφάνειας, που ονομάζεται και λόγος λ (λ), μεταφέρει την επιφάνεια σε κατάσταση μικτής λίπανσης με συνακόλουθο τη μείωση της τριβής. Σε αρκετά υψηλότερες ταχύτητες, το πάχος της λεπτής μεμβράνης λαδιού είναι αρκετά μεγάλο ώστε να μπορεί να διαχωρίσει πλήρως την ολισθαίνουσα επιφάνεια, όπου και παρουσιάζεται η υδροδυναμική λίπανση.

- Η συμπεριφορά της τριβής για τις γυαλισμένες και με κοιλότητες επιφάνειες είναι παρόμοια, αλλά αρκετά μικρότερου μεγέθους για χαμηλή ταχύτητα ολίσθησης.

Η διαπίστωση αυτή υποδηλώνει ότι η μικρο-τροποποίηση της επιφάνειας με κοιλότητες, είτε μειώνει το μέγεθος του συντελεστή τριβής στην κατάσταση οριακής λίπανσης, είτε μεταφέρει τη συνθήκη λειτουργίας για οριακή λίπανση σε χαμηλότερες ταχύτητες.

5.2.7. Συμπεράσματα

Οι μελέτες επιβεβαίωσαν ότι η τροποποίηση της επιφάνειας με σχηματισμό κοιλοτήτων μέσω laser έχει ευεργετικές επιδράσεις στην απόδοση των στεγανωτικών από καρβίδιο του πυριτίου (SiC). Συγκεκριμένα, η δημιουργία κοιλοτήτων μειώνει σημαντικά τη ροπή και συνεπώς μπορεί να αυξήσει την ενεργειακή αποδοτικότητα ηλεκτρικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται σε αντλίες. Η δημιουργία κοιλοτήτων προκαλεί μία αμυδρή αύξηση στη φθορά αλλά το πρόβλημα αυτό μπορεί να εξαιρεθεί με εφαρμογή χαμηλής τριβής λεπτών στρωμάτων από άνθρακα (low friction carbon film) όπως το NFC στις επιφάνειες αυτές. Για χαλύβδινες επιφάνειες με λίπανση λαδιού, η LST μειώνει την τριβή σημαντικά.

Τα αποτελέσματα από αυτές τις δοκιμές δείχνουν ότι τροποποιώντας με laser το μέτωπο των στεγανωτικών μπορούμε να μειώσουμε σημαντικά την ροπή αλλά συγχρόνως αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μία μικρή αύξηση της φθοράς. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι οι τροποποιημένες επιφάνειες λόγω των κοιλοτήτων είναι πιο ευπαθείς στη φθορά. Για να ξεπεραστούν τέτοιου είδους προβλήματα γίνεται εφαρμογή επικαλυπτικών στρωμάτων χαμηλής τριβής όπως το NFC στα τροποποιημένα με laser αεροστεγή στεγανωτικά.

5.3. Δοκιμή της Τεχνολογίας LST σε Μηχανικά Αεροστεγή Στεγανωτικά ενός Πετροχημικού Διυλιστηρίου.

Μία από τις μεγαλύτερες πετροχημικές εταιρίες του Ισραήλ, η Gadiv petrochemical Industries Ltd, ξεκίνησε μία έρευνα το 1998 με σκοπό να βελτιώσει την αξιοπιστία των μηχανικών αεροστεγών στεγανωτικών που χρησιμοποιούνταν στο πετροχημικό της διυλιστήριο. Η εταιρία αποτίμησε τα οφέλη της LST κάνοντας σύγκριση ανάμεσα σε πανομοιότυπες αντλίες οι οποίες αντλούσαν υδρογονάνθρακα σε υγρή μορφή, όπου η μία ήταν εφοδιασμένη με ένα LST τροποποιημένο αεροστεγές στεγανωτικό και η άλλη με στάνταρ μη τροποποιημένο στεγανωτικό. Οι λεπτομέρειες των στεγανωτικών, των αντλιών, των ρευστών και οι συνθήκες λειτουργίας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1. Λεπτομέρειες και συνθήκες λειτουργίας Μηχανικών Τμημάτων

Seal	74 BW 2002539, Borg-Warner
Seal materials	Tungsten Carbide (WC) against carbon enriched with silicon (C/Si)
Seal diameter	55mm at shaft
Pump	128-3507A, Byron Jackson
Fluid pumped	C9-C10 hydrocarbons
Vapor pressure	7.25 bar
Viscosity	0.175 cp
Operating temperature	350° C
Pressure at the seal	4-5 bar

Το LST τροποποιημένο στεγανωτικό λειτουργούσε για πάνω από 10.000 ώρες για μία περίοδο 38 μηνών μέχρι να αντικατασταθεί. Στο ίδιο διάστημα το μη τροποποιημένο στεγανωτικό χρειάστηκε να αντικατασταθεί 4 φορές. Πιο συγκεκριμένα:

- Η αστοχία του στεγανωτικού προκλήθηκε από την τήξη του O-ring του ακίνητου στεγανωτικού δακτυλίου από βολφράμιο ως αποτέλεσμα της έκθεσης σε υψηλή θερμοκρασία
- Ο τροποποιημένος με LST δακτύλιος από καρβίδιο του βολφραμίου παρέμεινε σε άριστη και λειτουργική κατάσταση. Η επιπεδότητα στην επιφάνεια επαφής του δακτυλίου ήταν εσωτερικά 1μm και η επιπεδότητα εκτός της επιφάνειας επαφής ήταν 0.25μm.
- Ο δακτύλιος, με διακύμανση των 3-4 μm, μπορούσε να επανασυρναμολογηθεί μετά από γυάλισμα και λείανση.
- Η αναλογία φθοράς του δακτυλίου από καρβίδιο του βολφραμίου ήταν μόλις 1μm για 10000 ώρες λειτουργίας. Η τροποποίηση της τραχύτητας με laser αύξησε τη διάρκεια ζωής του στεγανωτικού κατά το τριπλάσιο.

Επιπροσθέτως, ο μέσος όρος κέρδους από τη χρήση στεγανωτικών με τροποποιημένη επιφάνεια ήταν της τάξης των 900\$ το χρόνο.

5.4 Μέγιστης Υδροστατικής Ακαμψίας Μηχανικό Αεροστεγές Στεγανωτικό του οποίου η Τραχύτητα της Επιφάνειας έχει τροποποιηθεί με χρήση Laser.

5.4.1 Εισαγωγή

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει η μελέτη βελτιστοποίησης ενός μερικώς τροποποιημένου αεροστεγούς στεγανωτικού η οποία περιλαμβάνει το θεωρητικό μοντέλο και τον πειραματικό έλεγχο. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της τροποποίησης της επιφάνειας ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή επίδραση της υδροστατικής πίεσης λαμβάνει χώρα στο θεωρητικό μοντέλο. Χρησιμοποιείται ένα σύστημα δοκιμών στο οποίο γίνονται μετρήσεις της ροπής, της τριβής και της θερμοκρασίας. Βρέθηκε ότι τα καλύτερα τροποποιημένα αεροστεγή στεγανωτικά παράγουν σημαντικά μικρότερη τριβή και θερμότητα. Επιπλέον, ένα μη ισορροπημένο στεγανωτικό (unbalanced seal), το οποίο είναι περιορισμένο από τον κατασκευαστή να δέχεται πιέσεις μέχρι 12 bar, μπορεί να μετατραπεί σε ένα υψηλής πίεσης στεγανωτικό το οποίο μπορεί να φέρει περίπου διπλάσιες πιέσεις.

Τα υψηλής πίεσης μηχανικά αεροστεγή στεγανωτικά βασίζονται στην επίδραση της υδροστατικής πίεσης ώστε να δημιουργήσει ένα άκαμπτο ρευστό στρώμα το οποίο είναι απαραίτητο για την ασφάλεια και την αξιόπιστη λειτουργία του στεγανωτικού. Η σταδιακή ανάπτυξη της υδροστατικής πίεσης και η συνεπαγόμενη αξονική ακαμψία οφείλεται στην αυξανόμενη αντίσταση της ροής του ρευστού κατά τη πορεία του από την υψηλής πίεσης στην χαμηλής πίεσης πλευρά της δεξαμενής στεγάνωσης. Άλλα μέσα δημιουργίας της αξονικής ακαμψίας διάφοροι τύποι διάτρητων στεγανωτικών αντιστάθμισης [149,150,151], η μετωπική κακοευθυγράμμιση [152], η μετωπική κωνικοποίηση [149,153,154]. Άλλες αναφορές σχετικά με την υψηλή πίεση των υδροστατικών αεροστεγών στεγανωτικών μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία [155,156,157,158].

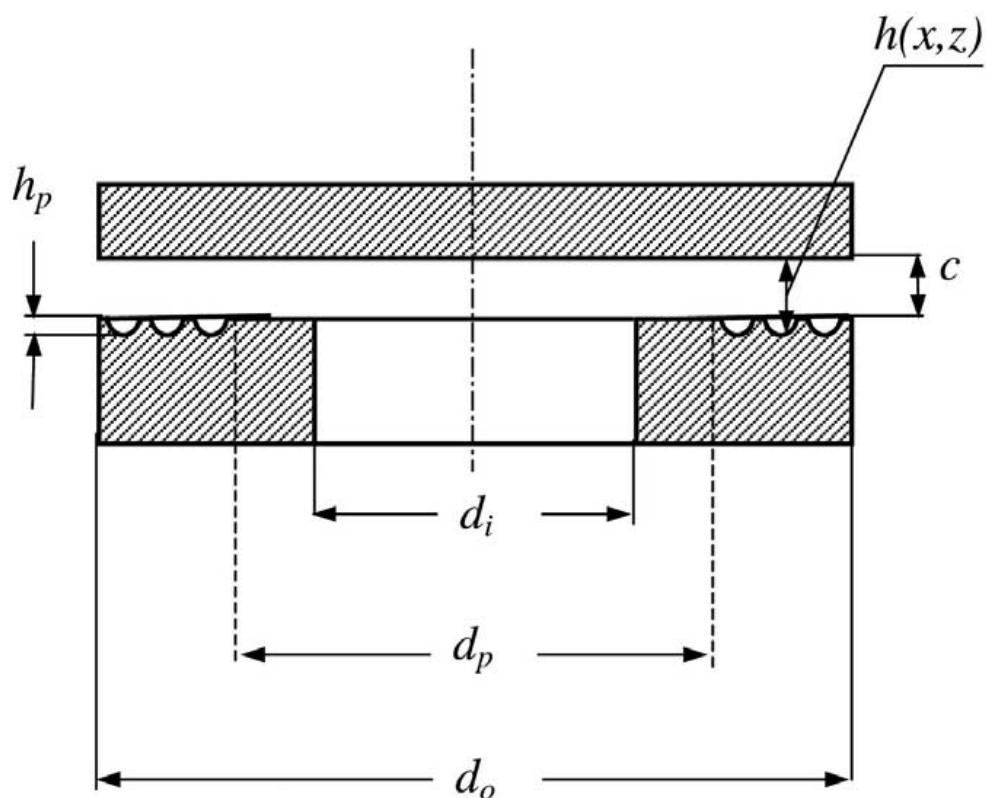
Η όλο και αυξανόμενη ζήτηση για υψηλότερες πιέσεις και ταχύτητες στα σύγχρονα συστήματα στεγανοποίησης, απαιτεί δημιουργικότητα και καινούργιες ιδέες για καλύτερης απόδοσης στεγανωτικά. Η επιστήμη της τεχνολογίας της επιφάνειας προσφέρει ενδιαφέρουσες προοπτικές στο σχεδιασμό βελτιωμένων μηχανικών στεγανωτικών. Έτσι έγινε μία διαφορετική προσέγγιση το 1994 [159] για τη αύξηση της αξονικής ακαμψίας κατά την οποία η αυξανόμενη αντίσταση στη ροή βασίζεται σε μία αλλαγή στις συνθήκες ολίσθησης. Σε αυτήν την ενότητα ο μηχανισμός για την αξονική ακαμψία αποτελείται από μία μερικώς πορώδη επιφάνεια εφαρμογής όπου η αναλογία πόρων, με χαμηλότερη αντίσταση στη ροή, είναι σε γειτονική περιοχή με την πλευρά υψηλής πίεσης της δεξαμενής στεγάνωσης. Βρέθηκε ότι ένα βέλτιστου μερικώς πορώδους στεγανωτικό είναι ανώτερο ενός βέλτιστου κωνικής επιφάνειας εφαρμογής στεγανωτικού όσον αφορά τη μέγιστη αξονική ακαμψία για δεδομένη διαρροή.

Πιο πρόσφατα, η LST χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς στην αύξηση της υδροδυναμικής αξονικής ακαμψίας των μηχανικών στεγανωτικών [160]. Η τεχνολογία LST βασίζεται σε μία παλμική δέσμη laser, η οποία, κατά τη διαδικασία αποβολής υλικού, δημιουργεί χιλιάδες μικρο-πόρους στη μία από τις επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή. Ελέγχοντας τις παραμέτρους της δέσμης, είναι δυνατό να ελεγχθεί με μεγάλη ακρίβεια η διάμετρος, το βάθος και η πυκνότητα της περιοχής των πόρων, και συνεπώς να επιτευχθεί η βέλτιστη τροποποίηση όπως αυτή ορίζεται από το θεωρητικό μοντέλο. Πράγματι, η LST έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε μηχανικά αεροστεγή στεγανωτικά τα οποία χρησιμοποιούνται σε αντλίες, [161] και έχει προσελκύσει την προσοχή πολλών ερευνητών [162]. Το 2001 έγινε επέκταση της τεχνικής αυτής και σε στεγανωτικά αερίων (gas seals) [163].

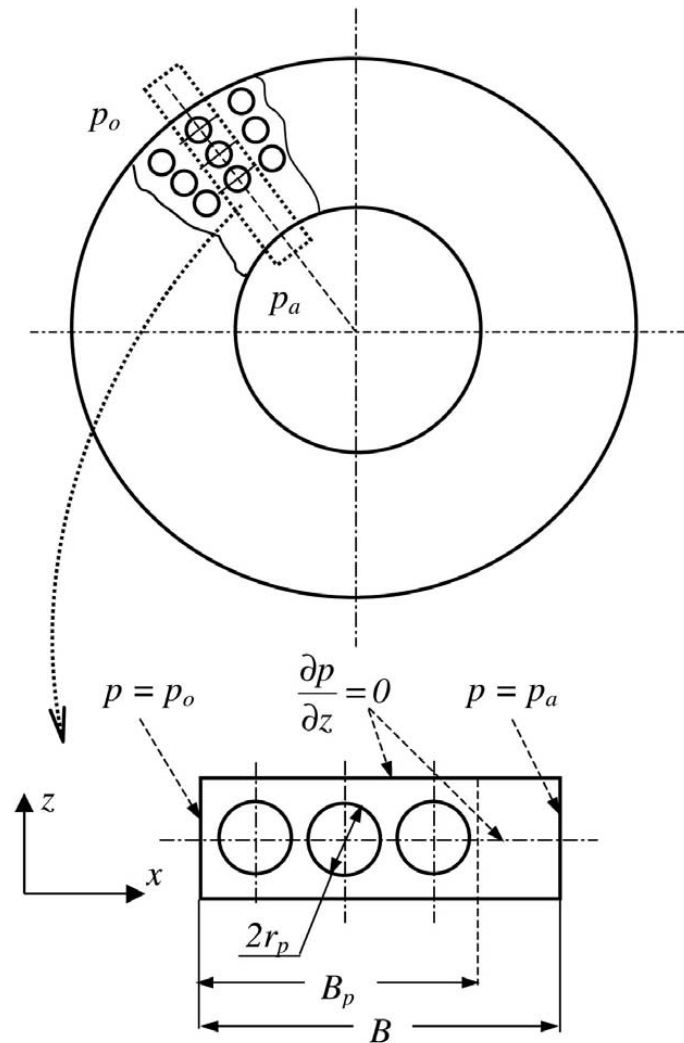
Σε αντίθεση με τις πρακτικές δυσκολίες που συνοδεύονται με την ενσωμάτωση ενός μετώπου μερικού πορώδους σε ένα μηχανικό αεροστεγές στεγανωτικό [159], είναι σχετικά εύκολο να τροποποιηθεί μερικώς ένα μέρος του μετώπου με τη χρήση της LST. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα να επιτευχθεί υδροστατική αξονική ακαμψία σε υψηλής πίεσης στεγανωτικά με τη χρήση μίας ιδιαίτερα απλής, υψηλής ακρίβειας και αξιόπιστης τεχνικής.

5.4.2 Ανάλυση

Στο Σχήμα 5.4.2.1. και 5.4.2.2. παρουσιάζεται σχηματικά ένα μερικώς τροποποιημένο με LST μηχανικό αεροστεγές στεγανωτικό.



Σχήμα 5.4.2.1. Μερικώς τροποποιημένο με laser μηχανικό στεγανωτικό



Σχήμα 5.4.2.2. Ακτινική στήλη πόρων και οριακές συνθήκες.

Η τροποποιημένη επιφάνεια που γειτονεύει στην περιοχή υψηλών πιέσεων εκτείνεται από d_p έως d_o . Ο λόγος των διαμέτρων στα μηχανικά στεγανωτικά είναι κοντά στη μονάδα και γι αυτό το λόγο η καμπύλωση του στεγανωτικού μπορεί να αμεληθεί. Το γεγονός αυτό επιτρέπει να θεωρούμε την LST τροποποιημένη επιφάνεια ότι αποτελείται από στήλες ακτινικών μικρο-πόρων όπως φαίνεται στο Σχήμα2. Η κάθε στήλη έχει μήκος B το οποίο ισούται με το ακτινικό πλάτος της δεξαμενής στεγάνωσης ενώ το LST μήκος B_p ισούται με $(d_o - d_p)/2$. Υποθέτοντας παράλληλες επιφάνειες στο στεγανωτικό, είναι επαρκές λόγω αξονικής συμμετρίας να ασχοληθούμε με μία μόνο στήλη. Η κατανομή της υδροστατικής πίεσης για μία στήλη πόρου λαμβάνεται από την αδιάστατη εξίσωση Reynolds:

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial Z} \right) = 0 \quad (1)$$

όπου οι αδιάστατες παράμετροι είναι:

$$P = \frac{P - P_a}{P_0 - P_a}$$

$$X = \frac{x}{r_p}$$

$$Z = \frac{z}{r_p}$$

$$H(X,Z) = \frac{h(x,z)}{c}$$

Και p_a είναι η οριακή χαμηλή πίεση στην εσωτερική διάμετρο d_i . Επίσης να αναφέρουμε ότι οι αδιάστατες οριακές τιμές των παραμέτρων είναι $P=1$ και $P=0$ στο $X=0$ και $X=B/r_p$ αντίστοιχα. Η υδροστατική δύναμη W , η οποία διαχωρίζει τις επιφάνειες του στεγανωτικού που βρίσκονται σε επαφή, υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την κατανομή της υδροστατικής πίεσης για όλη την περιοχή της δεξαμενής στεγάνωσης και μπορεί να συσχετιστεί με την μέση αδιάστατη υδροστατική πίεση P_{av} ως εξής:

$$P_{av} = \frac{W}{\pi(d_0^2 - d_i^2)(p_0 - p_a)} \quad (2)$$

Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τη μέση υδροστατική πίεση είναι:

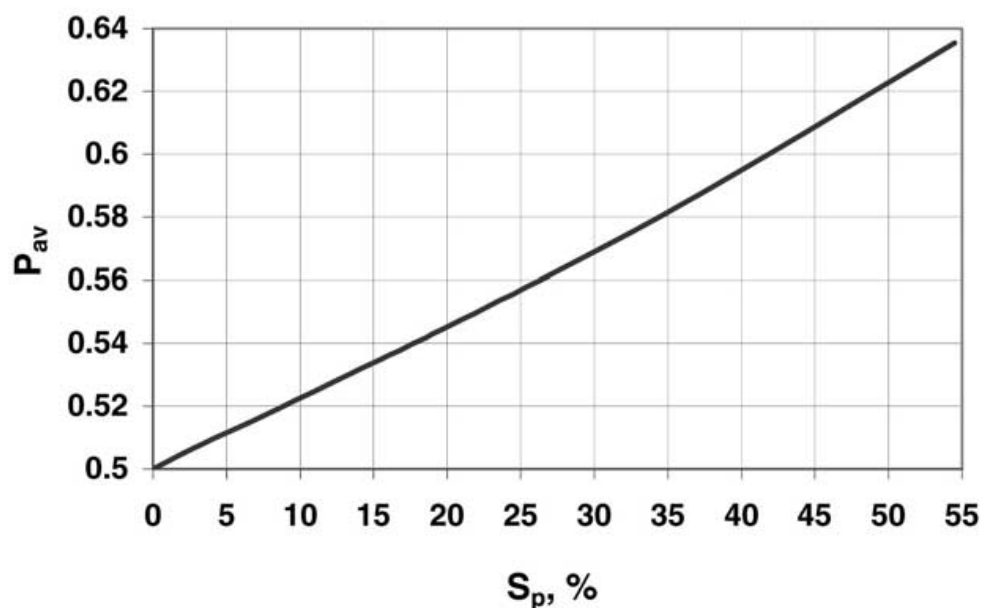
1. Η πυκνότητα των πόρων στην περιοχή S_p , η οποία αντιπροσωπεύει το ποσοστό της περιοχής του μετώπου του στεγανωτικού μεταξύ d_p και d_0 (Σχήμα 5.4.2.1.) το οποίο περιέχει πόρους.
2. Ο λόγος του βάθους προς τη διάμετρο των πόρων $\varepsilon = hp/2\pi r$
3. Ο λόγος του διάκενου του στεγανωτικού $\delta = c/2\pi r$

$$a = \frac{d_0 - d_p}{d_0 - d_i}$$

4. Ο λόγος του τροποποιημένου μήκους

Στο Σχήμα 5.4.2.3. παρουσιάζεται η επίδραση της πυκνότητας πόρων S_p στη μέση υδροστατική πίεση P_{av} για τυπικές συνθήκες με $\delta=0,02$ και $\varepsilon/\delta=5$.

$$\alpha = 0.60; \delta = 0.02; \varepsilon/\delta = 5.$$

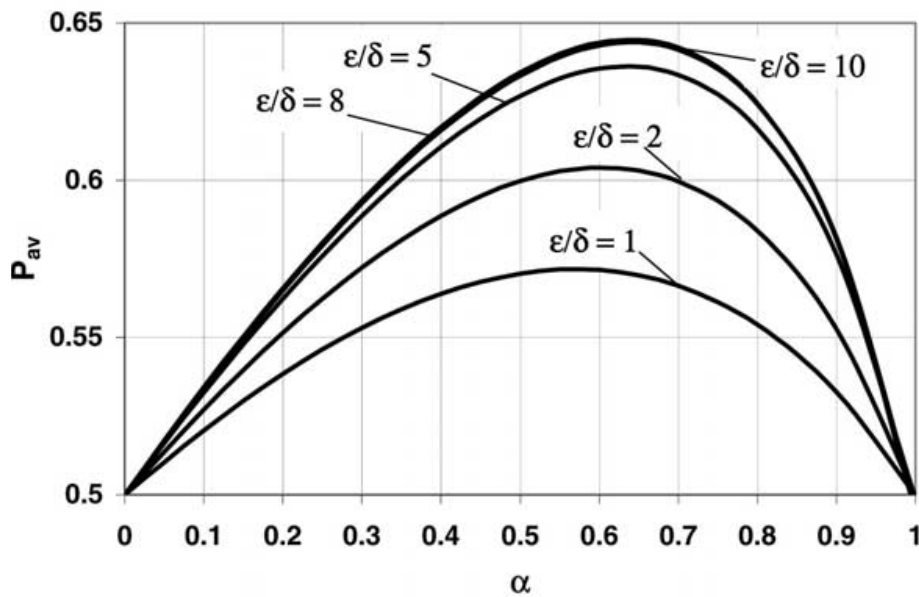


Σχήμα 5.4.2.3 Επίδραση της πυκνότητας πόρων S_p στη μέση υδροστατική πίεση P_{av} .

Όπως φαίνεται από το σχήμα η μέση πίεση μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την πυκνότητα πόρων. Για $S_p = 0$ η μέση πίεση ισούται με $P_{av} = 0.5$ όπως θα αναμενόταν για μία γραμμική πτώση της πίεσης κατά μήκος της μη τροποποιημένης δεξαμενής στεγάνωσης. Για $S_p = 55\%$ η μέση πίεση αυξάνεται έως και 0,64, τιμή που ισοδυναμεί με 28% αύξηση της δύναμης ανοίγματος σε σχέση με την αντίστοιχη του μη τροποποιημένου στεγανωτικού. Αυτό το χαρακτηριστικό του LST τροποποιημένου στεγανωτικού είναι που μειώνει την ισορροπία του στεγανωτικού. Μπορούμε λοιπόν να μετασχηματίσουμε ένα απλό μη ισορροπημένο στεγανωτικό σε ένα ισοδύναμο που είναι ισορροπημένο και με αυτό τον τρόπο να επεκτείνουμε το εύρος της πίεσης λειτουργίας του.

Στο Σχήμα 5.4.2.4. βλέπουμε την επίδραση του λόγου του μήκους τροποποίησης a στη μέση πίεση P_{av} για $\varepsilon = 0,1$ και $S_p = 55\%$.

$$\varepsilon = 0.1; Sp = 55\%.$$

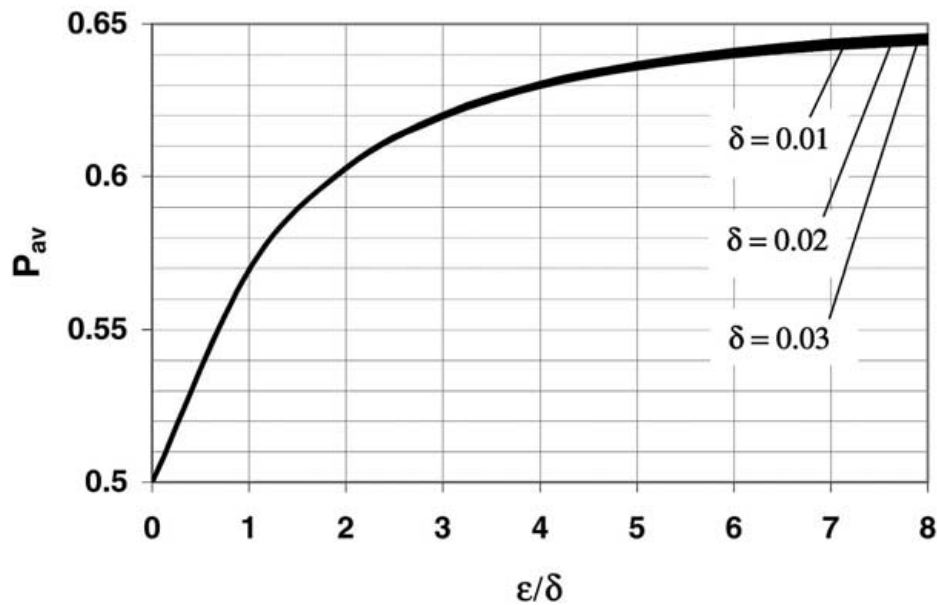


Σχήμα 5.4.2.4. Επίδραση του λόγου του μήκους τροποποίησης α στην αδιάστατη μέση πίεση P_{av} .

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ένα μεγάλο εύρος του λόγου ε/δ ο οποίος στην ουσία είναι ο λόγος του βάθους του πόρου προς το διάκενο του στεγανωτικού hr/c . Ο βέλτιστος λόγος του μήκους τροποποίησης κυμαίνεται από $0,55 \div 0,65$ καθώς ο λόγος ε/δ μεταβάλλεται από 1 έως 10. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, μία τιμή του $\alpha=0,6$ θα ήταν μία καλή επιλογή σχεδιασμού για τη βελτιστοποίηση της επίδρασης της LST σε κάθε υδροστατικό μηχανικό στεγανωτικό. Επίσης μπορούμε να δούμε από το Σχήμα ότι η αύξηση της μέσης πίεσης P_{av} μειώνεται για λόγους ε/δ μεγαλύτερους από 5.

Στο Σχήμα 5.4.2.5. παρουσιάζεται η επίδραση του λόγου $\varepsilon/\delta = hr/c$ στην αδιάστατη μέση πίεση P_{av} για εύρος διάκενου του στεγανωτικού $0,001 \leq \delta = c/2r \leq 0,03$.

$$\alpha = 0.64; S_p = 55\%.$$



Σχήμα 5.4.2.5. Επίδραση του λόγου ϵ/δ στην αδιάστατη μέση πίεση P_{av} για διάφορες τιμές διάκενου του στεγανωτικού.

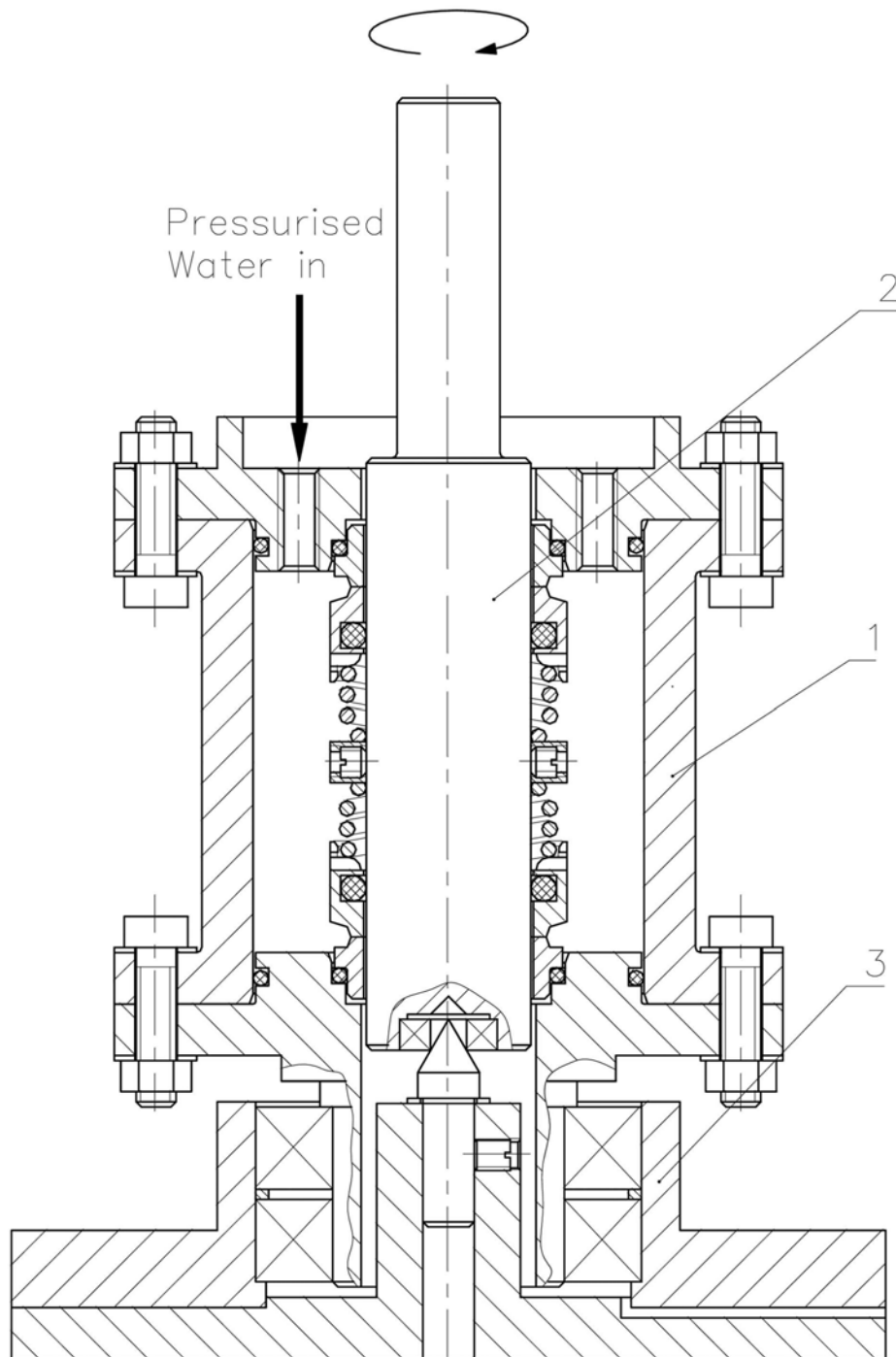
Όπως μπορούμε να δούμε από το σχήμα, η μέση πίεση δεν είναι ευαίσθητη σε μεταβολές του δ για αυτό το εύρος των τιμών του. Αυτό σημαίνει ότι για δεδομένη διάμετρο πόρων $2r_p$, η μέση πίεση P_{av} είναι ανεξάρτητη από το διάκενο του στεγανωτικού c . Γι αυτό το λόγο, η επίδραση του λόγου ϵ/δ στη μέση πίεση οφείλεται στο βάθος των πόρων h_p και μόνο. Για την περίπτωση όπου $\delta=0$, μπορούμε να υποθέσουμε μία ομοιόμορφη πίεση p_0 στο τμήμα του στεγανωτικού από d_0 έως d_p , και μία γραμμική πτώση της πίεσης του τμήματος d_i σε p_a . Επομένως, το ανώτερο όριο της αδιάστατης μέσης πίεσης P_{av} είναι:

$$(P_{av})_{max} = \alpha + (1-\alpha)/2 \quad (3)$$

Η έρευνα της επίδρασης του εύρους της δεξαμενής στεγάνωσης στη μέση πίεση P_{av} αποκάλυψε ότι η επίδραση είναι πολύ μικρή και μπορεί να αγνοηθεί.

5.4.3 Πειραματικός σχεδιασμός και διαδικασία.

Ένα σχέδιο του μηχανήματος στο οποίο πραγματοποιούνται οι δοκιμές υπάρχει στο Σχήμα 5.4.3.1.



Σχήμα 5.4.3.1 Διάταξη συστήματος δοκιμών.

Αποτελείται από ένα φυλάκιο πίεσης (pressure vessel) (1) το οποίο διατηρεί τα δύο πανομοιότυπα μη ισορροπημένα στεγανωτικά σε διάταξη το ένα απέναντι από το άλλο. Η κοιλότητα μεταξύ των στεγανωτικών περιέχει αποσταγμένο νερό το οποίο μπορεί να αντέχει την πίεση με την κατάλληλη χρήση συσσωρευτών και αερίου αζώτου. Ένας άξονας (2) διαμέτρου 32mm συγκρατείται στο σφιγκτήρα της

ατράκτου της φρέζας και περιστρέφεται από τον ηλεκτρικό κινητήρα της μηχανής σε χαμηλό ρυθμό των 750 rpm. Το δοχείο πίεσης βρίσκεται στη διάταξη του ωστικού τριβέα (3) ο οποίος επιτρέπει ελεύθερη περιστροφή στο δοχείο πίεσης όταν η ροπή τριβής μεταφέρεται σε αυτό από τον περιστρεφόμενο άξονα μέσω του περιστρεφόμενου και του σταθερού τμήματος των δακτυλίων των δύο στεγανωτικών. Αυτή η ελεύθερη περιστροφή όμως εμποδίζεται από ένα βραχίονα προσκολλημένο στο δοχείο πίεσης ο οποίος ασκεί πίεση σε ένα στοιχείο φορτίου (loading cell) μέσω του οποίου γίνονται οι on-line μετρήσεις της ροπής της τριβής.

Η χαμηλή ταχύτητα των 750rpm επιλέχθηκε για να εξουδετερώσει κάθε υπαρκτή υδροδυναμική επίδραση που μπορεί να προκύψει από την τροποποίηση της επιφάνειας [160], έτσι ώστε οι μόνες υδροδυναμικές επιδράσεις να είναι στη μετρούμενη ροπή τριβής. Η θερμοκρασία του νερού μετρήθηκε από θερμοστοιχείο που είναι προσκολλημένο στο εξωτερικό τμήμα του δοχείου πίεσης. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν τα Burgmann MGI στεγανωτικά, για τα οποία έχει οριστεί μέγιστη πίεση λειτουργίας από τον κατασκευαστή στα 12 bar. Οι επιφάνειες των στεγανωτικών που είναι σε επαφή έχουν κατασκευαστεί από καρβίδιο του βολφραμίου και σχηματίζουν μία δεξαμενή στεγάνωσης εσωτερικής διαμέτρου 33.7mm και εξωτερικής διαμέτρου 42.1mm. Η διάμετρος εξισορρόπησης είναι 32mm, που έχει ως αποτέλεσμα λόγο ισορροπίας 1.23. Το φορτίο ελατηρίου του κάθε στεγανωτικού είναι στα 1.1bar. Επομένως, η μέση πίεση επαφής p_c , μεταξύ των επιφανειών των στεγανωτικών που είναι σε επαφή ισούται με:

$$p_c = [(1.23 - 0.5) (p_o - p_a) + 1.1] \text{bar}$$

ή στην αδιάστατη της μορφή

$$p_c = 0.73 + (1.1 - p_a) / (p_o - p_a) \text{bar}$$

Για αυτό το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 4 στεγανωτικά. Τα δύο από αυτά παρέμειναν μη τροποποιημένα ως μέτρο σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Τα υπόλοιπα δύο έχουν το σταθερό τμήμα των δακτυλίων τους τροποποιημένο με τις παρακάτω παραμέτρους:

1. Βάθος πόρων $h_p = 6 \mu\text{m}$
2. Διάμετρος πόρων $2r_p = 60 \mu\text{m}$ (προκύπτει για $\varepsilon = 0.1$)
3. Πυκνότητα $S_p = 55\%$.
4. Λόγος του μήκους τροποποίησης $\alpha = 66\%$

Οι παράμετροι αυτοί επιλέχθηκαν με βάση τα θεωρητικά αποτελέσματα από τα Σχήματα 5.4.2.3-5.4.2.5 με σκοπό να μεγιστοποιηθεί η επίδραση της υδροστατικής πίεσης στα στεγανωτικά. Σύμφωνα με την εξίσωση (3) η μέγιστη μέση πίεση για αυτή τη περίπτωση θα είναι :

$$(P_{av})_{\max} = 0.83$$

Ενώ η αδιάστατη πίεση επαφής θα είναι:

$$p_c = 0.73 + (1.1 - p_a) / (p_o - p_a) \text{bar}$$

Όπου χρησιμοποιήθηκε ως λόγο ισορροπίας (balance ratio) = 0.9 σε σχέση με το 1.23 που χρησιμοποιήθηκε για το μη τροποποιημένο στεγανωτικό. Υποθέτοντας ότι η ροπή της τριβής των στεγανωτικών είναι ανάλογη της πίεσης επαφής, μπορούμε να αναμένουμε μία μείωση της τάξης του 45% στη ροπή τριβής

του LST τροποποιημένου στεγανωτικού σε σύγκριση με το μη τροποποιημένο καθώς η διαφορά των πιέσεων (po- ra) αυξάνεται.

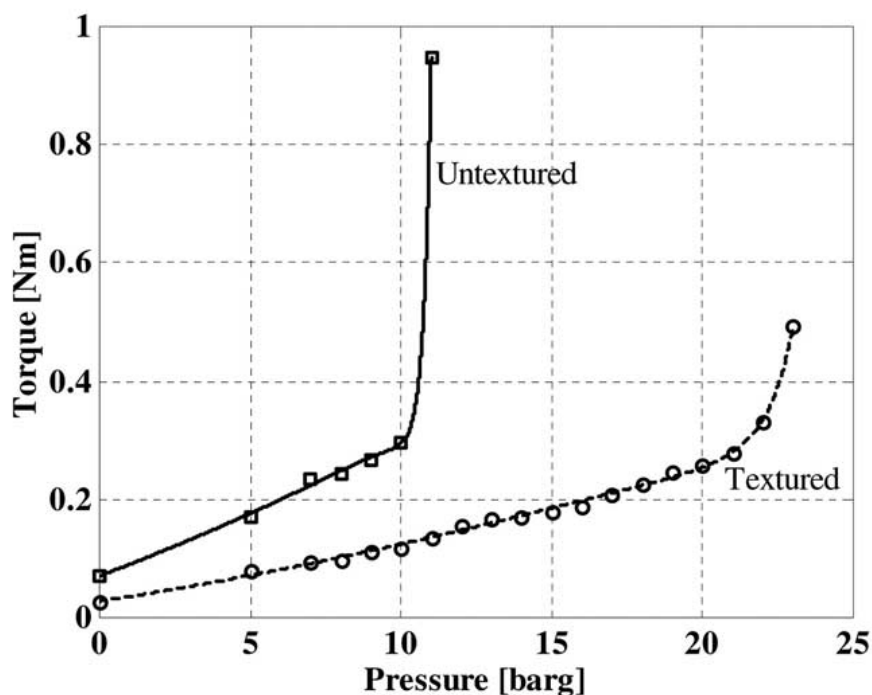
Η διαδικασία της δοκιμής περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. Τα δύο πανομοιότυπα στεγανωτικά συναρμολογούνται στο φυλάκιο πίεσης, το οποίο σφραγίζεται και γεμίζει με νερό.
2. Η αρχική πίεση που εφαρμόζεται στα στεγανωτικά ρυθμίζεται στα μηδέν barg και ενεργοποιείται ο ηλεκτρικός κινητήρας.
3. Η ροπή τριβής παρακολουθείται από συστήματα ελέγχου και μόλις σταθεροποιηθεί μετά από 10min η πίεση που εφαρμόζεται στα στεγανωτικά αυξάνεται κατά 5 bar.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται βαθμωτά με προσαύξηση του 1bar. Το πείραμα ολοκληρώνεται όταν η ροπή της τριβής αποκτήσει ασταθή συμπεριφορά περίπου στα 5Nm γεγονός που υποδηλώνει την έναρξη σημαντικής μετωπικής επαφής, ή όταν η πίεση στο στεγανωτικό φτάσει στα 23 barg που είναι κοντά στο όριο των 25barg του φυλακίου πίεσης. Η κάθε ολοκληρωμένη δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί τουλάχιστον πέντε φορές.

5.4.4 Αποτελέσματα δοκιμών

Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 5.4.4.1 όπου υπάρχει το διάγραμμα της ροπής της τριβής συναρτήσει της πίεσης που εφαρμόζεται στο στεγανωτικό όταν αυτό είναι τροποποιημένο και μη τροποποιημένο.



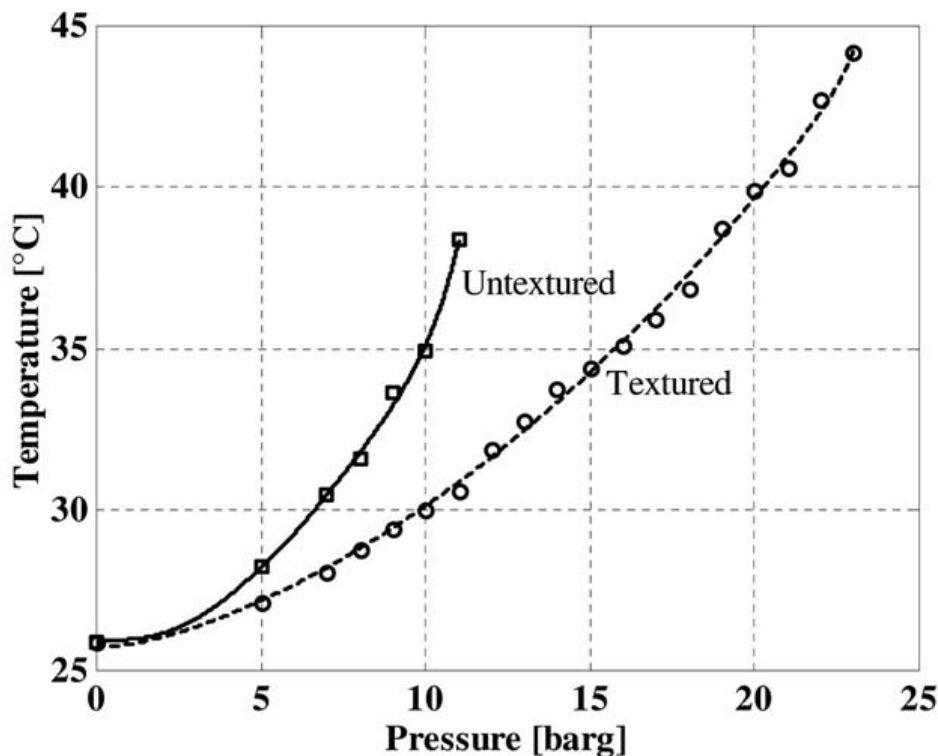
Σχήμα 5.4.4.1 Ροπή τριβής συναρτήσει της πίεσης που εφαρμόζεται σε τροποποιημένο και μη τροποποιημένο στεγανωτικό.

Οι τιμές της τριβής (οι οποίες είναι ο μέσος όρος από πέντε δοκιμές) είναι μονάχα για το ένα στεγανωτικό και λαμβάνεται διαιρώντας την ένδειξη της τριβής από τις μετρήσεις των δύο στεγανωτικών δια δύο.

Τα τροποποιημένα στεγανωτικά παράγουν σημαντικά χαμηλότερη ροπή τριβής σε σύγκριση με τα μη τροποποιημένα στεγανωτικά. Για εφαρμοζόμενη πίεση στο

στεγανωτικό των 5bar η μείωση στην τριβή είναι μεγαλύτερη από 50%, από 0.18Nm σε 0.09Nm. Οι δύο γραμμές αποκλίνουν καθώς η πίεση στο στεγανωτικό αυξάνεται, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερη υδροδυναμική επίδραση στις υψηλές πιέσεις. Οι δοκιμές με τα μη τροποποιημένα στεγανωτικά έπρεπε να τερματιστούν στα 12 bar λόγω της μεγάλης ένδειξης της ροπής τριβής, η οποία ελάμβανε τιμές των 5Nm που αντιστοιχεί από 2,5Nm για το κάθε στεγανωτικό. Πράγματι, τα όρια που δίνουν οι κατασκευαστές για τα μη τροποποιημένα στεγανωτικά δεν ξεπερνούν τα 12bar. Η αντίστοιχη ροπή τριβής για τα τροποποιημένα στεγανωτικά στα 12bar είναι μόνο 0,16Nm, άρα μείωση μεγαλύτερη από 90%. Τα τροποποιημένα στεγανωτικά μπορούν να λειτουργήσουν στο όριο των 23bar και σε αυτή τη σχετικά υψηλή πίεση η ροπή τριβής είναι μόλις 0,5Nm, όπου για τα μη τροποποιημένα στεγανωτικά η τιμή αυτή αντιστοιχεί στα 11bar. Συνεπώς, για την ίδια ροπή τριβής, η πίεση που μπορεί να φέρει το τροποποιημένο στεγανωτικό είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή του μη τροποποιημένου στεγανωτικού.

Στο Σχήμα 5.4.4.2 βλέπουμε τη θερμοκρασία του νερού όπως αυτή μετρήθηκε στην εξωτερική πλευρά του δοχείου πίεσης.



Σχήμα 5.4.4.2 Θερμοκρασία του νερού συναρτήσει της πίεσης, για τροποποιημένα και μη τροποποιημένα στεγανωτικά.

Τα τροποποιημένα στεγανωτικά διατηρούν χαμηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με όλο το εύρος των στεγανωτικών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές. Όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 5.4.4.2, η απόκλιση των δύο γραμμών μεγαλώνει όσο αυξάνονται οι πιέσεις. Για παράδειγμα, στα 11bar η θερμοκρασία του νερού για τα τροποποιημένα στεγανωτικά είναι στους 31°C σε σχέση με τους 38°C που αντιστοιχούν στα μη τροποποιημένα στεγανωτικά. Ο λόγος για τη συνεχή αύξηση της θερμοκρασίας σε υψηλότερες πιέσεις όσον αφορά τα τροποποιημένα στεγανωτικά είναι η αύξηση του χρόνου δοκιμών που απαιτείται για την πραγματοποίηση των επιπλέον βημάτων αύξησης της πίεσης καθώς και η έλλειψη της απαιτούμενης ψύξης ώστε να απομακρύνεται η θερμότητα που δημιουργείται κατά την τριβή. Αυτό έχει

σαν αποτέλεσμα να έχουμε μία σταθερή αύξηση της θερμοκρασίας της εξωτερικής πλευράς του φυλακίου πίεσης συναρτήσει του χρόνου δοκιμών και γι αυτό το λόγο θερμοκρασιακή σύγκριση των δύο στεγανωτικών μπορεί να γίνει μόνο μέχρι με τα 11 barg.

5.4.5 Συμπέρασμα

Η μερική τροποποίηση της επιφάνειας παρέχει ένα μηχανισμό για την αύξηση της υδροστατικής πίεσης στη δεξαμενή στεγάνωσης (sealing dam) παρόμοιο με αυτόν που προκαλεί η χρήση του ακτινικού βήματος ή η κωνικής επιφάνειας επαφή. Αποδείχθηκε ότι, ένα απλό μη τροποποιημένο στεγανωτικό με λόγο ισορροπίας (balance ratio)=1.23 και μέγιστη πίεση εφαρμογής τα 12 bar, μπορεί να μετασχηματιστεί μέσω της τροποποίησης της επιφάνειας σε ένα πλήρως ισορροπημένο στεγανωτικό, το οποίο μπορεί να φέρει πολύ υψηλότερες πιέσεις. Τα LST τροποποιημένα στεγανωτικά έδειξαν μετρήσεις στη ροπή τριβής σημαντικά μικρότερες σε σχέση με τα απλά στεγανωτικά. Όπως είχε προβλεφθεί, το όφελος από τη χρήση της LST μεγαλώνει καθώς αυξάνεται η πίεση στο στεγανωτικό λόγω της μεγάλης μείωσης στην πίεση επαφής μεταξύ των επιφανειών των στεγανωτικών που βρίσκονται σε επαφή.

Κεφάλαιο 6. ΕΙΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ LST.

6.1. Μικρο-διεργασία με Laser στη Βιομηχανία Αποθήκευσης Δεδομένων.

6.1.1. Εισαγωγή

Στη βιομηχανία αποθήκευσης δεδομένων, δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην αύξηση της πυκνότητας εγγραφής (recording density). Υπάρχουν αρκετά μηχανικά θέματα τα οποία συνδέονται με αυτήν την ανάγκη. Η τεχνολογία μικρο-διεργασίας με laser (laser microprocessing technology) έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως με σκοπό να αντιμετωπίσει αυτά τα ζητήματα ώστε να επιτευχθεί υψηλότερη πυκνότητα εγγραφής και καλύτερη αξιοπιστία. Για παράδειγμα, ο καθαρισμός της επιφάνειας με laser (laser surface cleaning) χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση μικρό-σωματιδίων και μικρό-μολύνσεων από τα μαγνητικά μέσα και τους ολισθητήρες της μαγνητικής κεφαλής. Ο καθαρισμός της επιφάνειας με laser έχει τη δυναμική να επιτυγχάνει καλύτερο καθαρισμό σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους καθαρισμού.

Η εφαρμογή laser σε μία επιφάνεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη βελτίωση των τριβολογικών ιδιοτήτων των κεφαλών των μέσων αλληλεπίδρασης. Επίσης, το laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να αποφευχθεί η μικρό-στατική τριβή και η μικρό-τριβή με τις ελάχιστες δυνατές φθορές. Εν τω μεταξύ, παρεμφερής τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία μικρό-προεξοχών στην επιφάνεια των μέσων ως σημείο βαθμονόμησης για τις δοκιμές ολίσθησης. Λόγω της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης για υψηλότερη πυκνότητα εγγραφής, η διεργασία με laser έχει αναπτυχθεί τόσο ώστε να χρησιμοποιείται για μηχανικά θέματα της τάξης του ενός δισεκατομμυριοστού.

Η χρήση των laser, σε συνδυασμό με scanning probe microscopes (SPM), μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για νανο-διεργασία (nanoprocessing) όσο και για νανο-λιθογραφία (nanolithography). Όπου SPM είναι έρευνα μέσω ενός μικροσκοπίου το οποίο επιτρέπει την απεικόνιση εικόνων των επιφανειών υπερβολικά μικρής κλίμακας, συμπεριλαμβανόμενης και ατομικής κλίμακας. Η εικόνα λαμβάνεται μέσω ενός ακροδέκτη (probe) ο οποίος καθώς κινείται στην επιφάνεια γίνεται καταγραφή της αλληλεπίδρασης μεταξύ αυτού και της επιφάνειας.

6.1.2. Καθαρισμός της Επιφάνειας με Laser (Laser Surface Cleaning)

Καθώς η τεχνολογία δημιουργίας μικρο-συσκευών κατευθύνεται προς υψηλότερες πυκνότητες και μικρότερες διαστάσεις, ο έλεγχος μόλυνσης είναι ένα από τα πιο κρίσιμα θέματα της βιομηχανίας [164,165...]. Στη βιομηχανία οδηγών δίσκων είναι ιδιαίτερα σημαντικό η αύξηση της πυκνότητας εγγραφής. Σωματίδια στον ολισθητήρα ή στις επιφάνειες του δίσκου μπορούν να προκαλέσουν ζημία τόσο στον ολισθητήρα όσο και στις επιφάνειες του δίσκου, και συνεπώς να οδηγήσουν σε αστοχία του συστήματος οδηγού του δίσκου. Γι αυτό το λόγο, έγιναν σημαντικές προσπάθειες ώστε να αναπτυχθούν αποτελεσματικές τεχνικές οι οποίες να απομακρύνουν τις επιφάνειες μόλυνσης [164,165..] όπως με εκτόξευση αέρα υψηλής πίεσης, με μηχανικό καθαρισμό και καθαρισμό με υπέρηχους. Κάποιες από αυτές τις τεχνικές όπως ο καθαρισμός με υπέρηχους απαιτούν την εμβύθιση του δείγματος μέσα σε υγρό γεγονός που δημιουργεί σημαντικά μειονεκτήματα. Μερικά από αυτά είναι:

1. Οι τεχνικές που περιλαμβάνουν υγρά μπορεί να επιφέρουν τη δημιουργία μολύνσεων λόγω του ανεπαρκούς καθαρισμού και φιλτραρίσματος του υγρού σε υπό-μικρό επίπεδο.

2. Η χρήση επικίνδυνων χημικών και διαλυτικών μέσων είναι ανεπιθύμητη τόσο για περιβαλλοντολογικούς όσο και για βιομηχανικούς λόγους καθώς μπορούν να προκαλέσουν καρκίνο στους ανθρώπους καθώς και να ελαττώνουν τη στρώση του όζοντος.
3. Άλλα προβλήματα που αντιμετωπίζονται με τις τεχνικές που περιλαμβάνουν υγρά είναι η διαδικασία ξηπλύματος και στεγνώματος και η ασυμβατότητα με άλλες διεργασίες. Γι αυτό χρησιμοποιούνται τεχνικές στεγνού καθαρίσματος με σκοπό να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα.

Ο καθαρισμός με laser μετά από δοκιμές αποδείχθηκε ότι είναι μία αποτελεσματική μέθοδος καθαρισμού για την απομάκρυνση μεμονωμένων αιωρούμενων σωματιδίων καθώς και στρώσεων από μολυσματικές οργανικές ουσίες σε στέρεες επιφάνειες [166-183]. Οι δύο τύποι καθαρισμού με laser που χρησιμοποιούνται, βασίζονται στη θέρμανση με παλμικό laser χωρίς ή με παρουσία ενός λεπτού υγρού επικαλυπτικού στρώματος. Θα αναφερόμαστε σε αυτές τις δύο μεθόδους ως στεγνό καθάρισμα με laser και καθάρισμα με laser παρουσία ατμού αντίστοιχα.

Κατά το στεγνό καθάρισμα με laser, τα σωματίδια μπορούν να εκτοξευθούν από τις μολυσμένες επιφάνειες μέσω ακτινοβολίας δέσμης laser μικρού παλμού. Ο μηχανισμός αυτός εκτόξευσης σωματιδίων είναι ταχύτατη θερμική διαστολή των σωματιδίων και της στερεής επιφάνειας, ο οποίος επιφέρει ισχυρή δύναμη εκκαθάρισης η οποία υπερνικά τη δύναμη προσκόλλησης μεταξύ των σωματιδίων και της επιφάνειας [179-183].

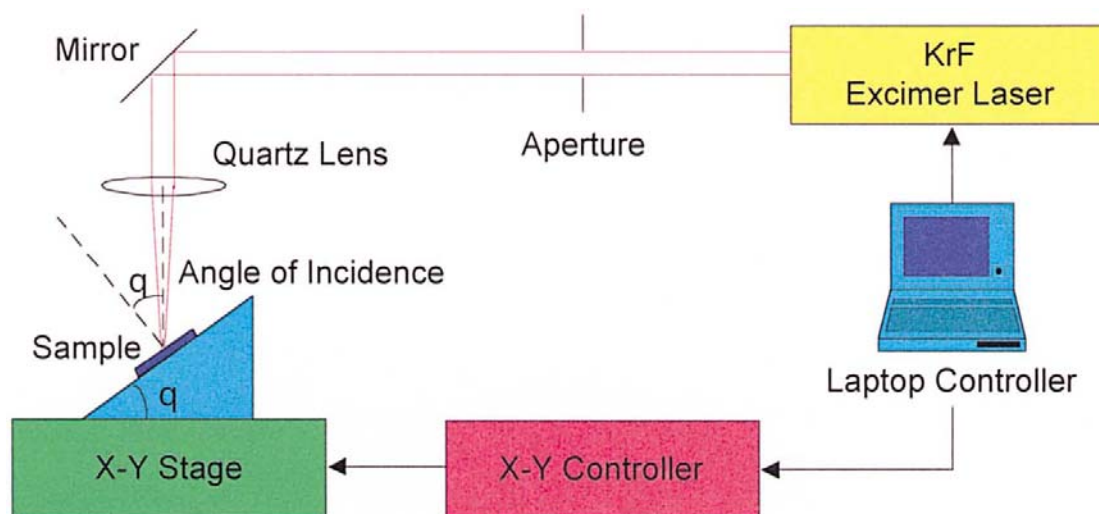
Για τον καθαρισμό με laser παρουσία ατμού ο προτεινόμενος μηχανισμός είναι η μεταφορά ροπής από το θερμαινόμενο με laser και απότομα εξατμιζόμενο λεπτό στρώμα υγρού στα σωματίδια της στερεής επιφάνειας. Σε σύγκριση με το υγρό καθάρισμα, έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Μερικά από αυτά είναι ότι η διαδικασία στέγνωσης γίνεται χωρίς τη χρήση οργανικών διαλυτικών ουσιών, ότι υπάρχει δυνατότητα επιλογής της περιοχής που πρόκειται να καθαριστεί, καθώς και καθαρισμός των δειγμάτων on line.

Εφόσον η νέα διεργασία είναι απαλλαγμένη από χημικά και είναι και αθόρυβη, είναι συνεπώς και φιλική προς το περιβάλλον. Επίσης, είναι οικονομικά συμφέρουσα μιας και δεν υπάρχουν αναλώσιμα και δεν υπάρχει η ανάγκη να εφαρμοστεί στα χρησιμοποιημένα χημικά συμβατική διαδικασία καθαρισμού. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1.2.1, ο καθαρισμός με laser μπορεί να απομακρύνει ένα μεγάλο φάσμα των μολύνσεων, συμπεριλαμβανόμενες και αυτές που είναι αδύνατο να απομακρυνθούν με συμβατικές μεθόδους καθαρίσματος όπως τα ενσωματωμένα σωματίδια και τα παχιά οργανικά στρώματα ικανού πάχους.

Cleaning methods	Lower limit of diameter of particles removed (μm)
Wiping	5
Brush scrubbing	0.5
Ultrasonic cleaning	0.5
Etching	0.5
High-pressure jet	0.2
Megasonic cleaning	0.2
Laser cleaning	0.1

Σχήμα 6.1.2.1. Διάμετρος σωματιδίων που μπορούν να απομακρυνθούν με την εκάστοτε μέθοδο καθαρισμού.

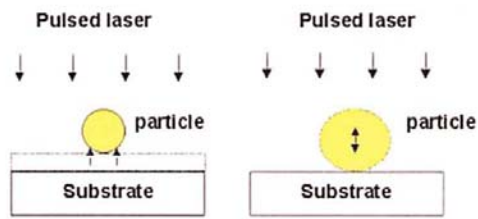
Η τεχνολογία αυτή παρέχει τη δυνατότητα επιλογής της περιοχής που θα καθαρισθεί, είναι ευέλικτη σε διάφορους τύπους υποστρωμάτων και είναι εφαρμόσιμη σε on line διαδικασία. Η μέθοδος αυτή έχει μελετηθεί λεπτομερώς και στο σχήμα 6.1.2.2 βλέπουμε την πειραματική εγκατάσταση.



Σχήμα 6.1.2.2 Πειραματική εγκατάσταση της μεθόδου καθαρισμού με laser (laser cleaning).

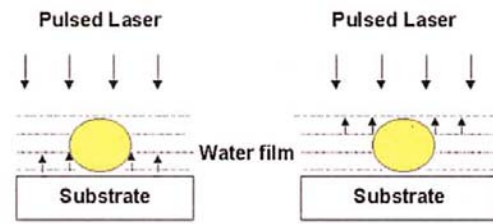
Το θεωρητικό μοντέλο, το οποίο συμπεριλαμβάνει τον καθαρισμό με laser παρουσία ατμού αναπτύχθηκε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα όπως φαίνεται στα σχήματα 6.1.2.3 και 6.1.2.4. το μοντέλο ταιριάζει ικανοποιητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα και έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για να προβλέψει κάποια αποτελέσματα κατά το καθαρισμό πολύπλοκου χημικού και φυσικού περιβάλλοντος.

A Dry Laser Cleaning



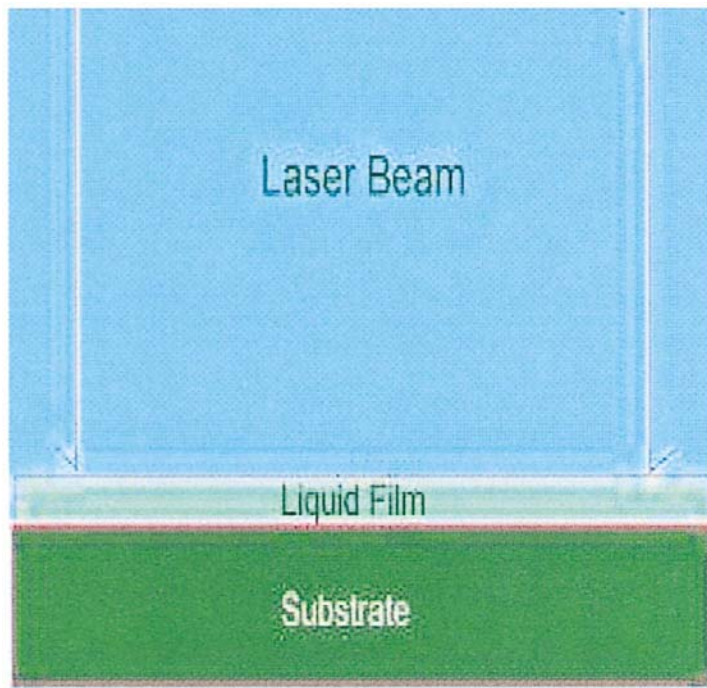
(a) Substrate expansion (b) Particle expansion

B Steam Laser Cleaning



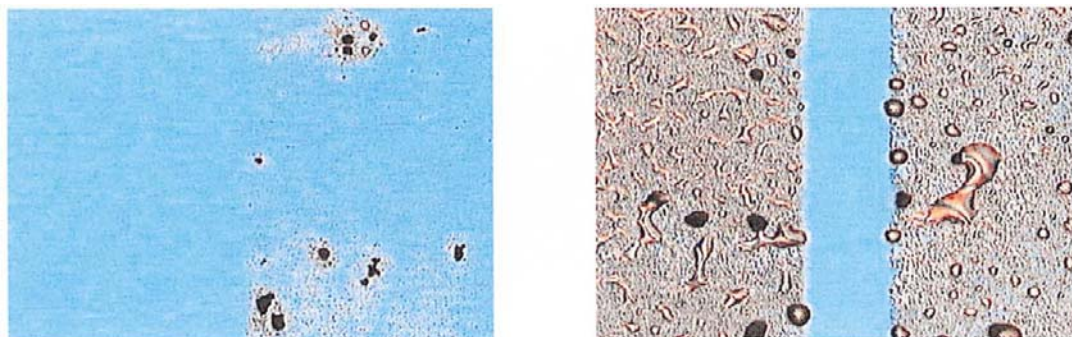
(a) Interface boiling (b) Surface boiling

Σχήμα 6.1.2.3 Μηχανισμός απομάκρυνσης σωματιδίων μέσω της μεθόδου καθαρισμού με laser (laser cleaning).

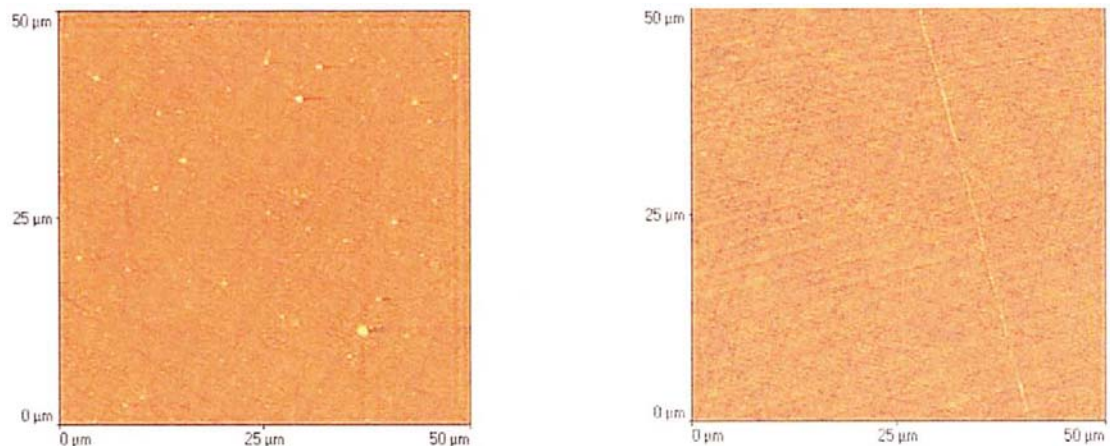


Σχήμα 6.1.2.4 Καθαρισμός με laser παρουσία ατμού (steam laser cleaning)

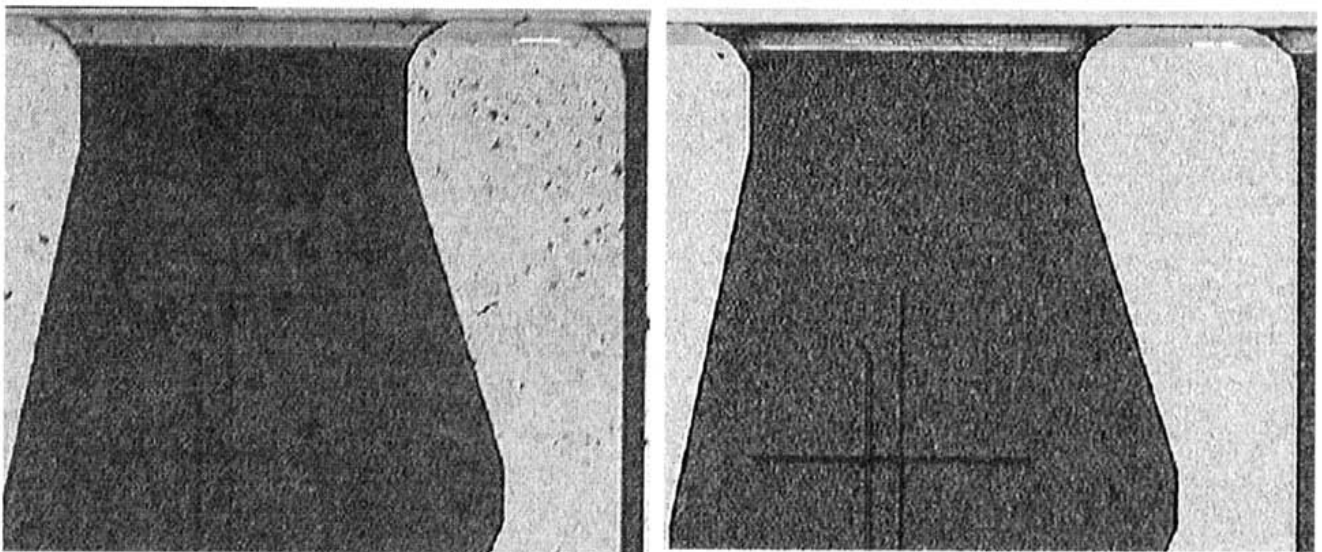
Η τεχνολογία καθαρισμού με laser έχει εφαρμοστεί για τον καθαρισμό μαγνητικών μέσων (σχήμα 6.1.2.5 και 6.1.2.6) και τους ολισθητήρες της μαγνητικής κεφαλής (σχήμα 6.1.2.7)



Σχήμα 6.1.2.5 Καθαρισμός με laser ξηρών και υγρών επιφανειών μετά από Μηχανική Τροποποίηση



Σχήμα 6.1.2.6 Καθαρισμός με laser: Υπο-μικρο σωματίδια

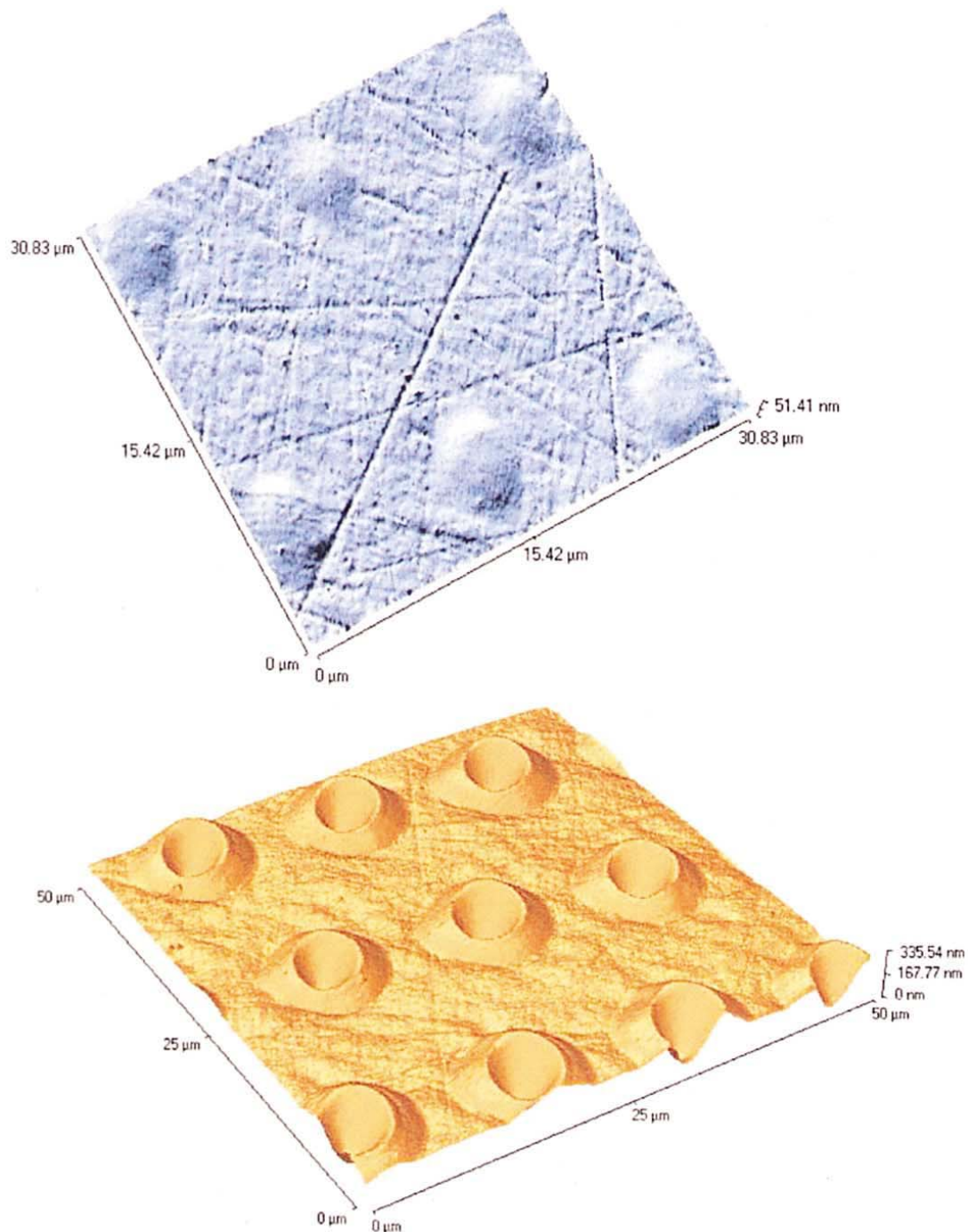


Σχήμα 6.1.2.7 Καθαρισμός ολισθητήρα.

Το 2002 αναπτύχθηκε μία νέα μέθοδος καθαρισμού η οποία συνδυάζει πηγές δέσμης laser και πλάσματος. Συνδυάζοντας την δραστηριοποίηση του πλάσματος στο υπόστρωμα της επιφάνειας και την τεχνολογία καθαρισμού με laser, μπορεί να επιτευχθεί πολύ υψηλή απόδοση καθαρισμού. Τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ευεργετικά για τη βιομηχανία σκληρών δίσκων. Η ανάπτυξη της πυκνότητας μαγνητικής αποθήκευσης και της σμίκρυνσης ημι-αγωγού απαιτούν πολύ καθαρά μέσα και ημι-αγώγιμες επιφάνειες. Οποιοδήποτε μόλυνση στην επιφάνεια μπορεί να προκαλέσει αστοχία της συσκευής. Η βελτίωση του επιπέδου έρευνας όσον αφορά τον καθαρισμό της επιφάνειας, μπορεί να ενισχύσει τη βιομηχανία αποθήκευσης δεδομένων.

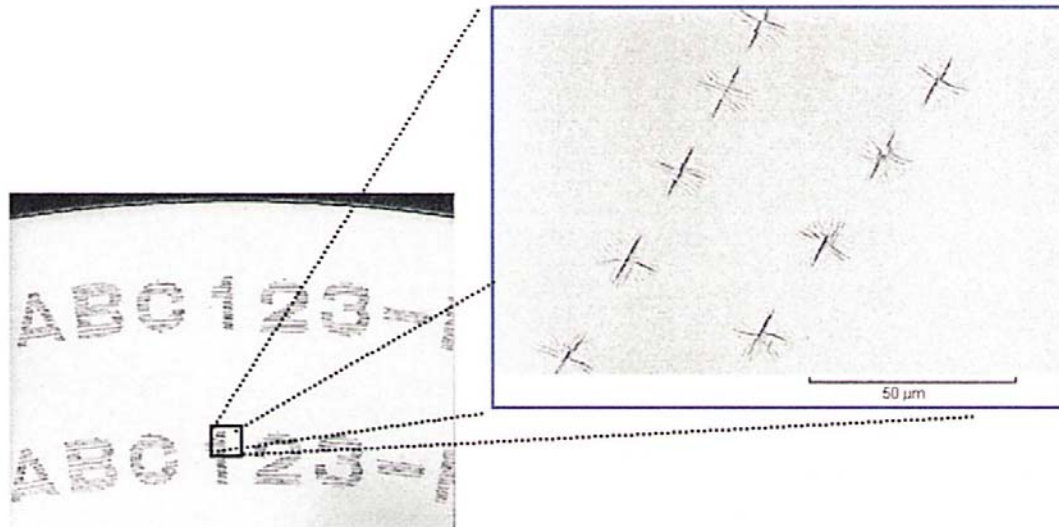
6.1.3 Τροποποίηση της Τραχύτητας με Laser, Δημιουργία Μικρο-προεξοχών με Laser και Παρεμφερείς Τεχνικές.

Η τροποποίηση της τραχύτητας με laser [184] είναι μία ακόμα τυπική εφαρμογή της τεχνολογίας μικρό-επεξεργασίας με laser στη βιομηχανία αποθήκευσης δεδομένων. Η τροποποίηση της τραχύτητας με laser μπορεί να προκαλέσει ελεγχόμενη τραχύτητα (controlled roughening) στις επιφάνειες των δίσκων, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη τριβολογική απόδοση. Τα laser υψηλής συχνότητας χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μικρο-προεξοχών στις επιφάνειες των μέσων με ύψος προεξοχής από μερικά νανόμετρα μέχρι μερικές δεκάδες νανόμετρα (Σχήμα 6.1.3.1).

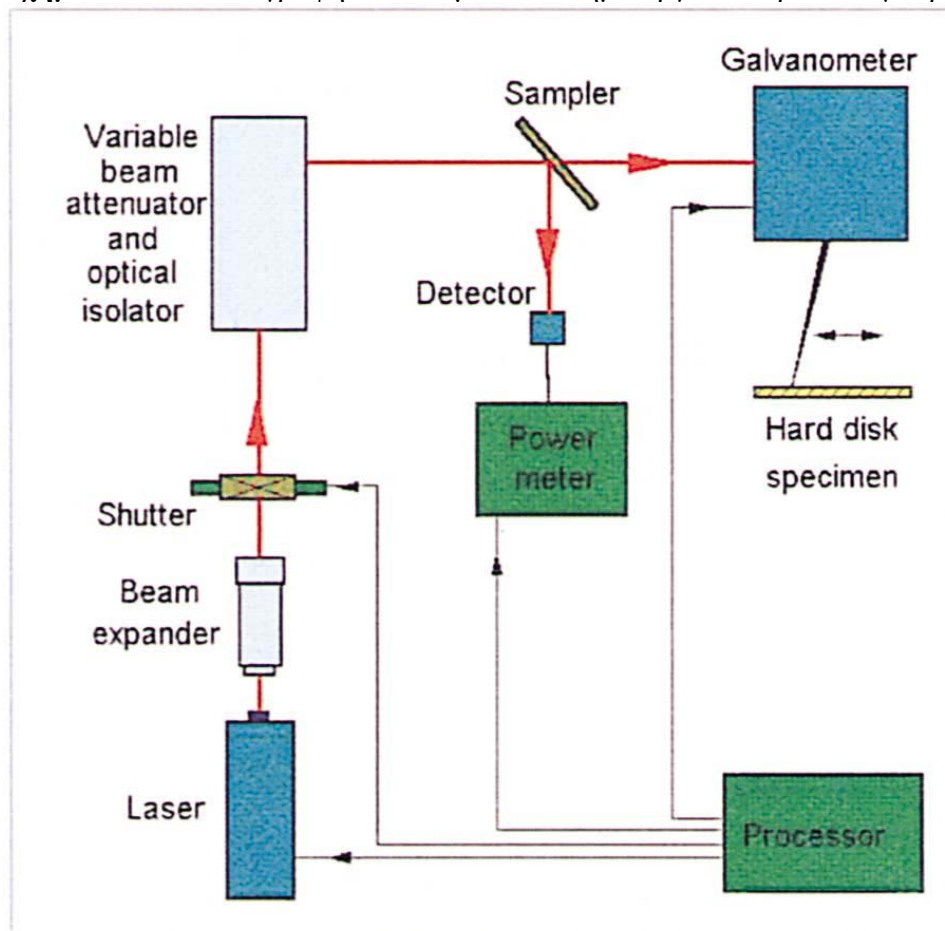


Σχήμα 6.1.3.1 Μικρο-προεξοχές (microbumps)

Η πλήρως ελεγχόμενη τραχύτητα της επιφάνειας μπορεί να μειώσει σημαντικά τη μικρό-τριβή, τη μικρό-στατική τριβή και τη φθορά. Αντίστοιχα με την τροποποίηση της τραχύτητας με laser, η δημιουργία προεξοχών με laser έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει προεξοχές με πλήρως ελεγχόμενο ύψος. Για την περίπτωση της καταγραφής των δίσκων όπως αυτή φαίνεται στα σχήματα 6.1.3.2 και 6.1.3.3., αναπτύχθηκε μία νέα τεχνολογία με σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη συμβατική καταγραφή δίσκων με laser.

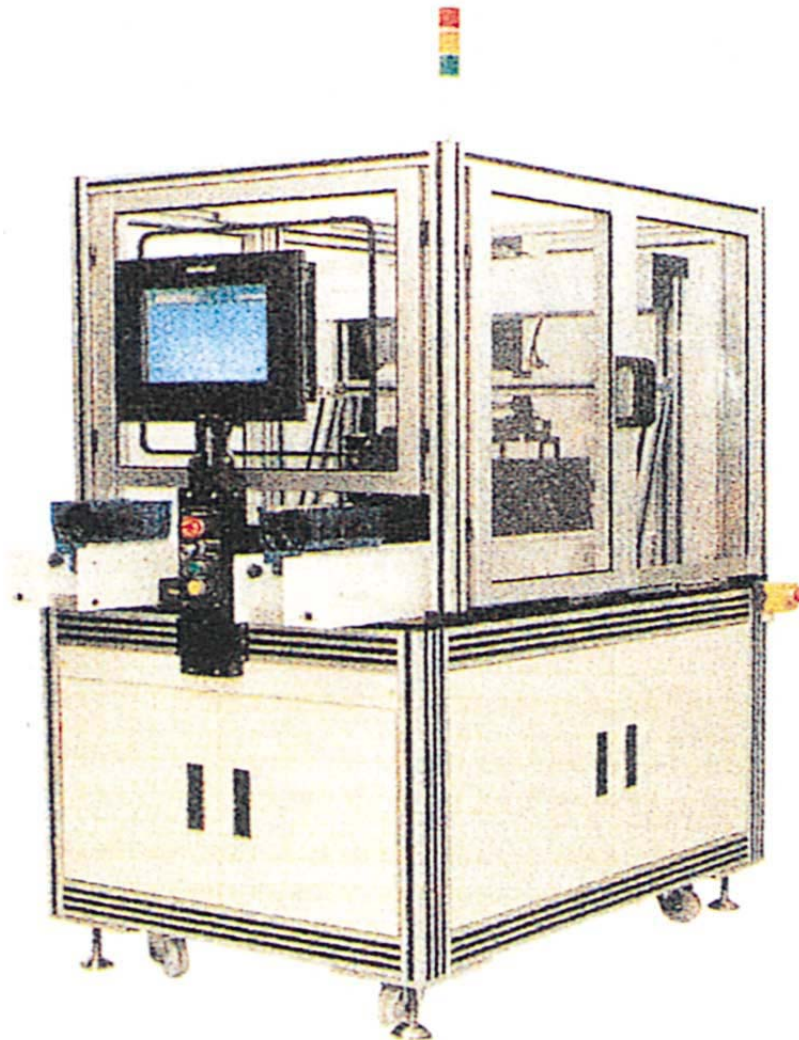


Σχήμα 6.1.3.2 Καταγραφή δίσκων με laser: Δημιουργία διακριτικού γνωρίσματος.



Σχήμα 6.1.3.3 Καταγραφή δίσκων με laser: Διάταξη του συστήματος

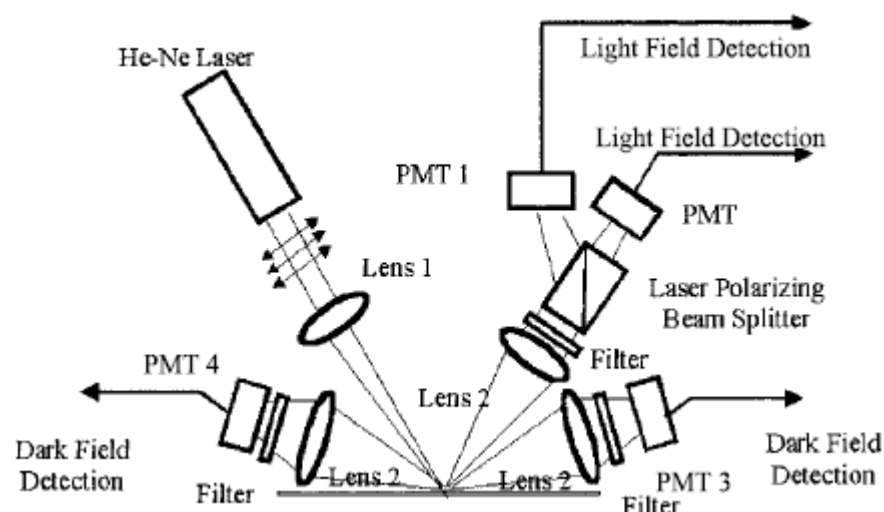
Εφόσον η παρούσα κατασκευή μαγνητικών δίσκων δεν διαθέτει αναγνώριση του δίσκου, υπάρχει μικρή ανιχνευσιμότητα όταν υπάρξει αστοχία στο δίσκο. Η δημιουργία διακριτικού γνωρίσματος με laser χρησιμοποιείται για την ανιχνευσιμότητα του προϊόντος και είναι απαραίτητο στη σύγχρονη μαζική παραγωγή. Λόγω της ανάγκης για υψηλή καθαρότητα στη δομή των δίσκων πολλαπλών στρώσεων (multilayered structure), η συμβατική μέθοδος δημιουργίας διακριτικού γνωρίσματος με laser (laser marking) δεν είναι πλέον εφαρμόσιμη στα μαγνητικά μέσα. Σε αυτήν την ενότητα, η δέσμη laser είναι πλήρως ελεγχόμενη με το TEM₀₀, γεγονός που επιφέρει παραμόρφωση των στρώσεων από NiP στην πολλαπλών στρώσεων επιφάνεια του δίσκου. Τα αποτελέσματα των ερευνών έδειξαν ότι ταιριάζοντας την άριστη συμμετρία της δέσμης με τη δομή πολλαπλών στρώσεων έχουμε σαν αποτέλεσμα την παραμόρφωση μόνο της επιφάνειας. Η μέθοδος είναι άνευ αποβολής υλικού και η καθαρότητα είναι εξασφαλισμένη. Το εξελιγμένο μηχάνημα σύνδεσης των δίσκων στο σχήμα 6.1.3.4 είναι πλήρως αυτοματοποιημένο και πληρεί όλες τις προδιαγραφές για μαζική παραγωγή.



Σχήμα 6.1.3.4. Μηχάνημα καταγραφής δίσκων με laser

6.1.4 Παρακολούθηση και Έλεγχος της Εφαρμογής Laser στην Επιφάνεια.

Ο έλεγχος και η παρακολούθηση της τροποποίησης της επιφάνειας με laser είναι ιδιαίτερα σημαντικά στις βιομηχανικές εφαρμογές. Τόσο ο καθαρισμός όσο και η τροποποίηση της επιφάνειας μπορούν να παρακολουθούνται και να ελέγχονται μέσω ακουστικού σήματος, ηλεκτρικού σήματος και μέσω ανιχνευτή οπτικού φάσματος και ανάδρασης όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1.4.1.



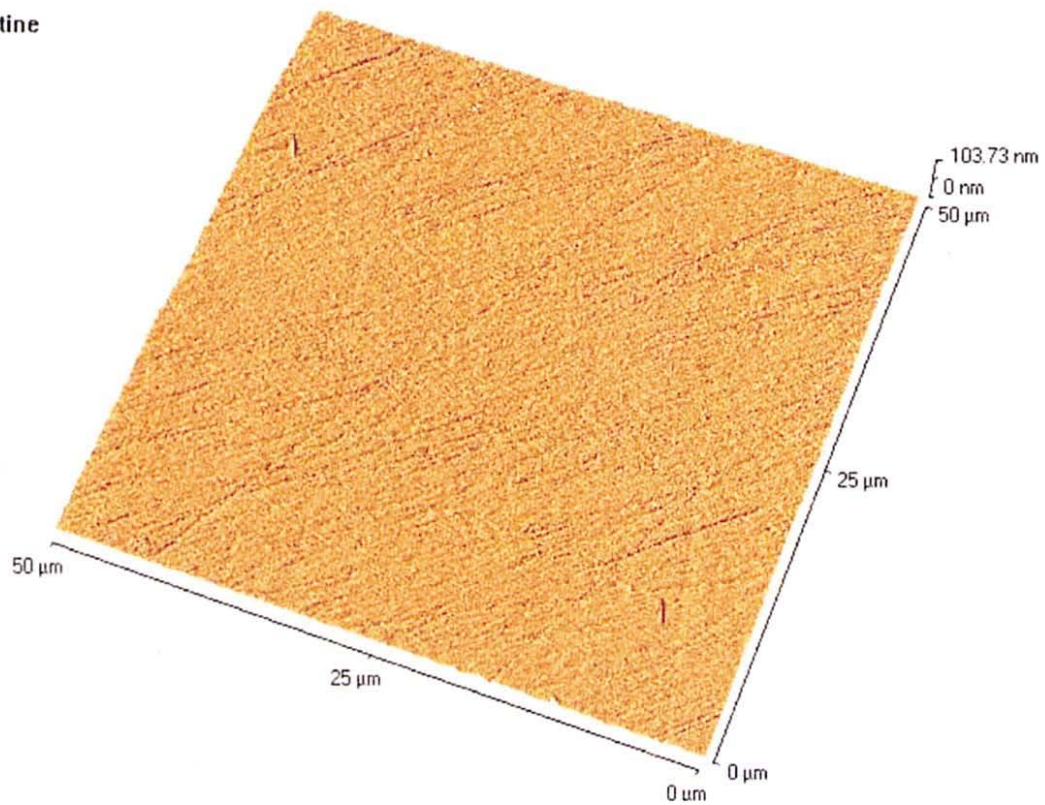
Σχήμα 6.1.4.1 Σύστημα παρακολούθησης της διεργασίας τροποποίησης της επιφάνειας

Το υλικό και το λογισμικό για την τεχνολογία αυτή είναι πλήρως ανεπτυγμένο. Η τεχνολογία αυτή είναι πολύ σημαντική για την εμπορευματοποίηση της τεχνολογίας μικροδιεργασίας με laser. Μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής laser στην επιφάνεια καθώς και να μειώσει το κόστος κατασκευής και να εξοικονομήσει χρόνο. Βάσει της πλήρως ανεπτυγμένης τεχνολογίας παρακολούθησης και ελέγχου η οποία είναι συνεχής κατά τη διάρκεια της δοκιμής, τα αποτελέσματα από αυτό το ερευνητικό έργο μπορούν να τεθούν υπό εφαρμογή εύκολα και γρήγορα.

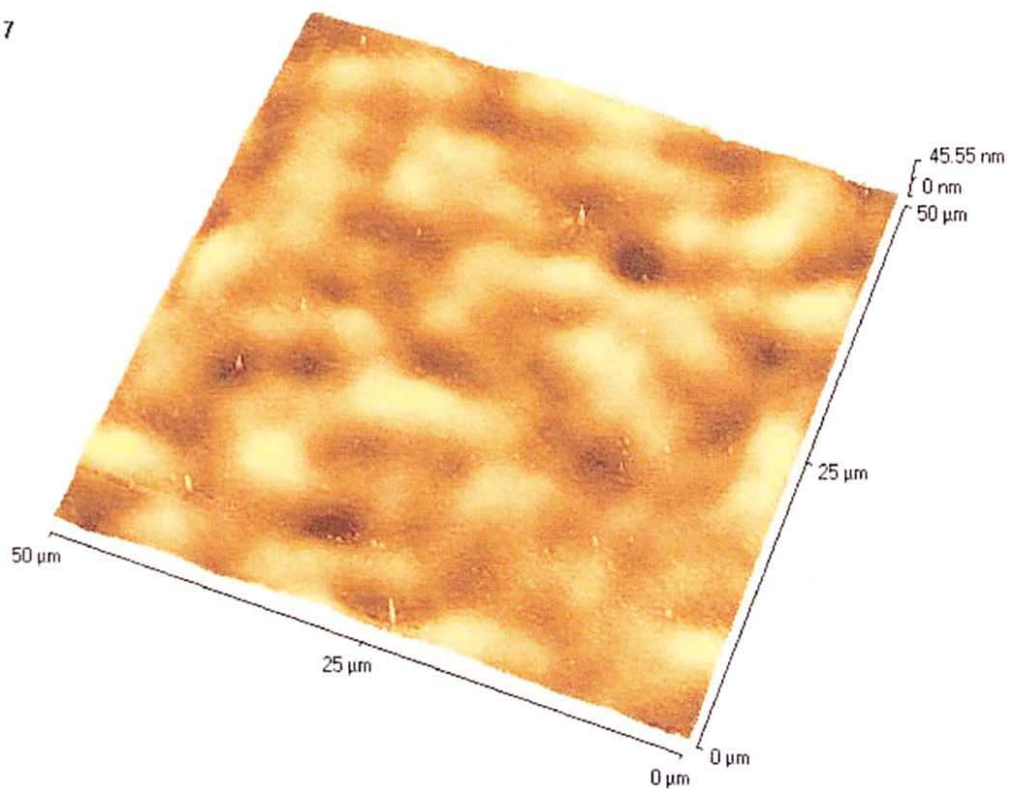
6.1.5 Δημιουργία Ελεγχόμενων Περιοδικών Δομών (Controllable Periodic Structures) Μέσω της Εφαρμογής Laser.

Μία νέα μέθοδος τροποποίησης που αναπτύχθηκε είναι η δημιουργία κυματοειδούς μορφής με laser (laser rippling) [185] μέσω της οποίας έχουμε την εφαρμογή ακτινοβολίας laser στην υπό κατεργασία επιφάνεια και τη δημιουργία κυματοειδούς δομής (ripple structure) όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1.5.1.

pristine



Line 7

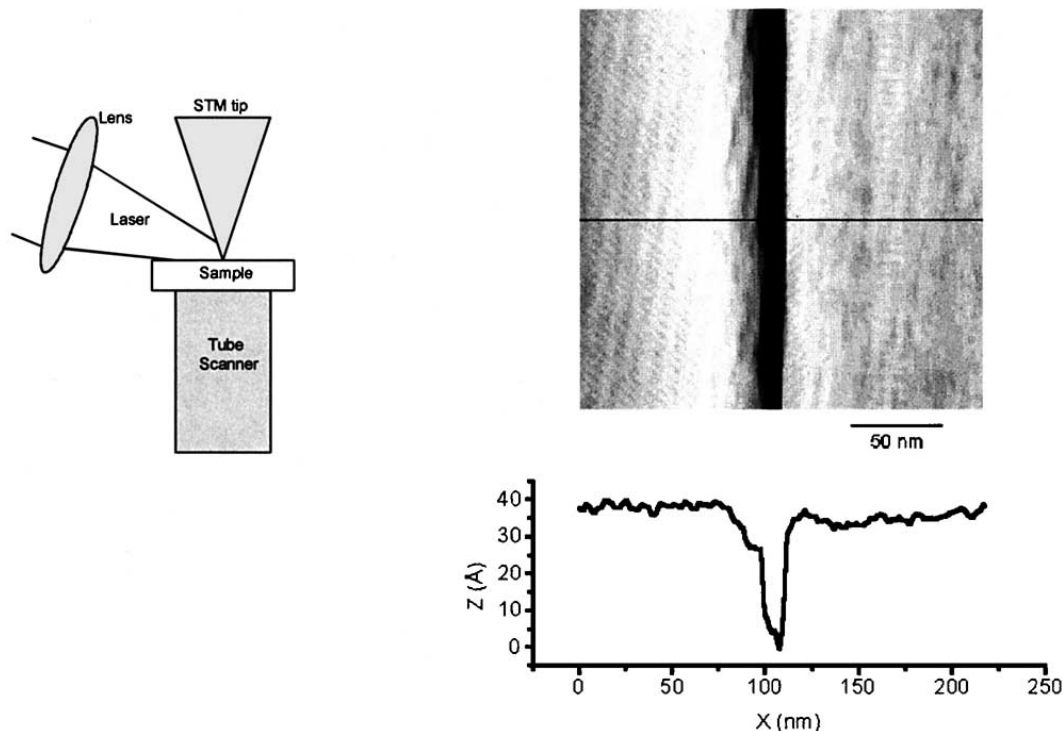


Σχήμα 6.1.5.1 Δημιουργία κυματοειδούς επιφάνειας με laser.

Η προοπτική εφαρμογής της στη μικρο-τροποποίηση με laser (laser microtexturing) είναι ιδιαίτερα σημαντική

6.1.6. Νανο-εγχάραξη (Nanopatterning) και Νανο-λιθογραφία (Nanolithography) με χρήση της Ακτινοβολίας Laser.

Όσον αφορά τη νανό-εγχάραξη με laser, οι ερευνητές δημιούργησαν μία νανό-κλίμακα συνδυάζοντας τη διεργασία με laser και τη scanning probe microscope technology (SPM) [186,187] όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1.6.1.



Σχήμα 6.1.6.1 Νανοδιεργασία Laser-SPM

Το εύρος των γραμμών εγχάραξης μπορεί να φτάσει ακόμα και τα 30nm. The SPM tips υπό την ακτινοβολία της δέσμης laser μπορούν να επιφέρουν ένα πολύ ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο γύρω από την άνω επιφάνεια της τάξης των 10 νανο-μετρων. Η επίδραση του ισχυρού πεδίου μπορεί να δημιουργήσει διάφορα σχέδια εγχάραξης σε διάφορους τύπους υποστρωμάτων με ανάλυση πολύ μικρότερη των 100nm. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα υποσχόμενη για τις εγγραφές υψηλής πυκνότητας.

6.1.7 Συμπέρασμα.

Συνοψίζοντας, η τεχνολογία μικρό-διεργασίας με laser έχει εφαρμοστεί επιτυχώς στη βιομηχανία αποθήκευσης δεδομένων στο πεδίο τροποποίησης με laser (laser texturing), στη δημιουργία μικρό-εξοχών (laser bumping), στη περίπτωση καταγραφής των δίσκων (laser tagging), και στη δημιουργία κυματοειδούς δομής με laser (laser rippling). Η συνεχής παρακολούθηση της διεργασίας μπορεί να βελτιώσει την απόδοση της τεχνολογίας μικρό-επεξεργασίας με laser. Η νανό-εγχάραξη (nanoetching) και η νανό-λιθογραφία (nanolithography) με laser, επιτυγχάνονται μέσω συνδυασμού της μικρό-επεξεργασίας με laser και τεχνικής SPM. Επομένως, η μικρό-επεξεργασία με laser είναι μία ελκυστική επιλογή για μελλοντικές εφαρμογές στην αποθήκευση δεδομένων.

6.2 Μετατροπές Μικροκλίμακας της Μορφολογίας της Επιφάνειας από Πυρίτιο (Si) με χρήση Παλμικού Laser.

6.2.1 Γενικά

Η μετατροπή της μορφολογίας των Si επιφανειών γίνεται με μονούς, υψηλής εστίασης παλμούς laser οι οποίοι είναι της τάξης του νάνο-δευτερόλεπτου και χαρακτηρίζονται με χρήση μικροσκοπίου ατομικής δύναμης. Ο σχηματισμός κοιλοτήτων με διάμετρο $1\div 4\mu\text{m}$ και βάθος $1\div 300\text{nm}$ γίνεται μεταβάλλοντας τη διάμετρο του στίγματος του laser καθώς και τα ακρότατα των τιμών της πυκνότητας της ενέργειας F_0 στο εύρος $0.4 < F_0 < 1.3\text{J cm}^{-2}$. Για να υπάρχει μεγαλύτερος έλεγχος του βάθους των ρηχών κοιλοτήτων και να είναι δυνατή η ποσοτική σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, απομακρύνεται το οξείδιο με χρήση διαλύματος υδροφθορικού οξέως.

Η ποσοτική σύγκριση μεταξύ της θεωρίας και των πειραμάτων καθίσταται ικανή με τη χρήση αριθμητικών επιλύσεων της ροής της θερμότητας για μία διάσταση σαν δεδομένα εισαγωγής στην αναλυτική εξίσωση ροής ρευστού.

Μετατροπές μικροκλίμακας στο υποστρώμα σκληρών δίσκων από NiP_x μέσω laser έλαβε χώρα περίπου το 1990 [188]. Από τότε, η διεργασία τροποποίησης με laser καθιερώθηκε ως ένα εργαλείο για τον έλεγχο της τριβής σε τμήμα του δίσκου. Η τροποποίηση με laser δε βασίζεται σε αφαίρεση υλικού αλλά σε υδροδυναμική αναδιανομή της τηγμένης περιοχής που δημιουργείται από ανομοιογενή θέρμανση. Οι βαθμωτές μεταβολές της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του τήγματος δημιουργούν βαθμωτές μεταβολές στην επιφανειακή τάση με αποτέλεσμα, στις περισσότερες περιπτώσεις η ροή του ρευστού να οδηγείται από το κέντρο του τήγματος που είναι και πιο θερμό, προς την ψυχρή περιφέρεια.

Συνήθως παρατηρείται μορφή σε σχήμα κοιλοτήτων μετά την επαναστερεοποίηση [189,190]. Η τροποποίηση με laser είναι μία ιδιαίτερα σημαντική μέθοδος για την πραγματοποίηση ανεπαίσθητων αλλαγών ενώ συγχρόνως προσφέρει καλό έλεγχο στις πλάγιες και κατακόρυφες συνιστώσες του τμήματος της επιφάνειας [191].

Αν και η τροποποίηση του NiP_x με laser έχει σημαντική τεχνολογική σημασία, η ποσοτική κατανόηση της εφαρμογής παρεμποδίζεται από την έλλειψη σημαντικών δεδομένων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του NiP_x στις υψηλές θερμοκρασίες και την πολυπλοκότητα των ιδιοτήτων της επιφάνειας του. Οι περισσότερες από τις θερμοφυσικές ιδιότητες καθώς και οι ιδιότητες της επιφάνειας από Πυρίτιο, είναι γνωστές και επομένως μπορούμε να συνδέσουμε πιο εύκολα τη θεωρία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Με τη χρήση πυριτίου, μπορούμε να απομακρύνουμε το καθαρό οξείδιο και να δημιουργήσουμε εξουδετέρωση του Υδρογόνου στην επιφάνεια με τη χρήση Υδροφθορικού οξέως.

Η τροποποίηση της επιφάνειας με laser παρέχει μία βολική και ευέλικτη μέθοδο για τροποποίηση της μορφολογίας του υποστρώματος της επιφάνειας από πυρίτιο. Τροποποιημένη με laser επιφάνεια λεπτής φέτας πυριτίου χρησιμοποιείται σε πειράματα στη φυσική για αύξηση κρυστάλλων και μεταφορά μάζας καθαρών στοιχείων. Αυτό γιατί η τροποποίηση με laser συνεισφέρει στην αποφυγή μόλυνσης και καταστροφής του υποστρώματος.

6.2.2 Πειραματικές Λεπτομέρειες.

Στο πείραμα, ο μηχανισμός τροποποίησης της επιφάνειας με laser χρησιμοποιεί Q-switched Nd:YAG laser συχνότητας 532nm το οποίο δημιουργεί παλμούς τάξης nanosecond με ρυθμό επανάληψης (repetition rate) 17kHz. Τα δείγματα που χρησιμοποιούνται είναι p-type Si (001) λεπτές φέτες πυριτίου με ειδική αντίσταση

1Ωcm. Τα δείγματα τοποθετούνται σε ένα τρισδιάστατο περιστρεφόμενο σύστημα αξόνων όπου η θέση τους καθορίζεται συναρτήσει του αντικειμενικού φακού. Για να διευκολύνουμε την τοποθέτηση της επιφάνειας του δείγματος στο εστιακό επίπεδο του αντικειμενικού φακού, εισαγάγουμε έναν διαχωριστή της οπτικής δέσμης και εστιάζουμε το φως που ανακλάται από την επιφάνεια του δείγματος πάνω σε ένα μικρό διάφραγμα το οποίο είναι τοποθετημένο μπροστά από ένα ανιχνευτή φωτός. Το σήμα του ανιχνευτή μεγιστοποιείται όταν το δείγμα είναι στην εστία του αντικειμενικού φακού. Η ενέργεια κάθε ξεχωριστού παλμού laser καθορίζεται ως εξής: Αρχικά μετράμε τη μέση ισχύ του laser μέσω ενός βαθμονομημένου καλορίμετρου που είναι μια συσκευή η οποία χρησιμοποιείται για να μετράται η ενέργεια σε ένα οπτικό σήμα. Κατόπιν διαιρούμε με την περίοδο όπως αυτή μετράται μέσω ενός γρήγορου φωτοανιχνευτή και ενός φασματογράφου. Για μία Γκαουσιανής μορφής δέσμη η οποία προσπίπτει στην πίσω εστιαζόμενη επιφάνεια ενός αντικειμενικού φακού εστιακού μήκους f , η πυκνότητα ενέργειας $F(r)$ στο εστιακό επίπεδο του αντικειμενικού φακού είναι [192]:

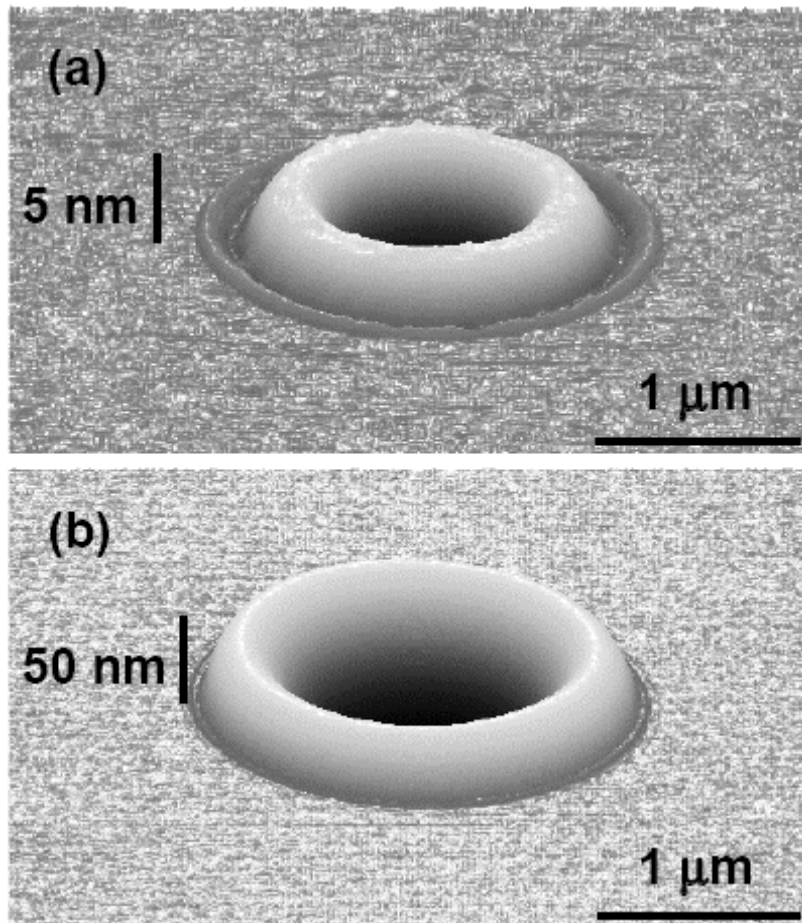
$$F(r) = \frac{2Ek^2}{\pi} \left[\int_0^{a/w_0} \rho \exp(-\rho^2) Jo(kr\rho) d\rho \right]^2$$

- Όπου $k=2\pi w_0/(f\lambda)$: το χαρακτηριστικό αντίστροφο μήκος,
- Jo : Η μηδενικής τάξης συνάρτηση Bessel,
- λ : το μήκος κύματος,
- w_0 : Η $1/e^2$ ακτίνα συγκέντρωσης της Γκαουσιανής δέσμης στην πίσω εστιαζόμενη επιφάνεια
- a : Η ακτίνα του διαφράγματος στην πίσω εστιακή επιφάνεια.

Η εξίσωση αυτή δεν περιλαμβάνει τις επιδράσεις λόγω πιθανής απόκλισης του φακού. Αν και οι αποκλίσεις του αντικειμενικού φακού στο πείραμα δεν έχουν ποσοτικοποιηθεί, στις περισσότερες περιπτώσεις η εξίσωση αυτή δίνει ικανοποιητική ακρίβεια.

6.2.3 Αποτελέσματα.

Κατά την τροποποίηση της τραχύτητας του NiPx, η μορφή των χαρακτηριστικών της επιφάνειας μεταβάλλεται από ρηχή κοιλότητα σε μορφή σχήματος sombrero, και σε μορφή διπλού χείλους (double rim) όσο η πυκνότητα της ενέργειας αυξάνεται [190]. Η αλλαγή της μορφής σχετίζεται με την αποβολή οξειδίων από την επιφάνεια και με αλλαγές της σύνθεσης του κράματος στην επιφάνεια. Η μορφή σχήματος sombrero συγκεκριμένα, αποδεικνύει ότι το ρευστό ρέει προς το κέντρο του τήγματος, γεγονός που υποδηλώνει ότι το κέντρο του τήγματος έχει υψηλότερη επιφανειακή τάση. Αντιθέτως, η έρευνα που έγινε φανερώνει ότι τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας η οποία τροποποιείται με laser παραμένουν σταθερά και η επιφάνεια διατηρεί το ίδιο σχήμα για ένα μεγάλο εύρος πυκνότητας ενέργειας. Στο Σχήμα 6.2.3.1 βλέπουμε μέσω ενός AFM τυπικές εικόνες μορφολογίας.



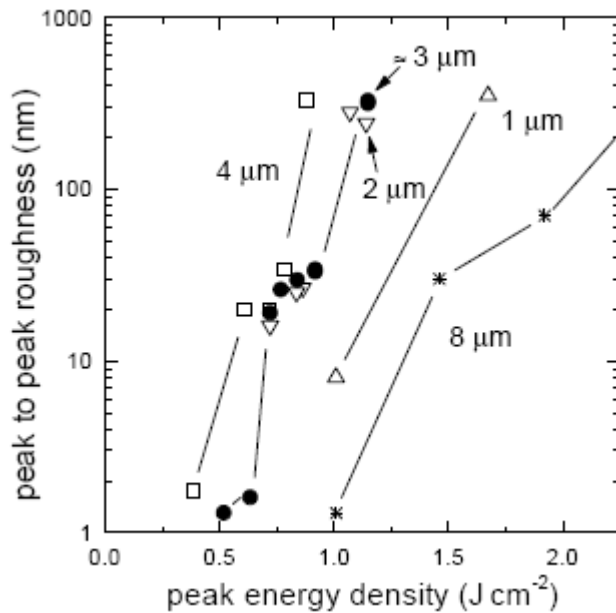
Σχήμα 6.2.3.1 Οπτική της μορφολογίας κοιλοτήτων που έχουν δημιουργηθεί από laser σε επιφάνεια πυριτίου όπως αυτή λαμβάνεται από ένα AFM.

a) Ακρότατη τιμή πυκνότητας ενέργειας $F_0=0.77 \text{ J cm}^2$, διάμετρος δέσμης $2w=2.9\mu\text{m}$
b) Ακρότατη τιμή πυκνότητας ενέργειας $F_0=1.15 \text{ J cm}^2$, διάμετρος δέσμης $2w=2.6\mu\text{m}$

Η μέγιστη τιμή πυκνότητας ενέργειας F_0 αλλάζει μεταβάλλοντας την αποκοπή της δέσμης στην πίσω εστιακή επιφάνεια του αντικειμενικού φακού, με αποτέλεσμα με αύξηση της πυκνότητας ενέργειας να έχουμε μικρή μείωση του μεγέθους του στίγματος (spot size). Τόσο στο Σχήμα 6.2.3.1a όσο και στο Σχήμα 6.2.3.1b μπορούμε να παρατηρήσουμε στην επιφάνεια τον σχηματισμό κρατήρα με ένα ρηχό χείλος το οποίο υψώνεται πάνω από την επίπεδη επιφάνεια. Αυξάνοντας την μέγιστη τιμή πυκνότητας ενέργειας F_0 αυξάνεται τόσο το βάθος του κρατήρα όσο και το ύψος του χείλους. Στο Σχήμα 6.2.3.1a, η απόσταση μεταξύ της κορυφής του χείλους και της βάσης του κρατήρα είναι 25 nm ενώ στο Σχήμα 6.2.3.1b η ίδια απόσταση είναι 330 nm.

Μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διερχόμενης δέσμης (TEM) παρατηρείται ότι οι τηγμένες ζώνες επανακρυσταλλώνονται με πολύ υψηλό βαθμό ποιότητας κρυστάλλωσης.

Στο σχήμα 6.2.3.2 παρατηρούμε τη μεταβολή της τραχύτητας μεταξύ της κορυφής του χείλους και του βάθους του κεντρικού κρατήρα συναρτήσει της μέγιστης τιμής της πυκνότητας της ενέργειας για διάφορες διαμέτρους δέσμης.



Σχήμα 6.2.3.2 Επίδραση της μέγιστης τιμής της πυκνότητας της ενέργειας του παλμού laser στη διαφορά τραχύτητας της κοιλότητας μεταξύ της κορυφής του χείλους και του βάθους του κρατήρα. Επίσης υπάρχει ως παράμετρος η διάμετρος της δέσμης που μεταβάλλεται από 1-8μm.

Το κοινό χαρακτηριστικό σε όλες τις καμπύλες είναι ότι αποκτούν μεγάλη κλίση όταν η τιμή της πυκνότητας ενέργειας υπερβεί κάποια τιμή. Από πειραματική ανάλυση η τιμή αυτή για τήξη καθορίζεται ως $F_{th}=0.21\pm 0.015 \text{ J cm}^2$. Επομένως, παρατηρείται ένα σημαντικό εύρος της F_0 όπου το δείγμα τήκεται αλλά η τροποποίηση της μορφολογίας της επιφάνειας είναι μηδαμινή. Για την πιο μικρή διάμετρο εστιακής δέσμης $2w=1\mu\text{m}$ λαμβάνονται υψηλότερες τιμές μέγιστης πυκνότητας ενέργειας F_0 γεγονός που οφείλεται σε δύο πιθανά ενδεχόμενα:

1. Μία πιθανή απόκλιση του μεγεθυντικού φακού οδηγεί στην υπερεκτίμηση της πραγματικής τιμής της F_0 όπως αυτή υπολογίζεται στην εξίσωση 1.
2. Πιθανή απώλεια ενός σημαντικού ποσού θερμότητας.

Για διάμετρο $2w=8\mu\text{m}$ παρατηρούμε ότι η καμπύλη είναι ακόμα πιο μετατοπισμένη προς τα δεξιά. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του στίγματος του

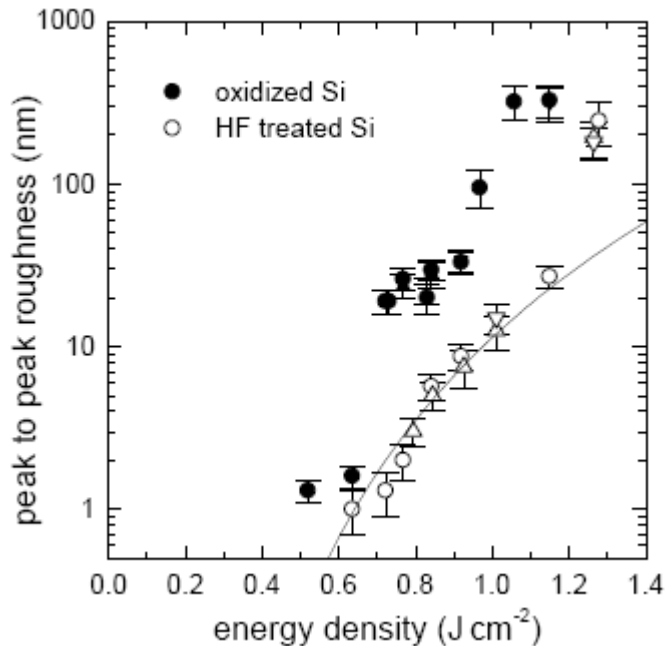
laser (laser spot) και το εύρος του παλμού, συνεπάγεται μικρότερη βαθμωτή θερμοκρασιακή μεταβολή στην επιφάνεια του τήγματος και συνεπώς μικρότερη μεταβολή στη τραχύτητα μεταξύ της κορυφής του χείλους και του βάθους του κεντρικού κρατήρα για δεδομένη πυκνότητα ενέργειας.

Ένα τυπικό καθαρό οξείδιο πυριτίου έχει στοιχειομετρία παρεμφερή με αυτή του διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) και πάχος 2-3nm. Η παρουσία του στρώματος οξειδίου δεν επιτρέπει να κάνουμε ποσοτικές συγκρίσεις μεταξύ θεωρίας και πειραματικών αποτελεσμάτων κι αυτό γιατί δεν είναι γνωστό πώς οι αλλαγές στη μικροδομή του στρώματος οξειδίου επηρεάζουν την επιφανειακή τάση του τήγματος του laser [193].

Συνεπώς, κάνουμε σύγκριση της τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας πριν και μετά τη χρήση Υδροφθορικού οξέος (HF). Αρχικά, κοιλότητες δημιουργούνται στη μη τροποποιημένη επιφάνεια πυριτίου από την οποία έχει εξαλειφθεί το καθαρό οξείδιο. Συνεπώς, παρέχουμε στο δείγμα ένα διάλυμα Υδροφθορικού οξέος (HF) περιεκτικότητας 5 % και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία τροποποίησης της τραχύτητας με laser σε διαφορετικό σημείο της επιφάνειας του ίδιου δείγματος. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγουμε οποιαδήποτε απόκλιση στην ενέργεια του παλμού του laser η οποία θα μπορούσε να δημιουργήσει συστηματικό σφάλμα μέτρησης.

Το υδροφθορικό οξύ έχει την ιδιότητα να μπορεί να απομακρύνει το καθαρό οξείδιο και να δημιουργεί μία υδροφοβική, άνευ υδρογόνου επιφάνεια [194]. Υποθέτουμε ότι η απομάκρυνση υδρογόνου λαμβάνει χώρα αμέσως μετά την διεργασία τροποποίησης με laser και έχει μικρή επίδραση στις ουσιαστικές ιδιότητες του καθαρού πυριτίου.

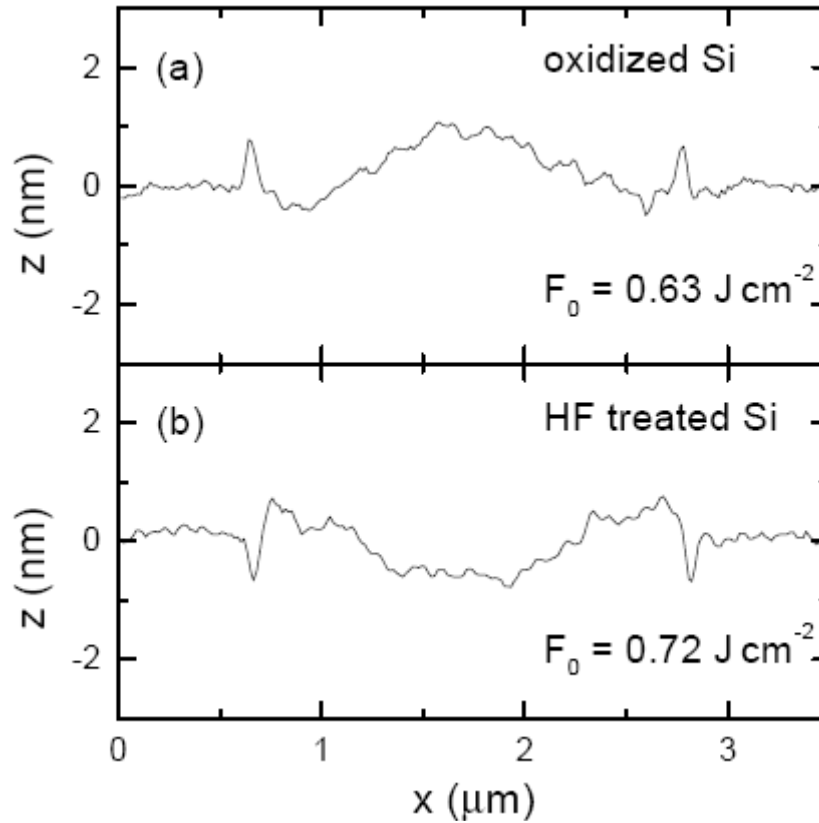
Στο Σχήμα 6.2.3.3 βλέπουμε τη μεταβολή της τραχύτητας συναρτήσει της πυκνότητας της ενέργειας για δείγματα Si με το καθαρό οξείδιο άθικτο, καθώς και για δείγματα όπου το οξείδιο έχει απομακρυνθεί με τη μέθοδο του Υδροφθορικού οξέος.



Σχήμα 6.2.3.3 Διαφορά τραχύτητας της κοιλότητας μεταξύ της κορυφής του χείλους και του βάθους του κρατήρα συναρτήσει της πυκνότητας της ενέργειας. Τα γεμάτα σύμβολα αφορούν την επιφάνεια που είναι καλυμμένη με οξείδιο ενώ τα κενά σύμβολα τις επιφάνειες που έχει χρησιμοποιηθεί διάλυμα Υδροφθορικού οξέος.

Παρατηρούμε ότι για τα τροποποιημένα δείγματα με HF η αύξηση της τραχύτητας είναι ομαλή σε σύγκριση με τα δείγματα Si που είναι επικαλυμένα με το καθαρό οξείδιο. Τα οξειδωμένα δείγματα παρουσιάζουν μία απότομη αύξηση της τραχύτητας για $F_0 > 0.6 \text{ J cm}^{-2}$ η οποία ομαλοποιείται για $0.65 < F_0 < 0.9 \text{ J cm}^{-2}$. Επειδή το ιξώδες του διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) είναι τάξεις μεγαλύτερο από το ιξώδες του υγρού πυριτίου (Si), αποδίδουμε τις διαφορές, μεταξύ των δειγμάτων με το οξείδιο και αυτών όπου το οξείδιο έχει απομακρυνθεί με τη μέθοδο του Υδροφθορικού οξέος, στις βαθμωτές μεταβολές της επιφανειακής τάσης που δημιουργούνται από την αποβολή του στρώματος του οξειδίου για $F_0 > 0.6 \text{ J cm}^{-2}$.

Μία ακόμα λεπτομέρεια που βρέθηκε σε όλο το εύρος της F_0 είναι ότι τα δείγματα με το οξείδιο εμφανίζουν μία περιφέρεια ύψους 1nm στην εξωτερική άκρη της ζώνης του τήγματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2.3.1a, ενώ τα δείγματα με το HF παρουσιάζουν μία λεπτή αυλάκωση βάθους 1nm. Από μία ποσοτική σύγκριση όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2.3.4 μέσω μέτρησης με AFM παρατηρείται η μορφολογία που δημιουργείται για τιμή της πυκνότητα ενέργειας κοντινή σε αυτήν που απαιτείται για τήξη.



Σχήμα 6.2.3.4 Μορφολογία των κοιλοτήτων σε επιφάνεια πυριτίου τροποποιημένη με laser όπως αυτές μετρήθηκαν μέσω της AFM σε τιμές ενέργειας κοντινές στην τιμή τήξης.

- a) Επιφάνειες πυριτίου με καθαρό οξείδιο
- b) Επιφάνειες πυριτίου με χρήση διαλύματος Υδροφθορικού οξέος.

Ακόμα δεν είναι δυνατό να γίνει πλήρως αντιληπτό η προέλευση των μικρών προεξοχών στο άκρο της τηγμένης ζώνης, αν και η πλευρική στερεοποίηση στην άκρη του τήγματος πιθανότατα συνεισφέρει σε αυτό. Στο Σχήμα 6.2.3.4 επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε μία ακόμα διαφορά στη μορφολογία που επικρατεί για πυκνότητα ενέργειας F_0 κοντά στην τιμή τήξης. Για χαμηλές τιμές πυκνότητας ενέργειας η καμπυλότητα της επιφάνειας στο κέντρο του δείγματος είναι θετική για δείγματα με HF και αρνητική για δείγματα με οξείδιο.

6.3. Τροποποίηση της Τραχύτητας της Επιφάνειας Κεραμικών Εξαρτημάτων με χρήση Laser

6.3.1 Αντικειμενικός Σκοπός

Ο σκοπός αυτής της εφαρμογής είναι να καθοριστεί η αποτελεσματικότητα της χρήσης μικρό-κοιλοτήτων που δημιουργούνται από την εφαρμογή του laser με σκοπό να μειωθεί ο συντελεστής τριβής των επιφανειών κεραμικών εξαρτημάτων ή των επιφανειών των ιδίων που έχουν λιπανθεί.

Επίσης θα καθοριστεί η έκταση κατά την οποία η τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας (LST) επηρεάζει την κατασκευή των κεραμικών υλικών στα οποία και εφαρμόζεται.

6.3.2 Εισαγωγή

Η βελτίωση της αποδοτικότητας του καυσίμου στις μηχανές και συγχρόνως η απαίτηση ώστε αυτές να ικανοποιούν τις απαιτήσεις για εκπομπές ρύπων καθιστά δύσκολο τόσο το σχεδιασμό όσο και την κατάλληλη επιλογή των υλικών. Οι παρασιτικές απώλειες λόγω τριβών στις μηχανές μπορούν να μειωθούν με ένα συνδυασμό των παρακάτω στρατηγικών:

- Επανασχεδιασμό των εξαρτημάτων της μηχανής.
- Επαναπροσδιορισμό των λιπαντικών.
- Βελτίωση των μεθόδων παραγωγής και παράδοσης των λιπαντικών.
- Μείωση των απωλειών λόγω ανάδευσης στα υγρά.
- Αλλαγή των συνθηκών λειτουργίας της μηχανής.
- Αντικατάσταση εξαρτημάτων με άλλα από πιο ανθεκτικό και χαμηλότερης τριβής υλικό.
- Μετατροπή της μικροκλίμακας της γεωμετρίας της επιφάνειας των τριβέων.

Αυτή η εργασία προσανατολίζεται κυρίως στην τελευταία προσέγγιση, ερευνώντας τη δυναμική της LST που αναπτύχθηκε από τη Surface Technologies Ltd.

Κατά το 2003 και το 2004 έγινε διεξαγωγή δοκιμών για να εξεταστεί η επίδραση των κοιλοτήτων που έχουν παραχθεί από την εφαρμογή LST στα χαρακτηριστικά τριβής της ζιρκονίας και του καρβιδίου του πυριτίου τα οποία ολισθαίνουν πάνω σε επίπεδες επιφάνειες από νιτρίδιο του πυριτίου.

Επιπροσθέτως, έγινε λεπτομερής μικροδομική εξέταση των τροποποιημένων με LST περιοχών με μία ποικιλία τεχνικών ώστε να εκτιμηθούν οι πιθανές επιδράσεις της διεργασίας στα κεραμικά. Η εφαρμογή της τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας με χρήση laser (LST) έγινε επιτυχώς σε αεροστεγή στεγανωτικά αντλιών νερού όπου οι υπό σύζευξη επιφάνειες ήταν φαρδιές και επίπεδες. Πρόσφατη έρευνα στο καρβίδιο του πυριτίου με κοιλοότητες στο οποίο χρησιμοποιείται ως μέσο λίπανσης το νερό έδειξε τη σημασία της απόστασης μεταξύ των κοιλοτήτων και μέχρι ποιο βαθμό η δημιουργία κοιλοτήτων μειώνει το συντελεστή τριβής [120]. Το 2003 ο μικροδομικός χαρακτηρισμός των κεραμικών που η επιφάνεια τους έχει τροποποιηθεί με LST συνεχίστηκε, όπως και οι πειραματικές δοκιμές για την τριβή με χρήση λιπαντικών που ποικίλουν στο ιξώδες.

6.3.3 Προσέγγιση

- Θα επιλεγεί η κατάλληλη δοκιμή και ανάλυση που απαιτείται ώστε να αποκαλυφθεί η δυνατότητα μείωσης της τριβής και το όφελος από τη χρήση κεραμικών επιφανειών με μικρό-κοιλότητες σε ολισθηρές επαφές που είναι υπό κατάσταση λίπανσης (lubricated sliding contacts).
- Θα χρησιμοποιηθεί μετασχηματισμένη ζirkονία (TTZ) και καρβίδια του πυριτίου στα οποία θα εφαρμοστεί laser για τη δημιουργία μικρό-κοιλοτήτων.
- Ανάλυση των κεραμικών υλικών μετά την τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας με laser με χρήση διάφορων τεχνικών όπως ηλεκτρονική μικροσκοπία (electron microscopy), νανο-διείσδυση (nanoindentation), και μικροσκοπία ακουστικής σάρωσης (scanning acoustic microscopy (SacM)).
- Διεξαγωγή δοκιμών τριβής σε λιπαντικά με διαφορετικό ιξώδες ώστε να καθοριστεί ο βαθμός στον οποίο η χρήση της LST μειώνει την τριβή. Σύγκριση των αποτελεσμάτων για αμφίδρομη κίνηση όπως σε τμήματα μηχανών με τα αποτελέσματα για μη κατευθυνόμενη ολίσθηση όπως αυτή εμφανίζεται σε περιστροφικό τριβέα ή σε περιστρεφόμενο στεγανωτικό.

Το πειραματικό έργο διεξήχθη παράλληλα με μία συμπληρωματική ερευνητική προσπάθεια από το Argonne National Laboratory (ANL) πάνω σε τροποποιημένα μέταλλα με LST. Οι προσπάθειες του Oak Ridge National Laboratory (ORNL) εστιάστηκαν στα κεραμικά υλικά. Η προσέγγιση που έγινε είχε δύο βασικούς στόχους:

- Την διεξαγωγή πειραμάτων ελεγχόμενης τριβής σε κεραμικά τροποποιημένα με LST ώστε να εκτιμηθούν οι επιδράσεις τόσο της ταχύτητας όσο και του ιξώδους του λιπαντικού στην τριβή
- Τον προσδιορισμό των επιδράσεων της τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας με χρήση laser (LST) τόσο στη μικροδομή όσο και στις μικρο-μηχανικές ιδιότητες των κεραμικών κοντά στην επιφάνειά τους.

Για να επιτευχθεί ο δεύτερος στόχος εφαρμόστηκαν διάφορες τεχνικές όπως νανο-διείσδυση σκληρότητας και προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας, μικροσκοπία ακουστικής σάρωσης (SacM) και μικροσκοπία ηλεκτρονικής σάρωσης και διερχόμενης δέσμης.

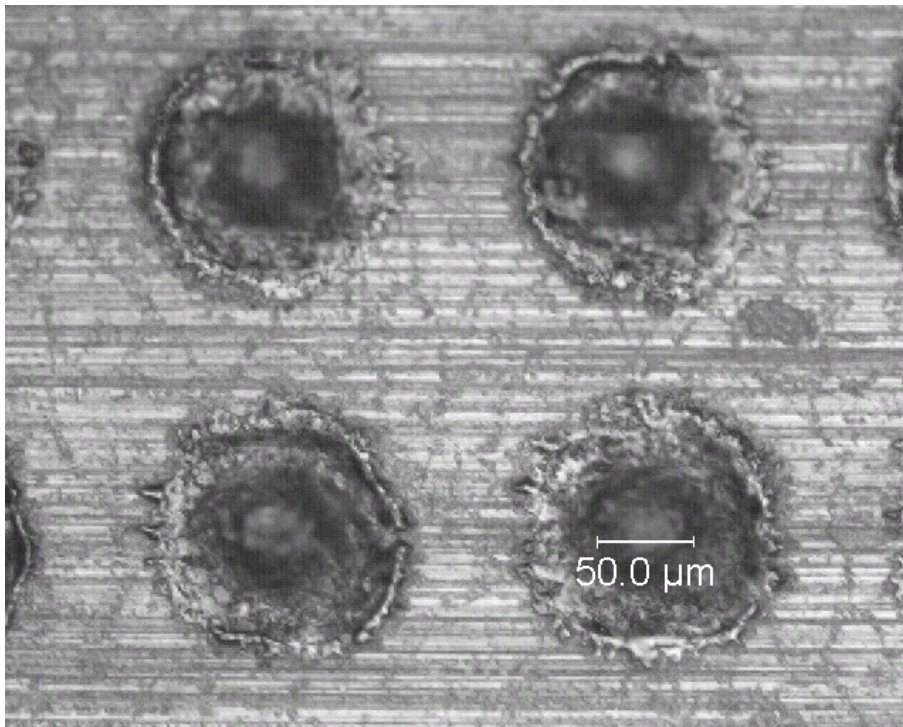
6.3.4 Αποτελέσματα

Κατά το 2002 έγιναν δοκιμές τριβής σε επίπεδες επιφάνειες κυλίνδρων από ζirkονία οι οποίες ήταν τροποποιημένες με LST και ολίσθαιναν σε συμπαγείς επιφάνειες από νιτρίδιο του πυριτίου και υπό διάφορα λιπαντικά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι πιο αξιοσημείωτες επιδράσεις της τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας με χρήση laser (LST) επέρχονται για χαμηλά φορτία και για υψηλή ταχύτητα ταλάντωσης. Η διαπίστωση αυτή ήταν σύμφωνη με τη θεωρία λίπανσης που αναπτύχθηκε από τον Petroff Stribeck στις αρχές του 1900 [121], ότι δηλαδή το μέγεθος του συντελεστή τριβής σε συστήματα υπό κατάσταση λίπανσης είναι ανάλογο τόσο της ταχύτητας ολίσθησης όσο και του ιξώδους του λιπαντικού και αντιστρόφως ανάλογο της δύναμης που κρατά τις επιφάνειες σε επαφή.

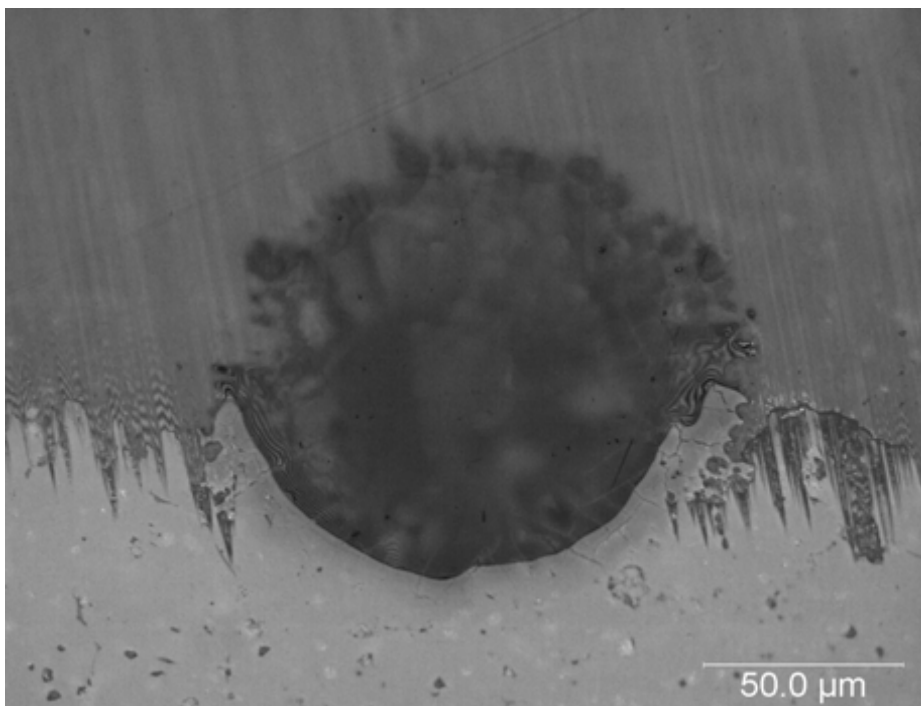
Η εργασία αυτή βοήθησε στον καθορισμό της συνοριακής λίπανσης, της μεικτής λεπτής στρώσης λίπανσης και της υδροδυναμικής λίπανσης για επίπεδους τριβείς. Οι δακτύλιοι εμβόλου που αποτελούν σημαντικά εξαρτήματα της μηχανής ταλαντεύονται μπρος πίσω. Αυτό περιπλέκει την ανάλυση του Stribeck για την παρούσα έρευνα γιατί αναφέρεται για εξαρτήματα όπως οι έλικες που περιστρέφονται προς την ίδια διεύθυνση.

Το 2003 έγιναν περαιτέρω μελέτες στην τριβή LST τροποποιημένων κυλίνδρων από καρβίδιο του πυριτίου με πιο αόριστα αποτελέσματα σε σχέση με τις μελέτες κυλίνδρων από ζirkονία. Το τελικό συμπέρασμα από τις μελέτες ήταν πως για παλινδρομικές και ιδιαίτερα λεπτές επαφές τα οφέλη από την τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας με χρήση laser (LST) μπορούσαν να γίνουν αισθητά μόνο για απόλυτα ευθυγραμμισμένες επιφάνειες, και για αυτές, όχι απόλυτα. Αυτό επιβεβαιώθηκε από μεταγενέστερη μελέτη [122] όπου χρειάστηκε πάνω από μια μέρα ώστε να φθαρεί επιφάνεια κεραμικών η οποία ήταν ολισθαίνουσα υπό κατάσταση λίπανσης νερού και να αποκαλυφθούν τα οφέλη της LST.

Ο πρωταρχικός στόχος της έρευνας που έγινε το 2003 ήταν να χαρακτηριστούν οι επιδράσεις της διεργασίας LST στις επιφάνειες και οι μικρομηχανικές ιδιότητες της ζirkονίας και του καρβιδίου του πυριτίου. Στο Σχήμα 6.3.4.1 βλέπουμε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα LST τροποποιημένης επιφάνειας της ζirkονίας το οποίο περιέχει κυλινδρικές γραμμές διαμέτρου περίπου 120μm και ρηχές βάθους 15μm κοιλότητες. Στο Σχήμα 6.3.4.2 βλέπουμε μία γυαλισμένη τομή από το ίδιο δείγμα



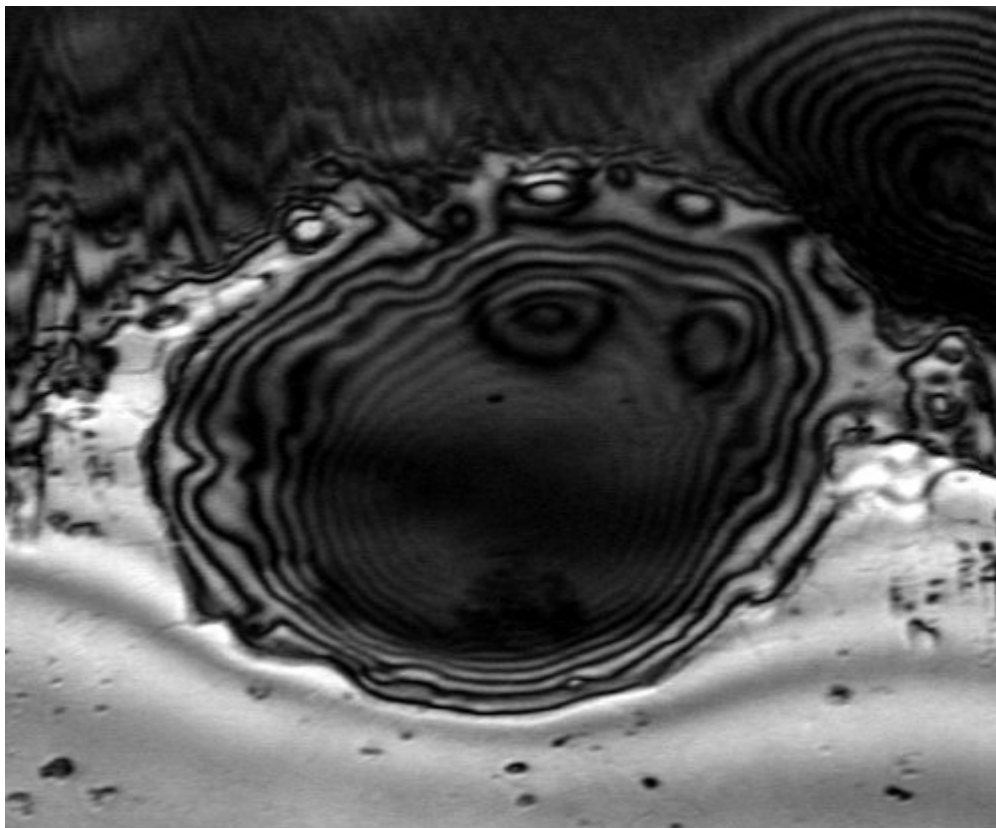
Σχήμα 6.3.4.1 Κοιλότητες σε επιφάνεια Ζιρκονίας.



Σχήμα 6.3.4.2 Τομή της κοιλότητας όπου φαίνεται η ζώνη διασποράς (splash zone) κοντά στο χείλος του κρατήρα και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη γύρω από το κατώτατο σημείο του κρατήρα.

Οι χαμηλές γωνίες του γυαλίσματος (polish) βοηθά τεχνητά να γίνουν πιο εμφανή τα χαρακτηριστικά κοντά στην επιφάνεια. Ελαφρώς σκουρότερη απόχρωση κάνει διακριτές τις θερμικά επηρεασμένες ζώνες που περικυκλώνουν την κοιλότητα. Υψηλότερη μεγέθυνση φανερώνει ένα δίκτυο από μικρό-ρωγμές οι οποίες πιθανόν οφείλονται στην απότομη θέρμανση και ψύξη του κεραμικού στην περιοχή του παλμού laser. Κάνοντας μικροσκοπία ακουστικής σάρωσης στο δείγμα, το οποίο έχει

προσβληθεί από την παρουσία ραγισμάτων κάτω από την επιφάνεια, αποκαλύφθηκαν επιπρόσθετες ρωγμές που δεν είναι ορατές ούτε με οπτικό ούτε με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Όσο υψηλότερη είναι η ακουστική συχνότητα (acoustic frequency), τόσο λιγότερο ρηχή είναι η διείσδυση στην επιφάνεια, αλλά τόσο ευκολότερο είναι να ανιχνευθούν μικρότερα ραγίσματα. Η εικόνα από τη SacM που φαίνεται στο Σχήμα 6.3.4.3 μας δείχνει παρυφές (fringes) σε συνδυασμό με την αλλαγή του ύψους του κρατήρα, αλλά επίσης αποκαλύπτει ανεπαίσθητες ρωγμές γύρω από τις άκρες της κοιλότητας.



Σχήμα 6.3.4.3 Εικόνα κρατήρα μέσω SacM όπου φανερώνεται τόσο η τοπογραφία όσο και οι μικρό-ρωγμές (micro cracks).

Διεξήχθησαν μελέτες νανο-διείσδυσης για να γίνει καθορισμός αν η LST επηρεάζει τις μικρό-μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Ο παρακάτω 6.3.4.1 συνοψίζει τα αποτελέσματα για μια σειρά δοκιμών διείσδυσης σε LST τροποποιημένες περιοχές καθώς και στον κύριο όγκο του δείγματος.

Πίνακας 6.3.4.1. Μέση τιμή σκληρότητας νανο διείσδυσης και Μέση τιμή Μέτρου Ελαστικότητας για γυαλισμένες διατομές ζirkονίας (TTZ) και καρβιδίου του πυριτίου (SiC)

Μέγεθος	Περιοχή	TTZ	SiC
Μέση τιμή σκληρότητας νανο διείσδυσης (GPa)	Κύριος Όγκος	16.1	37.0
Μέση τιμή σκληρότητας νανο-διείσδυσης (GPa)	Κοντά στις Κοιλότητες	15.2	32.4
Μέση τιμή Μέτρου Ελαστικότητας (GPa)	Κύριος Όγκος	262.0	493.0
Μέση τιμή Μέτρου Ελαστικότητας (GPa)	Κοντά στις Κοιλότητες	257.0	502.0

Παρά τον ελαφρώς χαμηλότερο μέσο όρο των τιμών της σκληρότητας κοντά στις κοιλότητες και στα δύο κεραμικά, δεν υπάρχει στατιστική βάση να συμπεράνουμε ότι το μέτρο ελαστικότητας ή ο μέσος όρος σκληρότητας νανο-διείσδυσης διαφέρει σημαντικά στις LST τροποποιημένες επιφάνειες.

6.3.5. Επίτευγμα της Εφαρμογής και Συμπεράσματα.

- Η διεξαγωγή των πειραμάτων τριβής σε κατάσταση παλινδρόμησης των κεραμικών που η επιφάνεια τους έχει τροποποιηθεί με LST και για διάφορα λιπαντικά συμπεριλαμβανομένου του πετρελαίου τύπου Diesel, του ορυκτέλαιου και του νερού είχε ως αποτέλεσμα τον καθορισμό των συνθηκών για τις οποίες υπάρχει μεγαλύτερο όφελος από την εφαρμογή της LST.
- Επίσης, χρησιμοποιήθηκε η μικροσκοπία ακουστικής σάρωσης (SaM) ώστε να αναγνωριστούν μικρο-αστοχίες κοντά στην επιφάνεια οι οποίες προκλήθηκαν από τους θερμικούς παλμούς του laser το οποίο εφαρμόστηκε για το σχηματισμό των κοιλοτήτων.
- Επιπλέον, έγινε καταγραφή της νανοσκληρότητας (nanohardness) στις θερμικά επηρεαζόμενες ζώνες στο υλικό κάτω από τις κοιλοότητες.
- Καθορίστηκε η σημασία της ακριβούς ευθυγράμμισης και της ταχύτητας ολίσθησης ώστε να καταστεί δυνατή η αναγνώριση των τριβολογικών επιδράσεων των επιφανειών με κοιλοότητες. Η έρευνα έδειξε ότι η μείωση της τριβής σε επαφές που υπάρχει παλινδρόμηση είναι δύσκολο να επιτευχθεί μέσω της εφαρμογής LST.
- Η τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας με χρήση laser (LST) της ζιρκονίας (TZ) είχε ως αποτέλεσμα το σχηματισμό νανό-κρυσταλλικών ζωνών οι οποίες περιέχουν ένα δίκτυο από μικρό-ρήγματα. Οι μηχανικές ιδιότητες των περιοχών μεταξύ των μικρό-ρηγμάτων δεν είναι διαφορετικές από αυτές του κύριου όγκου του υλικού και η κύρια διαφορά είναι το μέγεθος των κόκκων και η παρουσία των μικρό-ρηγμάτων. Εάν επέλθει φθορά ή αν το λιπαντικό διαλυθεί, είναι πιθανόν τα ρήγματα αυτά να χρησιμεύσουν για να δημιουργήσουν σωματίδια που θα είναι προϊόντα φθοράς.
- Οι επιδράσεις των κοιλοτήτων όσον αφορά τη μείωση της τριβής δεν θα γίνουν αισθητές αν οι επιφάνειες επαφής δεν είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένες κατά την ολίσθηση, ή εάν δεν είναι ομαλοποιημένες, ή εάν η ταχύτητα και το ιξώδες της ροής του λιπαντικού είναι ανεπαρκή για να επιφέρουν το σχηματισμό μίας λεπτής στρώσης από το λιπαντικό.
- Απαιτείται επιπρόσθετη εργασία ώστε να εξεταστεί αν κατά τη μη κατευθυνόμενη ολίσθηση υπό κατάσταση λίπανσης κεραμικών επιφανειών που έχουν τροποποιηθεί με LST υπάρχει πιο άμεσο όφελος από την τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας με χρήση laser (LST).

Τέλος, οι επιδράσεις της LST θα πρέπει να συγκριθούν με άλλες μεθόδους της τεχνολογίας της επιφάνειας, ώστε να καθοριστεί ποιες από αυτές παρέχουν τον βέλτιστο τρόπο μείωσης της τριβής των κεραμικών υπό ταλάντωση ή υπό μη κατευθυνόμενη ολίσθηση.

6.4 Μοντέλο τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας πυριτικού γυαλιού με χρήση Laser

Θα παρουσιάσουμε ένα μοντέλο για τη διεργασία τροποποίησης της τραχύτητας γυαλιού με χρήση laser που εφαρμόζεται στο υπόστρωμα των δίσκων των υπολογιστών. Τα πεδία εξισώσεων για "φανταστική" θερμοκρασία (fictive temperature) και ελαστο-ιξωδοπλαστική παραμόρφωση (elasto-viscoplastic strain) είναι αριθμητικά ολοκληρωμένα στο θερμικό κύκλο που δημιουργείται από τη χρήση παλμικού laser CO₂ μικροσκοπικής κλίμακας. Η φανταστική θερμοκρασία μας δίνει πληροφορίες για την κατάσταση της δομής του γυαλιού (structural state) και συσχετίζεται τόσο με τις μηχανικές όσο και με τις οπτικές ιδιότητές του. Ορίζεται ως η θερμοκρασία στην οποία κατά τη μετάβαση (transition) του γυαλιού, η υγρή δομή του κατά την ψύξη σταθεροποιείται, γίνεται δηλαδή "υπόψυκτο υγρό". Πιο αναλυτικά, η T_f παραμένει σταθερή και ο ρυθμός μεταβολής της είναι μηδενικός όσο το γυαλί που έχει υποστεί βαφή με νερό δεν αναθερμαίνεται στη κατάσταση μετάβασης του γυαλιού. Η τιμή της T_f αλλάζει όταν το γυαλί περάσει από τη κατάσταση μετάβασης του γυαλιού. Μόλις το γυαλί εισέλθει σε κατάσταση υγρής ισορροπίας (equilibrium liquid state), τότε ο ρυθμός μεταβολής της "φανταστικής θερμοκρασίας" είναι ίσος με τη μονάδα. Ο υπολογισμός της μεταβολής της "φανταστικής" θερμοκρασίας παρέχει για συνεχόμενη κατεργασία του γυαλιού ιδιότητες που εξαρτώνται από την "φανταστική" θερμοκρασία. Ο μικρής διάρκειας θερμικός κύκλος προκαλεί την τελική τροποποίηση "φανταστικής" θερμοκρασίας στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη να είναι σχετικά σταθερή μετά το πέρας των αλλαγών και υψηλότερη από την αρχική τιμή κατά τουλάχιστον 300K.

Οι πλαστικές παραμορφώσεις που δημιουργούνται από θερμομηχανικές τάσεις και η αύξηση της "φανταστικής" θερμοκρασίας είναι δύο σημαντικά γεγονότα. Το μοντέλο αυτό επεξηγεί την αύξηση της τάσης συμπίεσης που δημιουργείται από την αρχική θέρμανση, τη διεργασία χαλάρωσης που εκδηλώνεται στην τηγμένη περιοχή πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης, και την επακόλουθη εισαγωγή της εφελκυστικής τάσης κατά τη διάρκεια της ψύξης. Στο τέλος του θερμικού κύκλου η περιοχή του γυαλιού με την τροποποιημένη "φανταστική" θερμοκρασία βρίσκεται σε μία κατάσταση υψηλής εφελκυστικής τάσης.

Η τροποποίηση της τραχύτητας γυαλιού με χρήση laser είναι μία τεχνολογία που αναπτύχθηκε με την εισαγωγή της νανοτεχνολογίας στην κατασκευή του υποστρώματος της επιφάνειας των δίσκων που χρησιμοποιούνται στους οδηγούς των υπολογιστών. Ο ρόλος της τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας είναι να μειώσει τις τριχοειδείς δυνάμεις ανάμεσα στην κεφαλή και το δίσκο που δημιουργούνται λόγω της λίπανσης της επιφάνειας. Αυτό το πρόβλημα εμφανίζεται όταν η κεφαλή αποτίθεται στην επιφάνεια του δίσκου και όταν ο οδηγός (drive) σβήνει. Η τροποποίηση της τραχύτητας με laser χρησιμοποιείται στη βιομηχανική παραγωγή οδηγών (drives) και από αλουμινένιο υπόστρωμα.

Όμως, πρόσφατα έγινε έντονο το ενδιαφέρον για τη χρήση υποστρώματος από γυαλί και την ανάπτυξη της τροποποίησης της τραχύτητας με laser για αυτήν την εναλλακτική περίπτωση [32-41]. Ο θερμικός κύκλος που δημιουργείται από το laser θέτει σε λειτουργία μία διεργασία η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου κοντά στην επιφάνεια του γυαλιού. Αυτό παρατηρήθηκε κατά το αρχικό στάδιο της τροποποίησης της τραχύτητας του γυαλιού με laser [39-41]. Η διεργασία αυτή προκαλεί μία αλλαγή στη δομή του υλικού η οποία μπορεί να αναγνωριστεί στην ορολογία της τεχνολογίας γυαλιού ως αλλαγή της "φανταστικής" θερμοκρασίας.

Η "φανταστική" θερμοκρασία του γυαλιού είναι όμοια με τη θερμοδυναμική θερμοκρασία στην οποία η κατασκευή από γυαλί θα ήταν σε ισορροπία. Η απεικόνιση

της διεργασίας συναρτήσει της "φανταστικής" θερμοκρασίας μπορεί να μας δώσει μία ποιοτική περιγραφή της τροποποίησης της τραχύτητας με laser [37]. Σημαντικό χαρακτηριστικό της τροποποίησης τραχύτητας του γυαλιού είναι η βραχείας διάρκειας κλίμακα του θερμικού κύκλου (short time scale of the thermal cycle).

Ένα ποσοτικό θερμικό μοντέλο αναπτύχθηκε για να περιγράψει αυτόν τον κύκλο με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και να λυθεί η εξίσωση διάχυσης θερμότητας, στην οποία η σύζευξη με το laser είχε μοντελοποιηθεί ως κατ' όγκο θέρμανση πάνω από το βάθος της οπτικής διείσδυσης [36]. Ο αντίκτυπος της χρονικής κλίμακας στη θερμοκρασία μετάβασης είναι καθορισμένος από τα δεδομένα του ιξώδους. Αυτό επέτρεψε στη θερμοκρασία δυναμικής μετάβασης να υπολογίζεται από τη χρονική κλίμακα. Με αυτόν τον τρόπο η ισόθερμη θερμοκρασία μετάβασης εμφανίζεται στην αριθμητική λύση χωρίς να χρειαστεί η επίλυση ενός ξεχωριστού πεδίου εξισώσεων για την μεταβατική "φανταστική" θερμοκρασία στο γυαλί [36].

Υποθέτοντας πλήρη χαλάρωση του γυαλιού που έχει θερμανθεί σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτήν της δυναμικής μετάβασης, καθορίστηκε το μέγεθος της συμβολής του υλικού στην αύξηση του όγκου της επιφάνειας. Αυτό το μοντέλο δίνει καλά αποτελέσματα σε σύγκριση με την μετρηθείσα μετάβαση του ύψους και του πλάτους των προεξοχών της επιφάνειας σε συνάρτηση με την ενέργεια του παλμού και του χρονικού πλάτους του παλμού.

Επίσης, αναπτύχθηκε ένα άλλο μοντέλο βασισμένο σε παρόμοια χαρακτηριστικά [42]. Όμως, σε αυτό το μοντέλο η επίδραση της διάχυσης της θερμότητας και ο σχηματισμός των προεξοχών της επιφάνειας υπολογίστηκε με βάση την αύξηση της θερμοκρασίας του θερμαινόμενου γυαλιού πάνω από το βάθος της οπτικής διείσδυσης. Η αβεβαιότητα των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του πυριτικού γυαλιού σε ακραίες συνθήκες έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει αβεβαιότητα και στην ακρίβεια των υπολογιζόμενων θερμοκρασιών. Συνεπώς, η αύξηση της θερμοκρασίας ερευνήθηκε πειραματικά με τη δημιουργία πυρομετρικών μετρήσεων σε μήκη κύματος εκπομπής του ορατού φωτός [38].

Για να λάβουμε ανιχνεύσιμα σήματα εκπομπής, η ενέργεια των παλμών πρέπει να υπερβεί αυτήν που χρησιμοποιείται σε συνήθεις συνθήκες τροποποίησης της επιφάνειας κατά τρεις φορές και πάνω. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα που καταδεικνύεται από αυτό το πείραμα είναι ότι ο αρχικός ρυθμός ψύξης του γυαλιού κατά το τέλος του παλμού είναι συγκρίσιμος με το ρυθμό θέρμανσης. Κοινώς, η διάχυση θερμότητας είναι ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την αύξηση της θερμοκρασίας και τη χρονική κλίμακα του θερμικού κύκλου.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμοκρασίας μετάβασης μαρτυρούν ότι δύο παράγοντες του μοντέλου μπορούν να βελτιωθούν. Πρώτον η εξάρτηση της θερμοκρασίας από το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας πρέπει να εξεταστεί. Δεύτερον, το βάθος της οπτικής διείσδυσης στο μήκος κύματος του laser CO₂ αλλάζει σημαντικά κατά τη διάρκεια της θέρμανσης.

Στην ανάλυση του μοντέλου που θα ακολουθήσει για να γίνουν πιο κατανοητές οι θερμοφυσικές ιδιότητες του πυριτικού γυαλιού θα παρουσιαστεί και ένα μοντέλο που περιγράφει τις δομικές αλλαγές που συμβαίνουν στο γυαλί κατά τη διάρκεια του θερμικού κύκλου.

Αντί να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία δυναμικής μετάβασης και να υποθέσουμε την πλήρη χαλάρωση του γυαλιού που έχει θερμανθεί πάνω από αυτήν τη θερμοκρασία, θα προσθέσουμε στο πεδίο των εξισώσεων προς επίλυση μια περιγραφή της κατάστασης της φανταστικής θερμοκρασίας του γυαλιού. Το μοντέλο αυτό ενσωματώνει την ελαστο-ιξωδοπλαστική συμπεριφορά του σχηματισμού μεταβατικής τοπογραφίας. Θα εστιάσουμε στην αλληλεπίδραση μεταξύ laser-γυαλιού όπου το γυαλί είναι αλουμινοπυριτικό με κύρια συστατικά SiO₂ και Al₂O₃ και δεν έχει ενισχυθεί

χημικά. Παρομοίως, η πειραματική εργασία που έγινε για σύγκριση, εφαρμόστηκε σε γυάλινους δίσκους που δεν έχουν υποστεί κατεργασία ενίσχυσης. Συνεπώς οι όροι της τάσης που μελετώνται πάνω στην επιφάνεια του γυαλιού λαμβάνονται ως μηδενικοί σε αντίθεση με τους χημικά ενισχυμένους δίσκους.

6.4.1 Μοντέλο αλλαγής της “Φανταστικής” Θερμοκρασίας του γυαλιού

Η συμπεριφορά του γυαλιού κοντά στη θερμοκρασία μετάβασης είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα, υπό έρευνα [43-45]. Κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης, η θερμοελαστική διαστολή ή συστολή οφείλεται στην αλλαγή της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας χωρίς να υπάρχει δομική αλλαγή. Πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης του γυαλιού οι αλλαγές στη δομή του γυαλιού επιχειρούν να φέρουν το σύστημα σε κατάσταση ισορροπίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη θερμοπλαστική παραμόρφωση του υλικού και οδηγεί σε διαστολή ή συστολή. Το ποσοστό της δομικής αλλαγής εξαρτάται από την κατάσταση της θερμοδυναμικής και της “φανταστικής” θερμοκρασίας στο γυαλί και υποθέτουμε ότι έχουμε την εξίσωση της μορφής :

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = -\frac{(T_f - T)}{\tau(T_f, T)} \quad (1)$$

όπου $\tau(T_f, T)$ είναι η σταθερά του χρόνου χαλάρωσης, T_f η φανταστική θερμοκρασία και T η θερμοκρασία του γυαλιού. Εάν η σταθερά αυτή είναι γνωστή, η εξίσωση (1) μπορεί να ολοκληρωθεί ως προς το χρόνο και να υπολογιστεί η “φανταστική” θερμοκρασία καθ’ όλη τη διάρκεια του θερμικού επηρεασμού. Εάν υποθέσουμε ότι η σταθερά του χρόνου χαλάρωσης παραμένει αμετάβλητη, η “φανταστική” θερμοκρασία του γυαλιού πλησιάζει τη θερμοδυναμική θερμοκρασία με φθίνουσα εκθετική μορφή. Όμως, υπό μεγάλο αριθμό συνθηκών [46], η εξίσωση αυτή δεν είναι ικανοποιητική. Γι αυτό χρησιμοποιείται μία εμπειρική εξίσωση γνωστή και ως Kohlrausch-Williams-Watts formula [47]:

$$\Phi_v(\bar{t}) = \exp\{-t^{-\beta}\}, \bar{t} = t / \bar{\tau} \quad (2)$$

Η εξίσωση αυτή καταδεικνύει ότι η χαλάρωση δεν είναι απλής εκθετικής μορφής με μία μόνο σταθερά χρόνου. Ακριβέστερα, η εισαγωγή των πειραματικών δεδομένων είναι πιο ομαλή όταν η χαρακτηριστική σταθερά χρόνου για τη διεργασία χαλάρωσης $\bar{\tau}$ διευρυνθεί με την αύξηση του εκθέτη κατά μία δύναμη του β . Εδώ γίνεται η παραδοχή ότι η σταθερά του χρόνου χαλάρωσης μπορεί να υπολογιστεί από τα δεδομένα ιξώδους του συμπαγούς γυαλιού. Η εξίσωση Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) για το ιξώδες [46] είναι ως εξής:

$$\log_{10}(\mu) = A_\mu + \frac{B_\mu}{T - C_\mu} \quad (3)$$

Οι σταθερές για την εξίσωση (3) δίνονται στον παρακάτω πίνακα 1

Πίνακας 1: Θερμοφυσικές ιδιότητες γυαλιού και χαρακτηριστικά του laser.

Περιγραφή	Σύμβολο	Τιμή
Μήκος κύματος Laser (Laser Wavelength)	λ	10.6 μm
Εύρος παλμού από μία τιμή στη μέγιστη τιμή (Pulse width, time to max.)	$\tau_p, \tau_{\text{max}}$	0,70 μs , 1.0 μs
Διάμετρος δέσμης (Beam diameter)	D_{1/e^2}	27.0 μm
Ανακλαστικότητα της επιφάνειας (Surface reflectivity)	R	0.20
Δείκτης φανταστικής Διάθλασης (Imaginary refraction index)	n_{im}	0.4+(12.0x10 ⁻⁵)T
Θερμική Αγωγιμότητα (Thermal conductivity)	K	0.80+0.0014T W/m/K
Ικανότητα απορρόφησης Θερμότητας (Heat capacity)	C_p	1030.0 J/kg/K
Πυκνότητα στην αρχική Θερμοκρασία [Density (at initial temperature)]	ρ_o^0	2510.0 kg/m ³
Αρχική θερμοκρασία μετάβασης του γυαλιού, "Φανταστική Θερμοκρασία" (Glass tran. /init. Fictive temperature)	T_g^0, T_f^0	773.0 K
Συντελεστές Διαστολής (Expansion coefficients)	a_T, a_{Tf}	9.0x10 ⁻⁶ , 2.3 x10 ⁻⁶ 1/K
Ιξώδες Viscosity (poise)	A_μ, B_μ, C_μ	-1.906, 4767.0, 466.0 K
Συντελεστής Ρευστότητας (Fluidity coefficient)	v_g	0.001
Μέτρο Ελαστικότητας (Bulk modulus)	in elasticity matrix	42 GPa
Μέτρο Διάτμησης (Shear modulus)	in elasticity matrix	30GPa
Τάση διαρροής (Uniaxial yield value)	σ_y	1MPa

Εφόσον η χρονική κλίμακα για δομική αλλαγή ποικίλει ανάλογα με το ιξώδες, η εξίσωση (3) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της σταθεράς του χρόνου χαλάρωσης:

$$\log_{10}(100s/\tau) = \frac{B_{\mu}(T - T_g^0)}{(T_g^0 - C_{\mu})(T - C_{\mu})} \quad (4)$$

Η συμβατική θερμοκρασία μετάβασης του γυαλιού T_g^0 στην εξίσωση (4) ορίζεται ως η θερμοκρασία στην οποία το ιξώδες του γυαλιού ισούται με 10^{13} poise. Για αυτό το ιξώδες, ο χρόνος που απαιτείται για το γυαλί ώστε να βρεθεί σε κατάσταση ισορροπίας είναι περίπου 100s. Το κατ' όγκον ιξώδες του υλικού, το οποίο επιδρά καταλυτικά στη δομική χαλάρωση, δεν είναι ισοδύναμο με το σύννητες ιξώδες διάτμησης το οποίο επιδρά καταλυτικά στη ροή του υγρού. Η αναλογία αυτών των δύο είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας [48]. Συνεπώς, κάνοντας μια λογική προσέγγιση, αυτό μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε το κοινό ιξώδες για να υπολογίσουμε τις αλλαγές κατά το χρόνο χαλάρωσης. Σε αυτήν την περίπτωση, η εξάρτηση της κλίμακας του χρόνου χαλάρωσης από τη "φανταστική" θερμοκρασία αγνοείται. Η σπουδαιότητα αυτής της παραδοχής φαίνεται στην εξίσωση (1).

Για "φανταστικές" θερμοκρασίες που απέχουν το ίδιο πάνω και κάτω από την τιμή της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας, η αναλογία της προσέγγισης της "φανταστικής" θερμοκρασίας προς τη θερμοδυναμική θερμοκρασία θα είναι η ίδια εάν η σταθερά χρόνου (time constant) εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία. Όμως, σε μία κατάσταση υψηλής "φανταστικής" θερμοκρασίας η σταθερά χρόνου χαλάρωσης έχει μικρότερη τιμή από ότι σε μία κατάσταση χαμηλής "φανταστικής" θερμοκρασίας για την ίδια θερμοδυναμική θερμοκρασία. Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι απομακρύνσεις από τη θερμοδυναμική θερμοκρασία, τόσο πιο ασήμαντη είναι η επίδραση της "φανταστικής" θερμοκρασίας.

6.4.2 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων

Οι δισδιάστατες λύσεις σε κυλινδρικές συντεταγμένες είναι ευπείθει σε πολλά προβλήματα θέρμανσης με laser. Θα αναπτύξουμε τέτοιες επιλύσεις για συμμετρική ως προς τον άξονα θερμότητα σε ένα ισοτροπικό μέσο με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Το πεδίο παραμορφώσεων $\varepsilon^T = \{\varepsilon_r, \varepsilon_z, \gamma_{rz}, \varepsilon_{\theta}\}$ μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συνιστώσες: Την ελαστική παραμόρφωση (elastic strain), την πλαστική παραμόρφωση (plastic strain) και τη θερμοκρασιακή παραμόρφωση (temperature strain). $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^0$. Η θερμοκρασιακή παραμόρφωση καθρεπτίζει την κατάσταση της θερμοδυναμικής και της "φανταστικής" θερμοκρασίας στο γυαλί. Η θερμική τάση (thermal stress) συνδέεται με τη θερμοδυναμική θερμοκρασία μέσω του συντελεστή θερμικής διαστολής α_T . Για το γυαλί μπορούμε να ορίσουμε ένα συμπληρωματικό συντελεστή α_{Tf} για να συνδέσουμε την παραμόρφωση με τη "φανταστική" θερμοκρασία. Στο υπό μελέτη μοντέλο υποθέτουμε απλή γραμμική εξάρτηση της παραμόρφωσης με τη θερμοδυναμική και τη "φανταστική" θερμοκρασία.

$$\varepsilon_r^0 = \varepsilon_z^0 = \varepsilon_{\theta}^0 = \alpha_T(T - T_0) + \alpha_{Tf}(T_f - T_f^0), \gamma_{rz}^0 = 0 \quad (5)$$

Όπου T^0 και T_f^0 είναι οι αρχικές τιμές τις θερμοδυναμικής και της "φανταστικής" θερμοκρασίας. Εφόσον η "φανταστική" θερμοκρασία εξαρτάται από τη θερμοδυναμική θερμοκρασία (όταν λαμβάνει τιμές κοντά και πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης) οι παραμορφώσεις της εξίσωσης (5) συντελούν στην αλλαγή

της κλίσης της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας κοντά στη θερμοκρασία μετάβασης. Η πλαστική παραμόρφωση είναι μη αναστρέψιμη και οφείλεται στις εφαρμοζόμενες παραμορφώσεις που υπερβαίνουν κάποιες συνθήκες διαρροής. Για συμβατικά προβλήματα πλαστικότητας η συνθήκη διαρροής είναι μία ιδιότητα του υλικού η οποία είναι συναρτήσει της σκλήρυνσης.

Όσον αφορά το γυαλί, η διαρροή είναι περιορισμένη λόγω της θερμοδυναμικής κατάστασης του γυαλιού. Για αυθαίρετα μικρές τάσεις η αναλογία της διαρροής αυξάνεται όσο η θερμοκρασία προσεγγίζει και υπερβαίνει την τιμή μετάβασης. Στο παρόν μοντέλο εφαρμόστηκε ο νόμος του Norton περί ερπυσμού, για να γίνει η περιγραφή του ρυθμού παραμόρφωσης [49]. Όμως, ο συνήθης συντελεστής ρευστότητας αντικαθίσταται από μία τροποποιημένη τιμή που είναι ανάλογη με το αντίστροφο της σταθεράς του χρόνου χαλάρωσης (v_g/τ):

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{v_g}{\tau(T_f, T)} \left(\frac{\sigma_{eff} - \sigma_y}{\sigma_y} \right)^N a \quad (6)$$

Η συνθήκη διαρροής για την ελάχιστη τιμή της μοναξονικής τάσης διαρροής σ_y μπορεί να οριστεί αυθαίρετα μικρή. Ο εκθετικός συντελεστής N λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα. Χρησιμοποιώντας το κριτήριο του Von Mises, το διάνυσμα της ροής δίνεται από τη σχέση:

$$a^T = 0.5(3/J_2')^{1/2} \{\sigma_r', \sigma_z', 2\tau_{rz}, \sigma_\theta'\}.$$

Η ισοδύναμη τάση (effective stress) υπολογίζεται ως εξής:

$$\sigma_{eff} = (3J_2')^{1/2}$$

$$\text{όπου } J_2' = 0.5[(\sigma_r')^2 + (\sigma_z')^2 + (\sigma_\theta')^2] + (\tau_{rz})^2.$$

Οι σχέσεις που εκφράστηκαν για την ελαστικότητα της μήτρας συνδέουν το πεδίο τάσεων με την ελαστική συνιστώσα του πεδίου παραμορφώσεων: $a = D\varepsilon^e$

Για ψευδοστατική διεργασία οι συμμετρικές ως προς τον άξονα εξισώσεις ροπής είναι οι εξισώσεις ισορροπίας για το πεδίο τάσεων:

$$0 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\sigma_r) - \frac{\sigma_\theta}{\sigma_r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \quad (7a)$$

$$0 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\tau_{rz}) + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \quad (7b)$$

Ενώ ολοκληρώνουμε ως προς το χρόνο η ισορροπία μπορεί να επιτευχθεί αν εξασφαλιστεί ότι το αναπροσαρμοζόμενο πεδίο τάσεων ικανοποιεί τις εξισώσεις (7a,b) για κάθε βήμα του χρόνου. Το προσαυξανόμενο πεδίο τάσεων (incremental stress field) $\Delta\sigma$ συνδέεται με το προσαυξανόμενο πεδίο παραμορφώσεων (incremental strain field) $\Delta\varepsilon$ για μεταβολή του χρόνου από t σε Δt ως εξής:

$$\Delta\sigma = D\Delta\varepsilon^e = D(B\Delta d - \dot{\epsilon}^p \Delta t - \Delta\varepsilon^0) \quad (8)$$

Στην εξίσωση (8) οι προσαυξήσεις της παραμόρφωσης έχουν εκφραστεί συναρτήσει της προσαύξησης του συνολικού πεδίου μετατοπίσεων της μήτρας $\Delta\varepsilon = B\Delta d$.

Επίσης, γίνεται η υπόθεση ότι ο ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης καθώς και η προσαυξανόμενη θερμοκρασία παραμόρφωσης είναι γνωστές για κάθε τρέχον βήμα του χρόνου. Για κάθε βήμα του χρόνου, οι προσαυξήσεις στο πεδίο μετατοπίσεων μπορούν να υπολογιστούν αντικαθιστώντας την εξίσωση (8) στην εξίσωση (7). Στο τέλος κάθε χρονικού βήματος οι προσαυξανόμενες μετατοπίσεις, τάσεις και παραμορφώσεις προστίθενται αθροιστικά.

$$d(t + \Delta t) = d(t) + \Delta d$$

$$\begin{aligned}\sigma(t + \Delta t) &= \sigma(t) + \Delta\sigma & (9) \\ \varepsilon(t + \Delta t) &= \varepsilon(t) + \Delta\varepsilon \\ \varepsilon^p(t + \Delta t) &= \varepsilon^p(t) + \dot{\varepsilon}^p \Delta t\end{aligned}$$

Για το επόμενο βήμα του χρόνου η αναλογία πλαστικής παραμόρφωσης υπολογίζεται από την εξίσωση (6) και η προσαύξηση στη θερμοκρασία παραμόρφωσης υπολογίζεται επιλύοντας τα πεδία θερμοδυναμικής θερμοκρασίας και "φανταστικής" θερμοκρασίας. Στο τέλος κάθε χρονικού βήματος το άθροισμα των τάσεων (cumulative stress) ισούται με την τιμή της τάσης που υπολογίζεται από την συσσωρευόμενη ελαστική παραμόρφωση (cumulative elastic strain) $\sigma(t + \Delta t) = D\varepsilon^e(t + \Delta t)$. Όμως, εφόσον οι εξισώσεις ισορροπίας έχουν γραμμικοποιηθεί (linearized) για κάθε βήμα του χρόνου, το άθροισμα της τάσης ίσως αποκλίνει από την πραγματική τιμή. Επομένως, γίνεται η χρήση μιας "διορθωτικής τάσης" $\Psi(t + \Delta t)$ στο προσαναυζανόμενο πεδίο τάσεων (Εξίσωση 8) για να καλυφθεί η απόκλιση σε κάθε βήμα του χρόνου.

$$\Psi(t + \Delta t) = \sigma(t + \Delta t) - D[\varepsilon(t + \Delta t) - \varepsilon^p(t + \Delta t) - \varepsilon^0(t + \Delta t)] \quad (10)$$

Οι εξισώσεις επιλύονται ακολουθώντας σπάντα διεργασίες στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων [50]. Η φυσική οριακή συνθήκη είναι μία κατάσταση χωρίς τάση (stress free state). Στη περιοχή της κεντρικής γραμμής και το περιφερειακό σύνορο της υπάρχει η συνθήκη ότι η ακτινική μετατόπιση είναι μηδενική ενώ στη περιοχή απέναντι από την επιφάνεια υπάρχει η συνθήκη της μηδενικής μετατόπισης.

6.4.3 Αξονοσυμμετρική μεταφορά Θερμότητας σε ισότροπο υλικό.

Το πεδίο εξισώσεων για τη μεταφορά θερμότητας είναι ως εξής:

$$\rho C_p (\partial T / \partial t) - \bar{\nabla} \cdot (K \bar{\nabla} T) - g = 0 \quad (11)$$

όπου ρ , C_p και K είναι η πυκνότητα η ειδική θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα αντίστοιχα. Ο όρος g εκφράζει την κατ' όγκο θέρμανση (volumetric heating) στην περιοχή. Επειδή το υλικό είναι από γυαλί, η λανθάνουσα θερμότητα η οποία σχετίζεται με την τήξη, δεν εμφανίζεται στον όρο g . Η κατ' όγκο θέρμανση που παρέχεται από το laser δίνεται από τη σχέση:

$$g = E_p [1 - R] \cdot I_r(r) \cdot I_z(z) \cdot I_t(t) \quad (12)$$

όπου E_p είναι η ενέργεια του παλμού, R είναι η ανακλαστικότητα της επιφάνειας, $I_r(r)$ είναι το χωρικό ακτινικό προφίλ της δέσμης, $I_z(z)$ είναι η χωρική αξονική εξασθένηση της δέσμης στο γυαλί και $I_t(t)$ είναι το χρονικό προφίλ του παλμού laser. Επίσης το $I_r(r)$

είναι ομαλοποιημένο έτσι ώστε να ισχύει $\int_{r=0}^{\infty} I_r(r) 2\pi r dr = 1$

Ο εστιακός φακός επιβάλλει μια κατανομή Gauss:

$$I_r(r) = \frac{8}{\pi D_{1/e^2}^2} \exp(-8r^2 / D_{1/e^2}^2) \quad (13)$$

όπου D_{1/e^2} είναι η διάμετρος της δέσμης στο $1/e^2$ της έντασης της κατανομής Gauss. Το προφίλ του άξονα $I_z(z)$ είναι επίσης ομαλοποιημένο, έτσι ώστε να ισχύει: $\int_{z=0}^{\infty} I_z(z) dz = 1$.

Αν το φανταστικό μέρος του δείκτη διάθλασης είναι σταθερό τότε το $I_z(z)$ μπορεί να περιγραφεί μέσω του νόμου του Bouguer:

$I_z(z) = n \exp(-nz)$, όπου $n = 4\pi n_{im} / \lambda$ είναι η αντίστοιχη του βάθους της οπτικής διείσδυσης. Όμως, στο πυριτικό γυαλί, το φανταστικό μέρος του δείκτη διάθλασης n_{im} στο μήκος κύματος του CO₂ laser είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και συνεπώς δεν είναι σταθερό πέρα από το μήκος της οπτικής τροχιάς. Σε αυτήν την περίπτωση το $I_z(z)$ υπολογίζεται ως εξής:

$$I_z(z) = \frac{\exp[-(4\pi / \lambda) \int_{s=0}^z n_{im} ds]}{\int_{z=0}^{\infty} \exp[-(4\pi / \lambda) \int_{s=0}^z n_{im} ds] dz} \quad (14)$$

Το χρονικό προφίλ του παλμού της δέσμης είναι επίσης ομαλοποιημένο έτσι ώστε να ισχύει $\int_{t=0}^{\infty} I_t(t) dt = 1$

Το προφίλ του παλμού μπορεί να εκφραστεί μέσω του Full-Width-Half-Maximum (FWHM) εύρος παλμού τ_p και του χρόνου στον οποίο η μέγιστη ένταση του παλμού γίνεται τ_{max} . Για παλμό μορφής Gauss έχουμε:

$$I_t(t) = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{2^{1 - [2(t - \tau_{max}) / \tau_p]^2}}{\tau_p} \quad (15)$$

Η διάχυση της θερμότητας συναρτήσει του χρόνου επιλύεται με τη χρήση στάνταρ διεργασιών που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Τα σύνορα

της επιφάνειας καθώς και της περιφέρειάς της είναι αδιαβατικά. Το κάτω μέρος της επιφάνειας διατηρείται στην κατάσταση της αρχικής ισορροπίας. Στην επιφάνεια, η λόγω εξάτμισης ψύξη αγνοείται αφού η θερμότητα που απομακρύνεται με αυτόν το μηχανισμό είναι μικρή σε σχέση με αυτήν που μεταφέρεται λόγω αγωγής.

Αρχικά η όλη περιοχή βρίσκεται σε κατάσταση με θερμοδυναμική θερμοκρασία στους 300K και φανταστική θερμοκρασία στους 773K. η διαφορική εξίσωση διάχυσης της θερμότητας (Eq 11) ολοκληρώνεται ως προς χρόνο σύμφωνα με τη μέθοδο Crank Nicolson. Η διαφορική εξίσωση που αφορά τη μεταβολή της "φανταστικής" θερμοκρασίας (Eq 1) ολοκληρώνεται μετά από κάθε βήμα του χρόνου με τη χρήση της χρονικής σταθεράς χαλάρωσης $\tau(T_f, T)$ η οποία υπολογίζεται στο ξεκίνημα κάθε χρονικού βήματος.

6.4.4 Θερμοφυσικές Ιδιότητες

Η μεταβολή στο φάσμα απορρόφησης κατά τη θέρμανση με laser έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της συχνότητας κάμψης λόγω δόνησης του SiO_2 με τη θερμοκρασία. Για μήκη κύματος κοντά στα 10.6 μm , οι McLachlan και Meyer [51] υπολόγισαν ότι για το τηγμένο διοξείδιο του πυριτίου το φανταστικό μέρος του δείκτη διάθλασης έχει μία συναρτώμενη με τη θερμοκρασία κλίση μεταξύ 10 και $16 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ για ένα εύρος θερμοκρασιών μεταξύ 25-1800 $^\circ\text{C}$. Μία κλίση των $12 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ βρέθηκε ότι ταιριάζει με τα πειραματικά δεδομένα τροποποίησης της τραχύτητας με laser που έχουν μελετηθεί [38] για το αλουμινοπυριτικό γυαλί. Η δεύτερη βελτίωση στο αρχικό μοντέλο είναι να αγνοήσουμε την υπόθεση του σταθερού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Εφαρμόζοντας γραμμική κλίση της τάξης του $0.0014 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$ στη θερμική αγωγιμότητα βρέθηκε ότι ταιριάζει με τα πειραματικά δεδομένα [38] τροποποίησης της τραχύτητας με laser. Αυτή η κλίση είναι αμετάβλητη για υπολογισμένες τιμές του τηγμένου διοξειδίου του πυριτίου [52].

Η εξάρτηση της θερμοκρασίας εισάγει περισσότερους του ενός παράγοντες στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας στο θερμοκρασιακό εύρος κατά τη διάρκεια του θερμικού κύκλου που επιβάλλεται από τον παλμό του laser. Παρά τις αλλαγές αυτές, η διαφορά στην υπολογισμένη αύξηση της θερμοκρασίας μεταξύ του βελτιωμένου και του προηγούμενου μοντέλου είναι μικρή. Ο λόγος είναι ότι το βάθος της οπτικής διείσδυσης του γυαλιού μειώνεται ενώ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας αυξάνεται. Αυτοί οι δύο παράγοντες μεταφοράς ενέργειας τείνουν να αναιρέσουν ο ένας τον άλλον κατά τη διάρκεια της θέρμανσης. Όμως, η πτώση της θερμοκρασίας στο τέλος του παλμού laser είναι σημαντικά ταχύτερη στο βελτιωμένο μοντέλο λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας του γυαλιού σε υψηλές θερμοκρασίες.

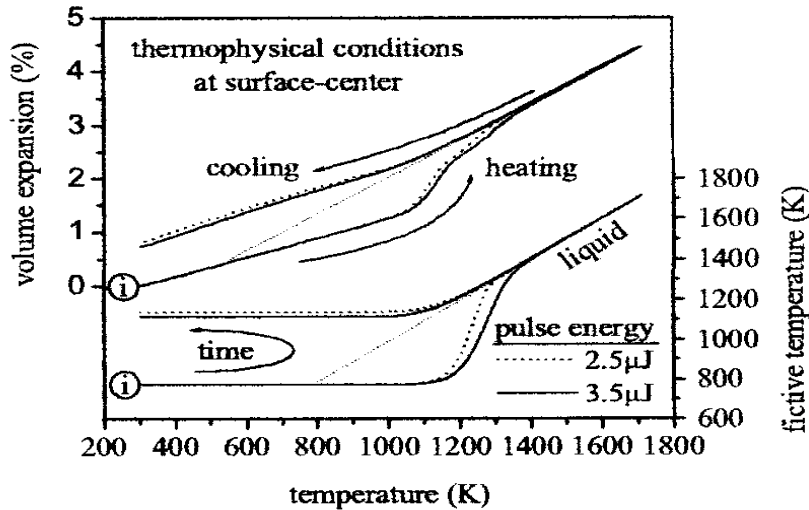
6.4.5 Αριθμητική Επίλυση

Ο κώδικας είναι τυποποιημένος για συμμετρικά ως προς τον άξονα δισδιάστατα προβλήματα χρησιμοποιώντας ορθογωνικά στοιχεία Lagrange 9 κόμβων. Το σύστημα των εξισώσεων επιλύεται σύμφωνα με τις αρχικές και τις οριακές συνθήκες που περιγράφηκαν παραπάνω. Κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης, τα προβλήματα που αφορούν τόσο τη μεταφορά θερμότητας όσο και τη στιγμιαία μεταφορά ροπής αντιμετωπίζονται με τη χρήση μεταβλητών βημάτων του χρόνου. Τα χρονικά βήματα επιλέγονται έτσι ώστε η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή αλλαγή να μην υπερβαίνει τους 5K. Όταν ο ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης γίνει υπολογίσιμος, τότε τα χρονικά βήματα για την επίλυση του προβλήματος είναι του 1ns. Πάνω από την κοντινή επιφάνεια της περιοχής χρησιμοποιούνται λεπτοί κόμβοι σε διαστήματα 140 nm κατά την αξονική διεύθυνση για την ανάλυση της βάρμωσης στις θερμοφυσικές ιδιότητες κοντά στην επιφάνεια. Πέρα από το κέντρο και κοντά στην περιοχή της επιφάνειας, τα στοιχεία αυξάνουν γραμμικά τόσο κατά την αξονική όσο και κατά την ακτινική διεύθυνση.

6.4.6 Αποτελέσματα Μοντέλου

α) Χάρτης "Φανταστικής" Θερμοκρασίας

Η ποσοτική περιγραφή του τι συμβαίνει στο γυαλί στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη στο πέρας του θερμικού κύκλου μπορεί να αποτυπωθεί σε ένα χάρτη φανταστικής θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του παρόντος μοντέλου. Ο χάρτης αυτός δείχνει την αύξηση της "φανταστικής" θερμοκρασίας και του κλάσματος του όγκου (volume fraction) συναρτήσει της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του θερμικού κύκλου στο γυαλί. Η αύξηση του όγκου είναι ένα μέτρο του συνδυασμένου αποτελέσματος των θερμοελαστικών και ιξωδοπλαστικών αλλαγών. Στο Σχήμα 6.4.6.1 φαίνεται το ιστορικό ενός στοιχειακού όγκου γυαλιού στην επιφάνεια και στην κεντρική γραμμή της δέσμης laser για παλμούς ενέργειας μεταξύ 2.5-3.5 μJ . Οι διαγώνιες διακεκομμένες γραμμές απεικονίζουν τη σχέση ισορροπίας μεταξύ της φανταστικής θερμοκρασίας ή του αυξανόμενου όγκου και της θερμοκρασίας για την υγρή φάση.



Σχήμα 6.4.6.1. Χάρτης "Φανταστικής" Θερμοκρασίας: Το ιστορικό ενός στοιχειακού όγκου γυαλιού στην επιφάνεια και στην κεντρική γραμμή της δέσμης laser.

Πριν την έναρξη της θέρμανσης η "φανταστική" θερμοκρασία του γυαλιού είναι υψηλότερη από τη θερμοδυναμική θερμοκρασία με αποτέλεσμα η αρχική κατάσταση που συμβολίζεται με το 'i' στο Σχήμα 6.4.6.1 να είναι κάτω από τη γραμμή ισορροπίας. Η αρχική διαδρομή κατά τη διάρκεια της θέρμανσης είναι παράπλευρη με αυτήν της σταθερής "φανταστικής" θερμοκρασίας για την οποία η αύξηση του όγκου οφείλεται εξ' ολοκλήρου σε θερμοελαστικές επιδράσεις. Η πορεία της θέρμανσης υπερβαίνει τα όρια της ισορροπίας και αυτό γιατί η χρονική αναλογία που απαιτείται για να ακολουθήσει τη γραμμή ισορροπίας είναι μεγάλη σε σύγκριση με την χρονική αναλογία της θέρμανσης, στην τομή των θερμοκρασιών.

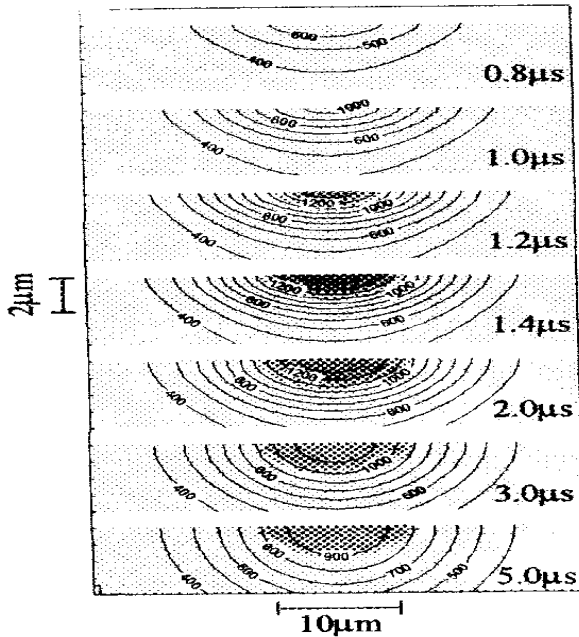
Όταν η αύξηση της θερμοκρασίας είναι αρκετή ώστε η αναλογία των δομικών αλλαγών να μπορεί να αντιπαρατεθεί με την αναλογία της θέρμανσης, η διαδρομή γρήγορα φθάνει τη γραμμή ισορροπίας. Αυτή η μετάβαση από την υαλώδη κατάσταση στην υγρή κατάσταση χαρακτηρίζεται από ένα "άλμα" στη "φανταστική" θερμοκρασία το οποίο είναι συγκρίσιμο με την αλλαγή της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας. Αυτό το άλμα συμβαίνει όταν η θερμοκρασία μετάβασης η οποία

καθορίζεται από τη χρονική κλίμακα της θέρμανσης υπερβεί κατά 300K ή περισσότερο τη συμβατική θερμοκρασία όπως αυτή ορίζεται όταν το ιξώδες λάβει την τιμή 10^{13} poise. Μετά το "άλμα", περαιτέρω θέρμανση οδηγεί το υγρό σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές της γραμμής ισορροπίας.

Η ψύξη φέρει την υγρή κατάσταση να υποχωρεί κάτω από τη γραμμή ισορροπίας. Κατά τη διεργασία αυτή, ο χρόνος που απαιτείται για την υγρή δομή να προσαρμοστεί στην αλλαγή της θερμοκρασίας αυξάνεται. Οι αλλαγές στην υγρή δομή τελικά υφίστανται κοντά στη θερμοκρασία μετάβασης και το υπόλοιπο της διαδρομής της ψύξης είναι παράπλευρο με τη σταθερή συνεχή θερμοκρασία. Από το Σχήμα 6.4.6.1 μπορούμε να δούμε ότι η θερμοκρασία μετάβασης για μισό κύκλο ψύξης είναι λίγο χαμηλότερη από αυτή που αντιστοιχεί για μισό κύκλο θέρμανσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο ρυθμός ψύξης όπως αυτός επιβάλλεται από τη διάχυση (diffusion) είναι πιο αργός σε σχέση με αυτόν της θέρμανσης.

β) Πεδία Θερμοδυναμικής και "Φανταστικής" Θερμοκρασίας

Υπάρχουν δύο πεδία που συνδέονται με το μοντέλο τροποποίησης της τραχύτητας με laser. Το θερμοδυναμικό πεδίο και το πεδίο "φανταστικής" θερμοκρασίας. Στο Σχήμα 6.4.6.2 βλέπουμε την εξέλιξη και των δύο σε διάφορες στιγμές κατά τη διάρκεια του θερμικού κύκλου που έχει δημιουργηθεί από την εφαρμογή παλμού laser ενέργειας 3.0μJ. Σε όλες τις περιπτώσεις οι καμπύλες γραμμές εκφράζουν το θερμοκρασιακό πεδίο ανά διαστήματα των 100K όπου το εξώτατο αντιστοιχεί στους 400K.



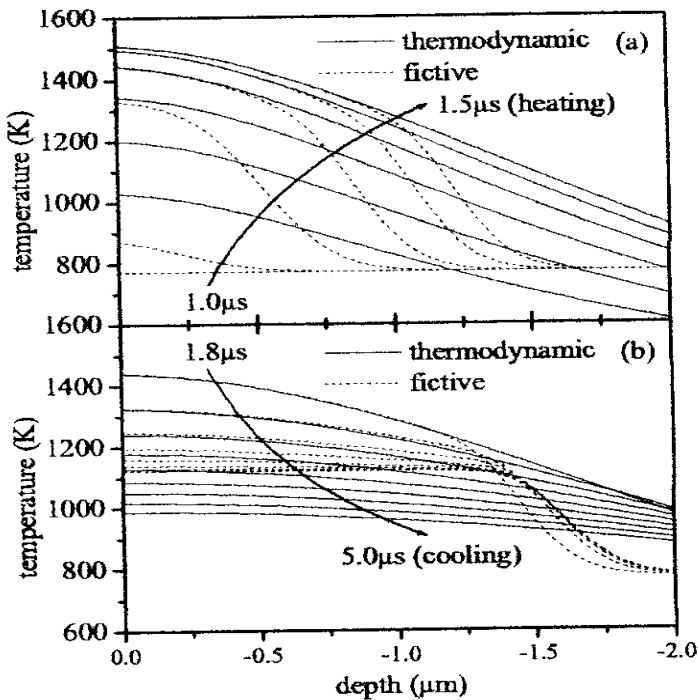
Σχήμα 6.4.6.2 Η εξέλιξη της Θερμοδυναμικής και της "Φανταστικής" θερμοκρασίας σε διάφορες στιγμές κατά τη διάρκεια του θερμικού κύκλου που έχει δημιουργηθεί από την εφαρμογή παλμού laser ενέργειας 3.0μJ. Οι καμπύλες γραμμές προσδιορίζουν το πεδίο θερμοκρασίας ανά διαστήματα των 100K. Το πεδίο της "φανταστικής" θερμοκρασίας φαίνεται ποιοτικά με το γκρι χρώμα.

Η Γκαουσιανή μορφή του στίγματος του εστιασμένου laser καθώς και το βάθος της οπτικής διείσδυσης καθορίζουν το σχήμα της θερμοκρασιακής καμπύλης κατά τη διάρκεια του θερμικού κύκλου. Το πεδίο της "φανταστικής" θερμοκρασίας φαίνεται ποιοτικά με το γκρι χρώμα στο Σχήμα 6.4.6.2. Η αρχική "φανταστική" θερμοκρασία του γυαλιού είναι 773K. Η "φανταστική" θερμοκρασία του γυαλιού δεν υφίσταται αλλαγή μέχρι η θερμοδυναμική θερμοκρασία να υπερβεί τους 1100K σύμφωνα με τη θερμοκρασία μετάβασης του θερμικού κύκλου. Αυτό αντιστοιχεί σε χρόνο λίγο μεγαλύτερο από το 1μs όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.4.6.2. Ισόθερμες τόσο της θερμοδυναμικής όσο και της "φανταστικής" θερμοκρασίας ακολουθούν την ίδια τροχιά κάτω από τους 1300K. Η κατάσταση αλλάζει μετά την κορυφή του θερμικού κύκλου.

Κατά την ψύξη, ισόθερμες υψηλής θερμοδυναμικής θερμοκρασίας συμβάλλουν στο να συνεχίζουν να εξαπλώνονται οι ισόθερμες χαμηλότερης θερμοκρασίας και να αναπτύσσονται σφαιρικά. Όμως, η εξώτατη ισόθερμη της "φανταστικής" θερμοκρασίας καταψύχεται μέσα στην τελική κατασκευή του γυαλιού εφόσον η θερμοδυναμική θερμοκρασία πέφτει κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης. Οι

ισόθερμες διαγράφουν τέτοια τροχιά σε μικρή χρονική κλίμακα ώστε να μην υφίσταται σημαντική αλλαγή η θερμοκρασία μετάβασης κατά τη διεργασία. Συνεπώς, η τελική "φανταστική" θερμοκρασία είναι σχετικά σταθερή πάνω από την περιοχή που μεταβάλλεται στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

Στο Σχήμα 6.4.6.3 βλέπουμε μία ποσοτική περιγραφή της σχέσης μεταξύ της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας (συνεχής γραμμή) και της "φανταστικής" θερμοκρασίας (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος της βασικής γραμμής της θερμαινόμενης ζώνης για τις ίδιες συνθήκες παλμού που εφαρμόστηκαν και στο Σχήμα 6.4.6.2.



Σχήμα 6.4.6.3. Η σχέση μεταξύ της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας (συνεχής γραμμή) και της "φανταστικής" θερμοκρασίας (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος της βασικής γραμμής της θερμαινόμενης ζώνης για τις ίδιες συνθήκες παλμού που εφαρμόστηκαν και στο Σχήμα 3.4.2. (a) Για το θερμικό κύκλο, παρουσιάζεται η κατανομή ως προς το βάθος για μεσοδιαστήματα των 100ns μεταξύ 1.0μs και 1.5μs. (b) Για τον ψυκτικό κύκλο, παρουσιάζεται η κατανομή ως προς το βάθος για μεσοδιαστήματα των 400ns μεταξύ 1.8 μs και 5.0μs.

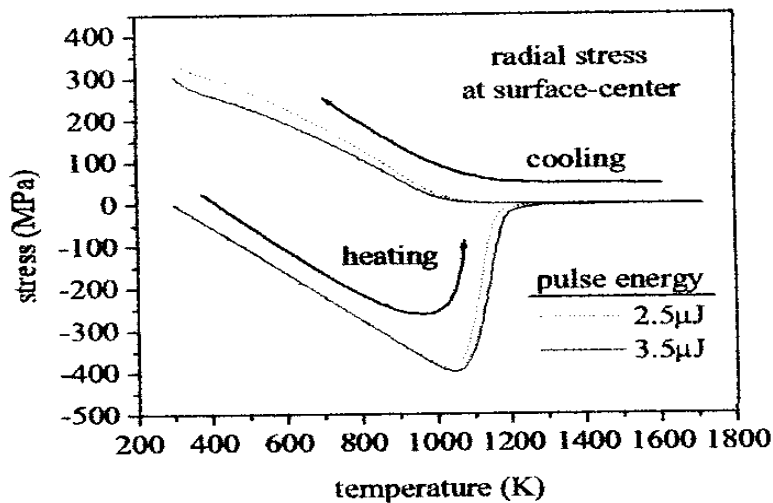
Στο Σχήμα 6.4.6.3a βλέπουμε για το θερμικό κύκλο την κατανομή ως προς το βάθος για μεσοδιαστήματα των 100ns μεταξύ 1.0μs και 1.5μs. Για 1.0μs η θερμοδυναμική θερμοκρασία στην επιφάνεια έχει υπερβεί τους 1000K. όμως, η "φανταστική" θερμοκρασία δεν έχει υπερβεί τους 773K. 100ns αργότερα, η θερμοδυναμική θερμοκρασία έχει ανέβει πάνω από τους 1200K και συνεπώς έχει ανεβάσει και την τιμή της "φανταστικής" θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια.

Όσο η θερμοδυναμική θερμοκρασία συνεχίζει να αυξάνεται η υαλώδης μετάβαση ωθείται περαιτέρω μέσα στην κύρια μάζα του γυαλιού. Η μετάβαση από το γυαλί σε μία υγρή κατάσταση λαμβάνει χώρα σε ένα θερμοκρασιακό εύρος που υπερβαίνει τους 1100K. Για θερμοκρασίες υψηλότερες των 1300K η "φανταστική" θερμοκρασία είναι σχεδόν ταυτόσημη με τη θερμοδυναμική θερμοκρασία.

Στο Σχήμα 6.4.6.3b βλέπουμε την κατανομή της θερμοκρασίας συναρτήσει του βάθους για ψύξη με μεσοδιαστήματα των 400ns μεταξύ 1.8μs και 5.0μs. Όσο η θερμοδυναμική θερμοκρασία πέφτει, η "φανταστική" θερμοκρασία μειώνεται και πλησιάζει τη θερμοκρασία μετάβασης. Όμως, η "φανταστική" θερμοκρασία δεν μπορεί να πάρει τιμές μικρότερες από τη θερμοκρασία μετάβασης όπως αυτή ορίζεται από τη χρονική κλίμακα της ψύξης. Συνεπώς, καθώς η θερμοδυναμική θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους 1100K, η "φανταστική" θερμοκρασία στο γυαλί είναι περίπου στους 1120K για βάθος 1.3μm. Μεταξύ 1.3μm και 2.0μm η "φανταστική" θερμοκρασία βρίσκεται μεταξύ την αρχική της τιμή και τους 1120K, λόγω της μερικής χαλάρωσης που έχει λάβει χώρα στην περιοχή.

γ) Πεδία τάσεων (Stress Fields)

Τα πεδία τάσεων στο γυαλί προκαλούν πλαστική ροή σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τη θερμοκρασία μετάβασης. Οι υψηλότερες τάσεις είναι οι κανονικές ακτινικές και αξιμουθίες συνιστώσες που εμφανίζονται κοντά στη βασική γραμμή της επιφάνειας του θερμαινόμενου όγκου. Κατά την ελαστική συμπεριφορά, όσο η θερμοκρασία στην περιοχή αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και η κατάσταση των τάσεων. Όταν έχουμε υπέρβαση της θερμοκρασίας μετάβασης, η πλαστική χαλάρωση θα ανακουφίσει την κατανομή των τάσεων. Στο Σχήμα 6.4.6.4 βλέπουμε το φαινόμενο να λαμβάνει χώρα κοντά στη βασική γραμμή της επιφάνειας του στοιχείου του μοντέλου για παλμούς laser ενέργειας 2.5μJ και 3.5μJ.



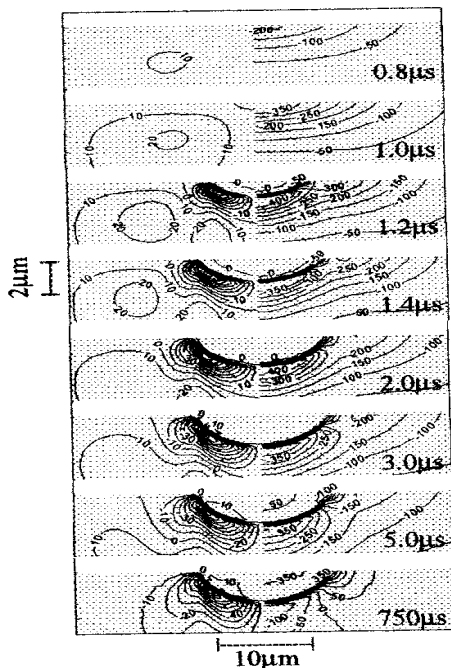
Σχήμα 6.4.6.4 Η αξονική τάση στη βασική γραμμή της επιφάνειας του μοντέλου στη διάρκεια ενός θερμικού κύκλου για παλμούς laser ενέργειας 2.5μJ και 3.5μJ. Εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις απεικονίζονται με θετικό και αρνητικό πρόσημο αντίστοιχα.

Κατά τη θέρμανση η κεντρική περιοχή δέχεται αυξανόμενες τάσεις συμπίεσης.. Αυτό συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί η θερμοκρασία μετάβασης όπου αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση. Λόγω της απότομης θέρμανσης η πλαστική χαλάρωση εμφανίζεται από άκρη σε άκρη στο στοιχείο.

Η κατανομή τάσεων στο υγρό είναι κοντά στο μηδέν για το υπόλοιπο της θέρμανσης και την αρχή της ψύξης. Κατά τον κύκλο ψύξης, η κατανομή τάσεων (stress state) επανενισχύεται στο γυαλί καθώς η θερμοκρασία πέφτει κάτω από τη θερμοκρασία

μετάβασης. Αφού η τάση συμπίεσης μετατράπηκε σε αξονική παραμόρφωση κατά τη διεργασία χαλάρωσης, η αξονική παραμόρφωση η οποία συνδέεται με την ελαστική θερμική διαστολή, δεν μπορεί να επανέλθει πλήρως με την επακόλουθη ψύξη. Συνεπώς, η κεντρική περιοχή εισέρχεται σε μία κατάσταση τάσης εφελκυσμού.

Η τάση εφελκυσμού αυξάνεται κατά την ψύξη αντίστοιχα όπως και η τάση συμπίεσης αυξανόταν κατά τη θέρμανση. Η μέγιστη τιμή της εφελκυστικής τάσης λαμβάνει παραπλήσια τιμή με τη μέγιστη τιμή της τάσης συμπίεσης. Σε μακροσκοπικά δείγματα γυαλιού τόσο υψηλή εφελκυστική τάση θα οδηγούσε σε θραύση. Στην πραγματικότητα, διαρροή μπορεί να συμβεί πιο εύκολα με την εφελκυστική τάση η οποία θα ελάττωνε την τελική κατάσταση τάσεων στο γυαλί. Στο μοντέλο δεν υπάρχει διάκριση για συνθήκες διαρροής για τάσεις συμπίεσης ή εφελκυσμού. Στο Σχήμα 6.4.6.5 βλέπουμε την εξέλιξη της διατμητικής τάσης τ_{tz} (αριστερά από τη βασική γραμμή) της ακτινικής τάσης σ_r (δεξιά της βασικής γραμμής) στο γυαλί για διάφορες χρονικές στιγμές του θερμικού κύκλου.



Σχήμα 6.4.6.5. Εξέλιξη της διατμητικής τάσης (αριστερά από τη βασική γραμμή) και της ακτινικής τάσης (δεξιά της βασικής γραμμής) στο γυαλί για διάφορες χρονικές στιγμές του θερμικού κύκλου για ενέργεια παλμού 3.0μJ.

Η ενέργεια του παλμού laser είναι στα 3μJ όπως ακριβώς και στο θερμοκρασιακό πεδίο που περιγράφηκε στο Σχήμα 5.4.6.2. Η αρχική κατάσταση τάσεων στο γυαλί είναι μηδενική. Κατά τη θέρμανση, οι ακτινικές τάσεις συμπίεσης αναπτύχθηκαν μέχρι 1μs μετά απότου σχηματίζεται μία περιοχή ενός υγρού κοιλώματος με μηδενικές τάσεις. Η περιοχή του υγρού συνεχίζει να αναπτύσσεται μέχρι και τα 3.0μs που είναι περίπου 1.5μs περισσότερο από το χρόνο όπου έχουμε την αποκορύφωση των θερμικών συνθηκών.

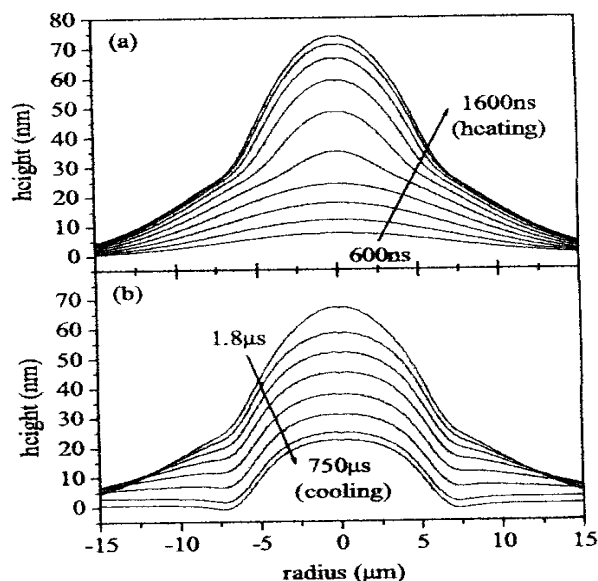
Κατά τον κύκλο της ψύξης, το ιξώδες στην περιοχή του υγρού αυξάνεται. Στα 5.0μs η πλαστική χαλάρωση δεν μπορεί να ακολουθήσει το ρυθμό της ψύξης, και οι εφελκυστικές τάσεις αρχίζουν να αναπτύσσονται στην κεντρική περιοχή. Αυτό φαίνεται στα δύο τελευταία καρέ (δεξιά από τη βασική γραμμή) του Σχήμα 6.4.6.5. το

τελευταίο καρέ δείχνει τις παραμένουσες τάσεις στο γυαλί μόλις η θερμοκρασία επανέλθει σε συνθήκες περιβάλλοντος.

δ) Εξέλιξη της Τοπογραφίας της Επιφάνειας.

Η μετάβαση της εξέλιξης της τοπογραφίας της επιφάνειας μπορεί να εκτιμηθεί με το αριθμητικό μοντέλο. Τοπογραφική κίνηση εμφανίζεται λόγω των διαφορών ειδών των αλλαγών στην μικρο-υπο-επιφάνειας του υποστρώματος. Το πρώτο είδος είναι η θερμοελαστική επίδραση, η οποία προκαλεί διόγκωση της επιφάνειας κατά τη θέρμανση και συστολή (contract) κατά την ψύξη. Οι θερμοελαστικές επιδράσεις είναι αναστρέψιμες. Η προκύπτουσα μετατόπιση της επιφάνειας εξαρτάται από την αύξηση της θερμοκρασίας, το βάθος της θερμικής διείσδυσης και τις θερμοελαστικές ιδιότητες της επιφάνειας. Το δεύτερο είδος είναι η πλαστική κίνηση του όγκου κοντά στην επιφάνεια που θερμαίνεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία μετάβασης. Η πλαστική παραμόρφωση μειώνει τις τάσεις στο γυαλί. Στο μοντέλο, ο όγκος προφυλάσσεται κατά τη μηχανική διεργασία.

Ωστόσο, οι κατ' όγκον αλλαγές πλαστικότητας μπορεί να εμφανιστούν λόγω των δομικών αλλαγών που λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασία υψηλότερη από τη θερμοκρασία μετάβασης. Στο παρόν μοντέλο, η επίδραση αυτή λαμβάνεται υπόψη από τη συμβολή της "φανταστικής" θερμοκρασίας στη θερμοκρασία της παραμόρφωσης όπως φαίνεται στην εξίσωση 5. Η απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας φαίνεται στο Σχήμα 6.4.6.6a για διαστήματα των 100ns από 600ns έως 1600ns.



Σχήμα 6.4.6.6. Τοπογραφία της επιφάνειας του γυαλιού κατά τη διάρκεια ενός θερμικού κύκλου με παλμό ενέργειας 3.0μJ

(a) Κατά τη θέρμανση, βλέπουμε την τοπογραφία ανά διαστήματα των 100ns μεταξύ 600 και 1600ns.

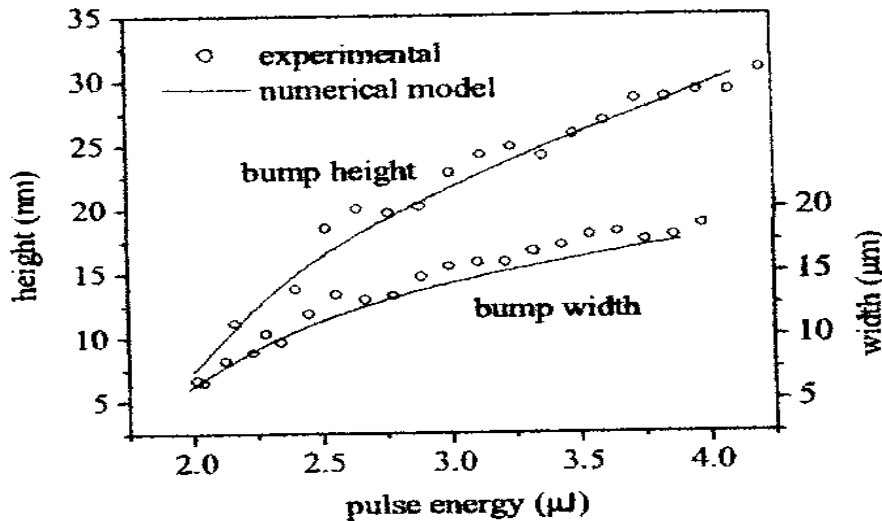
(b) Κατά την ψύξη, βλέπουμε την τοπογραφία για 1.8μs, 3.2μs, 6.4μs, 12.8μs, 25.0μs, 50.0μs, 100μs, και 750μs.

Η ενέργεια παλμού των 3.0μJ αρχικά προκαλεί ένα κατοπτρικό είδωλο των ισόθερων της υπο-επιφάνειας. Ωστόσο, μόλις η θερμοκρασία υπερβεί τη θερμοκρασία

μετάβασης δημιουργείται μία ασυνέχεια στην ανάπτυξη της επιφάνειας η οποία οριοθετεί την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης. Στο Σχήμα 6.4.6.6b βλέπουμε την εξέλιξη της τοπογραφίας για το ψυκτικό ήμισυ του ίδιου θερμικού κύκλου με το Σχήμα 7α.

Η απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας δίνεται μεταξύ 1.8 και 750μs για μη κανονικά χρονικά διαστήματα. Καθώς η τοπογραφία της επιφάνειας πλησιάζει στην τελική της κατάσταση, η θερμοελαστική συνεισφορά στην αύξηση του όγκου είναι μηδαμινή. Η παραμένουσα τοπογραφία οφείλεται αποκλειστικά στην πλαστική παραμόρφωση πάνω από τη ζώνη του υλικού που έχει θερμανθεί σε θερμοκρασία υψηλότερη από τη θερμοκρασία μετάβασης.

Το τελικό ύψος και πλάτος της προεξοχής της επιφάνειας εξαρτάται από το μέγεθος της έκτασης της ακτίνας και του βάθους όπου η θερμοκρασία μετάβασης προωθείται μέσα στο γυαλί. Το Σχήμα 6.4.6.7 συνοψίζει αυτές τις προεξοχές της επιφάνειας συναρτήσει της ενέργειας του παλμού, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μοντέλων με πειραματικές μετρήσεις.



Σχήμα 6.4.6.7. Σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πειραματικών αποτελεσμάτων για τις διαστάσεις των προεξοχών συναρτήσει της ενέργειας του παλμού.

Οι διαστάσεις των προεξοχών στην τροποποίηση τραχύτητας με laser μετρούνται με μικροσκόπιο απεικόνισης της επιφάνειας (Phase Shift MicroXAM surface mapping microscope). Το γεγονός ότι τα αποτελέσματα των μοντέλων με τα πειραματικά αποτελέσματα συγκλίνουν ενισχύει την εγκυρότητα των μοντέλων.

Η διάμετρος των προεξοχών της επιφάνειας εξαρτάται από την ακτινική έκταση του θερμικού πεδίου και από την τιμή της θερμοκρασίας μετάβασης. Το ύψος των προεξοχών της επιφάνειας εξαρτάται τόσο από την κατάσταση των παραμένουσων τάσεων όσο και από το συντελεστή α_{TF} που συνδέει την παραμόρφωση με την κατάσταση της "φανταστικής" θερμοκρασίας. Για το παρόν μοντέλο για τιμή του συντελεστή $\alpha_{TF} = 2.5 \times 10^{-5}$ έχουμε πολύ καλή σύγκλιση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Ωστόσο, αν η τελική κατάσταση εφελκυστικών τάσεων στο γυαλί είναι μικρότερη από αυτήν που είχε προβλεφθεί στο μοντέλο, η τιμή του συντελεστή α_{TF} θα πρέπει να ληφθεί υψηλότερη.

ε) Συμπέρασμα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάσαμε ένα μοντέλο τροποποίησης τραχύτητας της επιφάνειας του γυαλιού, με laser. Στα πεδία εξισώσεων που ολοκληρώθηκαν αριθμητικά προστέθηκε και η χρήση και ο υπολογισμός της "φανταστικής" θερμοκρασίας. Η εξαρτημένη από τη θερμοκρασία χρονική σταθερά σε συνδυασμό με την εξίσωση αναλογίας της "φανταστικής" θερμοκρασίας καθορίζεται από τα δεδομένα του ιξώδους. Όταν αυτό ενσωματωθεί στο μοντέλο, η μικρή χρονική κλίμακα του θερμικού κύκλου οδηγεί σε θερμοκρασία μετάβασης του γυαλιού υψηλότερη κατά 300K και πλέον βαθμούς από τη συμβατική τιμή. Η τελική τροποποιημένη κατάσταση της "φανταστικής" θερμοκρασίας στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη είναι σχετικά σταθερή με το πέρας των αλλαγών.

Παρουσιάσαμε το αριθμητικό μοντέλο της ελαστο-ιξωδοπλαστικής παραμόρφωσης και των πεδίων τάσεων κατά τη διεργασία τροποποίησης της τραχύτητας του γυαλιού με laser. Η πλαστική παραμόρφωση που οφείλεται στις θερμομηχανικές τάσεις και στην αύξηση της "φανταστικής" θερμοκρασίας έχει ληφθεί υπόψη. Το μοντέλο επεξηγεί την αύξηση στην τάση συμπίεσης που οφείλεται στην αρχική θέρμανση, τη διεργασία χαλάρωσης που παρατηρείται στην τηγμένη περιοχή σε θερμοκρασία υψηλότερη από αυτήν της θερμοκρασίας μετάβασης και την επακόλουθη εισαγωγή της εφελκυστικής τάσης κατά την ψύξη. Στο τέλος του θερμικού κύκλου η περιοχή του γυαλιού με την αλλαγμένη "φανταστική" θερμοκρασία είναι σε κατάσταση υψηλής εφελκυστικής τάσης.

Αναπτύχθηκε η συνέπεια του μοντέλου ελαστο-ιξωδοπλαστικής παραμόρφωσης στο χρόνο εξέλιξης της τοπογραφίας της επιφάνειας και βρέθηκε σύγκλιση με την τελική γεωμετρία των προεξοχών της επιφάνειας που προκύπτει από τη διεργασία. Για να συνταιριάξουν οι γεωμετρικές διαστάσεις της πρόσκρουσης στην τροποποίηση της τραχύτητας με laser, το μοντέλο προβλέπει θερμικές προϋποθέσεις που είναι σύμφωνες με πυρομετρικές μετρήσεις.

Ένα σημείο που είναι άξιο αναφοράς και θα απασχολήσει πειραματικές εργασίες στο μέλλον είναι ο βαθμός της παραμένουσας εφελκυστικής τάσης που υπάρχει κατά την τροποποίηση τραχύτητας των προεξοχών της επιφάνειας με laser.

6.5. Χρήση Laser για τροποποίηση Ορθοπεδικών Εμφυτευμάτων.

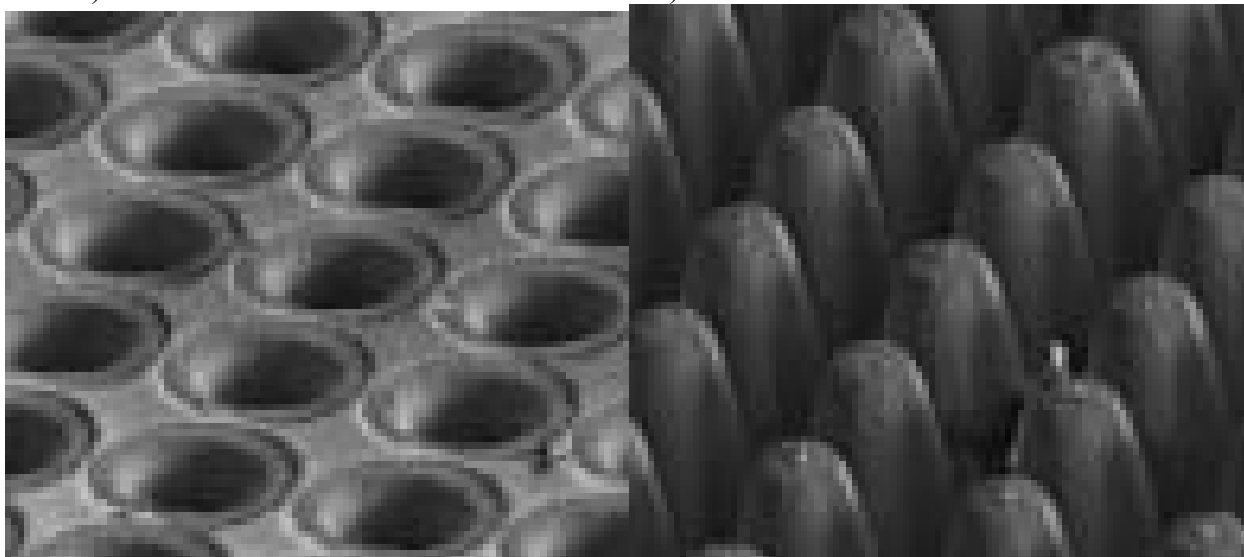
Αρκετές διεργασίες έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την εφαρμογή laser για την τροποποίηση της επιφάνειας ενός υλικού. Η εφαρμογή της τεχνολογίας laser στην τροποποίηση της επιφάνειας είναι ιδιαίτερα σημαντική, αφενός γιατί κατά τη διεργασία δεν υπάρχει επαφή και αφετέρου λόγω της χαμηλής ποσότητας θερμότητας που παρέχεται στο μέσο. Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η χρήση ενός συστήματος laser Nd:YVO₄, το οποίο έχει την ικανότητα να παράγει μήκη κυμάτων 1064 nm και 355nm. Το σύστημα αυτό τοποθετήθηκε σε ένα τεσσάρων αξόνων σταθμό εργασίας για μεγαλύτερη ευελιξία και καλύτερη λειτουργικότητα.

Εφόσον το σύστημα laser έχει τη δυνατότητα να παράγει δύο διαφορετικά μήκη κύματος, έχει την ικανότητα να παράγει ένα μεγάλο εύρος χαρακτηριστικών στα υλικά, από 10 μ m-1000 μ m, και επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μεγάλο εύρος υλικών όπως μέταλλα, κεραμικά και πολυμερή.

Επιπλέον, το μικρό εύρος παλμού του συστήματος laser (35ns) επιτρέπει την αποβολή του υλικού χωρίς χρήση επιπρόσθετης θερμότητας. Κάποια δείγματα τροποποίησης της τραχύτητας επιφανειών με laser φαίνονται στο σχήμα 6.5.1.

a)

b)



Σχήμα 6.5.1. Τροποποίηση τραχύτητας επιφάνειας Γραφίτη.

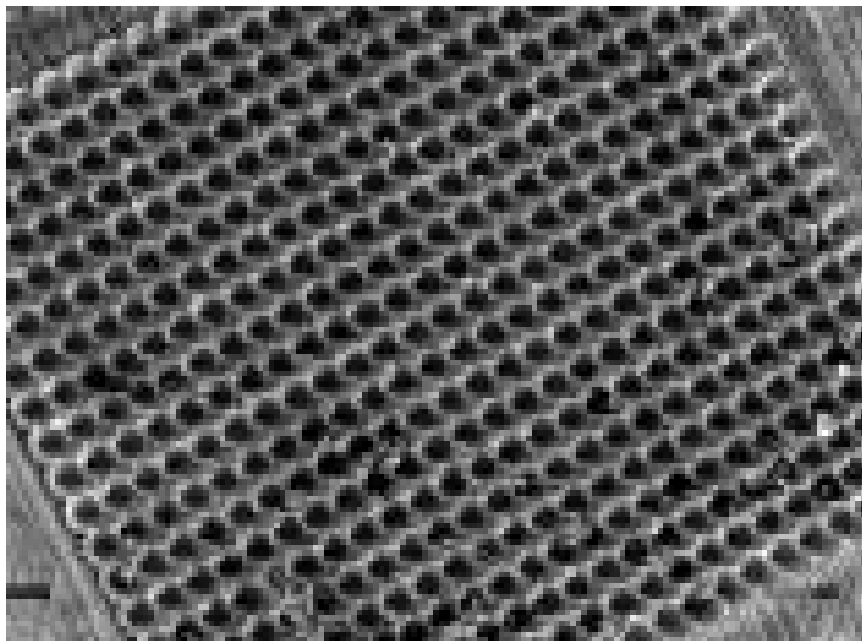
a) Κοιλότητες διαμέτρου 75 μ m και βάθους 200 μ m.

b) Στήλες διαμέτρου 75 μ m και ύψους 200 μ m

Στην ορθοπεδική οι υπάρχουσες τεχνικές τροποποίησης της επιφάνειας χρησιμοποιούνται με σκοπό την βελτίωση της πρόσφυσης των εμφυτευμάτων. Στις τεχνικές αυτές συχνά απαιτείται να προστεθεί το υλικό στο εμφύτευμα και ακολούθως να υπάρξει εφαρμογή θερμότητας. Όμως, η εφαρμογή θερμότητας μπορεί να μεταβάλλει το φυσικό μέγεθος του εμφυτεύματος, παράγοντας σημαντικός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Η διεργασία τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας με laser δεν απαιτεί εφαρμογή θερμότητας, ούτε είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί επιπλέον υλικό στην επιφάνεια του εμφυτεύματος. Η διεργασία αφαιρεί επιλεκτικά υλικό από την επιφάνεια χωρίς να αλλοιώνει τη χημεία ή το μέγεθος του εμφυτεύματος.

Στο σχήμα 6.5.2 βλέπουμε μία τροποποιημένη επιφάνεια από τιτάνιο.



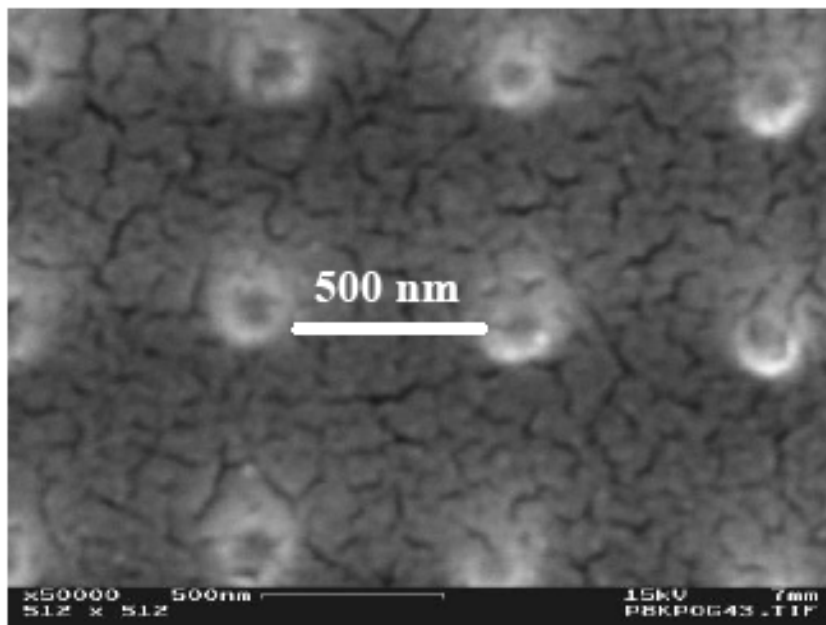
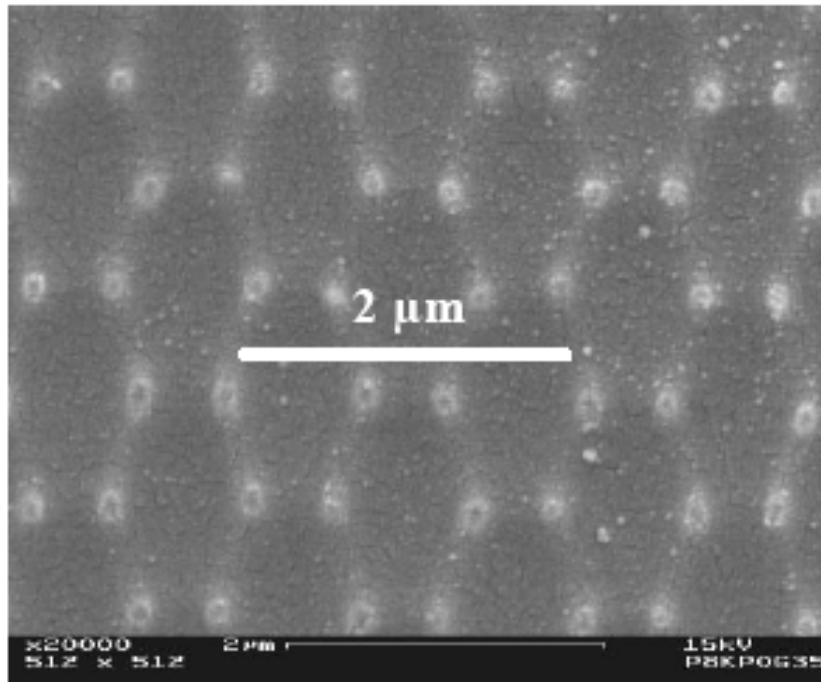
Σχήμα 6.5.2. Τροποποιημένη επιφάνεια Τιτανίου. Κοιλότητες διαμέτρου 100 μm και βάθους 100 μm

Σκοπός της διεργασίας είναι η δημιουργία κυκλικών κοιλοτήτων στο υλικό. Ο ρυθμός διεργασίας για τα χαρακτηριστικά και τη γεωμετρία αυτής της επιφάνειας είναι 120 mm^2/min .

Η τεχνολογία τροποποίησης της επιφάνειας παρέχει ευελιξία στον τύπο της κατασκευής που θα τοποθετηθεί στο εμφύτευμα. Για παράδειγμα, αν ορισμένες περιοχές του εμφυτεύματος απαιτούν μεγαλύτερες ή μικρότερες κοιλότητες, οι αλλαγές μπορούν εύκολα να τεθούν σε εφαρμογή μέσω του συστήματος του υπολογιστή. Η ευελιξία της διεργασίας, σε συνδυασμό με την φύση της μεθόδου που δεν περιλαμβάνει επαφή, μας επιτρέπει πλήρη αυτοματισμό. Η διεργασία μπορεί να γίνει πλήρως ελεγχόμενη από υπολογιστή ενώ γίνεται έρευνα ώστε να ενσωματωθεί η εφαρμογή οργάνων παρακολούθησης οι οποίες θα επιτρέπουν μία συνεχή παρακολούθηση κατά τη διεργασία.

6.6. Δημιουργία Επιφανειακού Ιστού Υπομικροσκοπικής Κλίμακας σε στερεά υλικά με χρήση Παλμικού Laser Υπεριώδους Ακτινοβολίας.

Παρουσιάζεται η τροποποίηση συμπαγών υλικών με τη χρήση υπομικροσκοπικής κλίμακας παλμών laser. Ο συνδυασμός διαθλαστικής οπτικής μάσκας με συμβατικά συστήματα απεικόνισης επιτρέπει τη δημιουργία στοιχείων μικροσκοπικής κλίμακας σε όλους τους τύπους των υλικών συμπεριλαμβανομένων μετάλλων, ημιαγωγών και διηλεκτρικών. Με αυτό το συνδυασμό λαμβάνονται σε αρκετά μεγάλα τμήματα επιφανειών ενός υλικού, εξαιρετικής ποιότητας δισδιάστατες επιφανειακές περιοδικές κατασκευές.



Σχήμα 6.6.1 Εικόνα μιας επιφανειακής κατασκευής.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι μία πειραματική τεχνική που τέθηκε σε εφαρμογή η οποία βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση για βελτιστοποίηση του σχήματος και του βάθους των κατασκευών κατά τη διάρκεια της δημιουργίας της επιφανειακής κατασκευής. Επιθυμητή είναι η επέκταση της τεχνικής αυτής σε διαφανή στερεά σώματα και η δημιουργία στην επιφάνεια διάφορων διαφανών υλικών, στοιχείων μεγέθους μικρότερο από 200nm. Επίσης ερευνάται εάν είναι δυνατή η χρήση πολυφωτονικής απορρόφησης με σκοπό τη δημιουργία νανο-μετρικής κλίμακας στοιχείων στο εσωτερικό μεταλλευμάτων όπως του χαλαζία και του ζαφειριού.

Η ακτινοβολία εφαρμόζεται με χρήση ενός συστήματος laser υπεριώδους ακτινοβολίας βασιζόμενο σε μία Ti:Sapphire-Excimer υβριδική συσκευή η οποία μπορεί να παράγει 300 παλμούς υπομικροσκοπικής κλίμακας των 248 nm. Όταν η συσκευή λειτουργεί στα 300 Hz, που συνεπάγεται μέσο όρο παραγωγής ενέργειας των 10 W, αποφέρει υψηλής ταχύτητας μηχανικές επεξεργασίες, γεγονός που ανοίγει νέους ορίζοντες στις βιομηχανικές εφαρμογές.

Κεφάλαιο 7 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Η Τροποποίηση της Τραχύτητας της Επιφάνειας με laser (LST) είναι η βέλτιστη μέθοδος από όλες τις τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής. Η (LST) οδηγεί σε αύξηση της μηχανικής αντοχής της επιφάνειας καθώς και σε αύξηση της αντοχής σε φθορά. Το χαρακτηριστικό της είναι η δημιουργία κοιλοτήτων οι οποίες δρουν σαν συλλέκτες μικρο-ρωγμών και φθορών τόσο σε καταστάσεις πλήρους, όσο και σε καταστάσεις έλλειψης λίπανσης. Είναι μέθοδος εξαιρετικά γρήγορη, φιλική προς το περιβάλλον και υπάρχει πλήρης έλεγχος του σχήματος και του μεγέθους των κοιλοτήτων. Η χρήση του παλμικού laser επιτρέπει πλήρη έλεγχο και ακρίβεια στην τροποποίηση της επιφάνειας.

Μεταλλικά Μηχανικά εξαρτήματα των οποίων η επιφάνεια έχει τροποποιηθεί με χρήση Laser έχουν διάρκεια ζωής μέχρι και οκτώ φορές μεγαλύτερη όσον αφορά την αντοχή τους στην τριβή.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η εφαρμογή της LST στην τροποποίηση της επιφάνειας σκληρών δίσκων υπολογιστών καθώς είναι η μοναδική μέθοδος που είναι ικανή για να αυξάνει την πυκνότητα εγγραφής τους.

Ελέγχοντας την πυκνότητα της ενέργειας, το Laser μπορεί να τροποποιήσει χάλυβες, κεραμικά, πολυμερή, καθώς και γυαλιά.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η εφαρμογή της LST σε Εργαλειοχάλυβες. Με τη χρήση laser μπορούμε να δημιουργήσουμε καλά οριοθετημένους πόρους στην επιφάνειά τους οι οποίοι δρώντας ως μικρο-δεξαμενές λιπαντικών καθώς και σαν μικρο-συλλέκτες φθορών, αυξάνουν τη διάρκεια ζωής του εργαλείου και μειώνουν την απαιτούμενη ποσότητα του λιπαντικού. Οι πόροι αυτοί έχουν την λειτουργικότητα να μεταφέρουν και ακολούθως να εκβάλλουν το λιπαντικό στην κοινή επιφάνεια μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου μιας και δεν υπάρχει φυσικός μηχανισμός μέσω του οποίου το λιπαντικό να μπορεί να συγκρατηθεί κατά τη μορφοποίηση του μετάλλου. Έτσι, σε τροποποιημένα με laser δοκίμια έχουμε μία πιο ομαλή αύξηση της τριβής στη διάρκεια ζωής τους σε σχέση με μη τροποποιημένα, όπου ο συντελεστής τριβής, σε μικρό χρονικό διάστημα αυξάνεται ραγδαία.

Επίσης, όσον αφορά την εφαρμογή της LST σε εξαρτήματα Μηχανών Εσωτερικής Καύσης, τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά τόσο σε χιτώνια κυλίνδρων όσο και σε τριβείς. Ο Σχηματισμός μικρο-αυλακώσεων σε χιτώνια κυλίνδρων σε μηχανές εσωτερικής καύσεως έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί η κατανάλωση και η τριβή. Τριβέας τροποποιημένος με LST παρουσιάζει τρεις φορές μικρότερη τριβή σε σύγκριση με τριβέα μη τροποποιημένο, για πολύ μεγάλο εύρος φορτίων.

Όσον αφορά την εφαρμογή της LST σε εξαρτήματα αυτοκινητοβιομηχανίας, η τροποποίηση των δακτυλίων εμβόλου προσφέρει τη δυνατότητα κατακράτησης λιπαντικών, με αποτέλεσμα να προστατεύονται οι ολισθηρές επιφάνειες έναντι της εμπλοκής. Σε ζεύγη επίπεδων επιφανειών και δακτυλίου-χιτωνίου παρατηρήθηκε μείωση της τριβής της τάξης του 40% και 30% αντίστοιχα.

Σημαντική είναι η επίδραση της LST και σε στεγανωτικά. Στεγανωτικά των οποίων η επιφάνεια είχε τροποποιηθεί έδειξαν 40% μείωση της ροπής της τριβής και σχεδόν διπλασιασμό της διάρκειας ζωής τους. Το γεγονός αυτό επιτρέπει στα τροποποιημένα στεγανωτικά να λειτουργούν σε πιέσεις σημαντικά υψηλότερες των μη τροποποιημένων. Σε στεγανωτικά από καρβίδιο του πυριτίου η LST μειώνει σημαντικά τη ροπή και συνεπώς μπορεί να αυξήσει την ενεργειακή αποδοτικότητα ηλεκτρικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται σε αντλίες. Αν και υπάρχει το ενδεχόμενο στα τροποποιημένα σφραγιστικά να παρουσιαστεί μία μικρή αύξηση στη φθορά, αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με εφαρμογή επικαλυπτικών στρωμάτων

χαμηλής τριβής. Επιπλέον, όσο αυξάνεται η πίεση στο στεγανωτικό τόσο μεγαλώνει το όφελος από τη χρήση της LST.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εφαρμογή της LST στη βιομηχανία αποθήκευσης δεδομένων. Η LST βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στον καθαρισμό της επιφάνειας με laser καθώς και στην απομάκρυνση μικρο-σωματιδίων από τα μαγνητικά μέσα. Η μέθοδος καθαρισμού και απομάκρυνσης σωματιδίων είναι ιδιαίτερα ευεργετική για τη βιομηχανία σκληρών δίσκων καθώς αυξάνεται η πυκνότητα εγγραφής και ελαχιστοποιείται η πιθανότητα αστοχίας της συσκευής. Επίσης, η πλήρως ελεγχόμενη τραχύτητα της επιφάνειας μπορεί να μειώσει σημαντικά τη μικρο-στατική τριβή και τη φθορά.

Κατά την εφαρμογή LST σε επιφάνειες από Πυρίτιο, μπορούμε να αποφύγουμε τη μόλυνση καθώς και την καταστροφή του υποστρώματός του. Ανάλογα με την πυκνότητα ενέργειας του παλμού Laser μπορούμε να επιτύχουμε από ρηχή κοιλότητα μέχρι κοιλότητα διπλού χείλους, όσο αυτή αυξάνεται. Μεγαλύτερο στίγμα και εύρος παλμού οδηγούν σε μικρότερη μεταβολή στην τραχύτητα μεταξύ της κορυφής του χείλους και του βάθους του κεντρικού κρατήρα, για δεδομένη πυκνότητα ενέργειας.

Η εφαρμογή της LST σε κεραμικά όπως ζirkονία και καρβιδίο του πυριτίου, έδειξε ότι οι επιδράσεις της δεν είναι ξεκάθαρες και ότι χρειάζεται περαιτέρω έρευνα. Συγκεκριμένα, η μείωση της τριβής σε επαφές που υπάρχει παλινδρόμηση είναι δύσκολο να επιτευχθεί μέσω της εφαρμογής LST. Επίσης, αν οι επιφάνειες επαφής δεν είναι πλήρως ομαλοποιημένες και ευθυγραμμισμένες κατά την ολίσθηση δεν είναι δυνατό να γίνει αισθητή η επίδραση της LST στη μείωση της τριβής.

Κατά την τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας του γυαλιού, παρατηρούμε τις αλλαγές στη δομή του, οι οποίες δημιουργούνται σε ένα θερμικό κύκλο. Επίσης βλέπουμε τις κατανομές των τάσεων τόσο κατά τη θέρμανση όσο και κατά την ψύξη. Τέλος, μελετάται η εισαγωγή της LST τόσο στην τροποποίηση Ορθοπεδικών Εμφυτευμάτων, όσο και στη δημιουργία στοιχείων υπομικροσκοπικής κλίμακας σε μεγάλα τμήματα επιφανειών ενός υλικού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.

- [1] : L.G. Hector and S.Sheu, Focused Energy Beam Wrk Rollo Surface Texturing Science and Technology, Journal of Materials Processing and Manufacturing Science Vol.2, 1993, pp.63-117.
- [2] : A. Bragand J. Halleux, F. Terreux, and J. Defourny, Process for Making the Surface of a Rolling Mill Roll. 1989.
- [3] : A. Matsunawa and V. Semac, the Simulation of Front Keyhole Wall Dynamics During Laser Welding (1007), Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 30, pp. 798-809.
- [4] : V. Semac and A. Matsunawa, the Role of Recoil Pressure in Energy Balance During Laser Material Processing, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 30, 1997, 2541-2552.
- [5] : M. Von Almen, Laser Beam Interaction with Materials, 1987, (Heidelberg: Springer).
- [6] : R.V. Arutyunian, V.Yu Baranov, L.A. Bol'shov, V.A. Dolgov, D.D. Malyuta, V.S. Mezhenov, V.D. Pis'mennyi and V.V. Semac, Mechanism of Melt Removal by Short Laser Pulses, Sov. Physics Reports (Doklady Akademii Nauk SSSR), Vol. 31 (No. 8), 1986, pp 662-664.
- [7] : R.V. Arutyunian, V.Yu Baranov, L.A. Bol'shov, V.A. Dolgov, D.D. Malyuta, V.S. Mezhenov and V.V. Semac, Dynamics of molten Metal During Irradiation with Single CO₂ Laser Pulse, Sov. J. Quantum Electronics, Vol. 18(No 3), 1988, pp. 409-412.
- [8] : S.I. Anisimov, A.M Bonch-Bruevich, A.M. Elyashevich Ya.A. Imas, N.A Pavlenko, and G.S. Romanov, Effect of Powerfull Light Fluxes on Metals, sov.Phys. Tech. Phys., Vol. 11 (No7), 1967, pp 945-952.
- [9] : J.F. Ready, Effects of High Power Laser Radiation, (Academic Press, NY), 1971.
- [10] : S.I. Anisimov and V.A. Khokhlov, Instabilities in Laser-Matter Interaction, (Boca Raton, FI: CRC Press), 1995.
- [11] : R.Ranjan, D.N. Lambeth, M. Tromel, P. Goglia, and Y.Li, Laser Texturing for Low-Flying-Height Media, Journal of Applied Physics, Vol. 69(No8) 1991, pp.5745-5747.
- [12] : P. Baumgant, D.J. Krainovich, T.A. Nguen, and A.C. Tam, A New Laser Technique for High Performance Magnetic Disc Drives, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.31 (No5/Pt.1), pp.2946-2951.
- [13] : A.C. Tam, J. Brannon, P. Baumgant, and I.K. Pour, Laser Texturing of Glass Substrate, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.33, (No5/Pt.1),1997, pp.3181-3183.
- [14] : S.K. Chimakuri and B. Bhushdan, Optimization of Asperities for Laser Textured Magnetic Disc Surfaces, Tribology Transactions, Vol.40(No2), 1997 pp.303-311.
- [15] : K. Minamada, J. Suehiro, T. Toshimitu, and T. Kawamoto, Journal of Laser Applications,(No4), 1989, pp.15-20.
- [16] : L.G. Hector, Jr. and S. Seu, Brightness Enhancement with Textured Roll, (1991) US Patent#4,996,113.
- [17] : S. Seu and L.G. Hector, Jr., Method of Providing Textures on Material by Rolling,(1991), US Patent#5,025,547.
- [18] : A.J. Pedraza, M.J. Godbole, E.A. Keinik, D.H. Lowndes, and J.R. Thompson, Laser Enhanced Adhesion of Copper Films to Sapphire Substrates, Journal of Vacuum Science Technology, Vol.A6 (No3), 1988, 1763-67.

- [19] : G. Kinsman and W.W. Duley, Treatment of Metal Surfaces with Excimer Laser Radiation for Radiative Applications, Applied Optics, Vol.32(No36) 1993, pp.7462-7470.
- [20] : I. Ursu, I.N. Michailescu, A.Popa, A.M. Prokhorov, V.P. Ageev, A.A. Gorbunov, and V.I. Konov, Studies of the Change of a Metallic Surface Microrelief as a Result of Multiple-Pulse Action of Powerful UV Laser Pulses, Journal of Applied Physics, Vol.58, 1985, pp.3909-3913.
- [21] : A.S.Brandsen, A.H.P.C. Megaw, P.H. Backwill, and C.Westcott, Metal Surface Treatment and Reduction in Pitting Corrosion of 304L Stainless Steel by Excimer Laser, Journal of Modern Optics, Vol.37, 1990, pp.813-828.
- [22] : T. Iida and R.I.L. Guthrie, The Physical Properties of Liquid Metals, (Clarendon Press: Oxford).
- [23] : A.J. Russo, R.L. Akau and J.L. Jellison, Thermocapillary Flow in Pulsed Laser Beam Weld Pools, Welding Journal, (Welding Research Suppl.), Vol.69 1990, pp.23-29.
- [24] : Private communication between V.V. Semac and S.I. Anisimov, Landay Institute for Theoretical Physics, Chernogolovka, Mosc.reg., Russia.
- [25] : V.V. Semac, J.A. Hopkins, M.H. McCay, T.D. McCay, Weld Pool Oscillations in Laser Spot Welding, Proceeding of ICALEO'95, San Diego, CA Nov.1995, pp.739-748.
- [26] : D.Keefer, R. Welle, and C.Peters, Power Absorption in Laser Sustained Argon Plasmas, AIAA Journal, Vol.24 (No10), 1986, pp.1663-1669.
- [27] : V.N. Anishimov, R.V. Arutyunian, L.A. Bol'shov, O.N. Derkach, M.F. Kanevskii, D.D. Malyuta, A.Yu Sebrant, and A.I. Yudin, Nonstationary Absorption and Refraction of Laser Emission in Plasma of Low Threshold Optical Breakdown, Sov. Tech. Phys. Vol. 59 (No1), 1989, pp.72-79.
- [28] : E.V. Evstratov, M.F. Kanevskii, A.M. Kovalerich, and Y.Y. Stepanov, An Evolution of Plasma Produced upon Exposure of a Metal Surface to the XeCl Laser Radiation, Sov. Quant. El., Vol.15 (No3), 1988, pp.557-559.
- [29] : V. Yu. Baranov, V.A. Dolgov, M.F. Kanevskii, D.D. Malyuta, V.S. Mezhevov, V.V. Semac, Space-Time Distribution of CO₂ Laser Irradiation on the Surface of a Target in the Presence of an Optical Breakdown Plasma, Sov. J. Quantum Electronics, Vol.20(No3), 1990, pp.296-300.
- [30] : V.I.Motorin and S.L. Musher, Stability of Liquefaction Front in Fast Joule Heating, Sov. Physics. Tech Physics, Vol.27 1982, pp.726-728.
- [31] : V. Semac, X. Chen, K. Mundra, and J. Zhao, Numerical Simulation of Hole Profile in High Beam Intensity Laser Drilling, Proceedings of ICALEO'97, (LIA: Orlando, FL) to be published.
- [32] : J. J. Liu, L. Li, and K. E. Johnson, IEEE Transactions on Magnetics 36, 125-32 (2000).
- [33] : Z. Wang, H. Suzuki, T. Takahashi, K. Nishimori, M. Wu, and J. Horikawa, IEEE Transactions on Magnetics 35, 968-71 (1999).
- [34] : J. Brannon, R. White, A. C. Tam, and P. Baumgart, IEEE Transactions on Magnetics 34, 1789-91 (1998).
- [35] : G. C. Rauch, J. J. Liu, S. Y. Lee, I. Boszormenyi, G. Chuan, G. Jing, D. Kuo, B. Marchon, S. Vierk, and R. Malmhall, IEEE Transactions on Magnetics 32, 3642-7 (1996).
- [36] : T. D. Bennett, D. J. Krajnovich, and L. Li, Journal of Applied Physics 85, 153-9 (1999).
- [37] : T. D. Bennett, D. J. Krajnovich, L. Li, and D. Wan, Journal of Applied Physics 84 (1998).

- [38] : L. Li and T. D. Bennett, *Journal of Heat Transfer*, in press
- [39] : E. Teng, W. Goh, and A. Eltoughky, *IEEE Transactions on Magnetics* 32, 3759-61 (1996).
- [40] : D. Kuo, J. Gui, B. Marchon, S. Lee, I. Boszormenyi, J. J. Liu, G. C. Rauch, S. Vierk, and D. Meyer, *IEEE Transactions on Magnetics* 32, 3753-8 (1996).
- [41] : A. C. Tam, J. Brannon, P. Baumgart, and I. K. Pour, *IEEE Transactions on Magnetics* 33, 3181-3 (1997).
- [42] : S. Ting-Ruei, C. P. Grigoropoulos, D. G. Cahill, and R. Greif, *Journal of Applied Physics* 86, 1311-16 (1999).
- [43] : K. Saito, H. Kakiuchida, and A. J. Ikushima, *Journal of Applied Physics* 84, 3107-12 (1998).
- [44] : A. Chmel, T. Pesina, and V. S. Shashkin, *Journal of Non-Crystalline Solids* 210, 254-60 (1997).
- [45] : R. V. Chamberlin, *Physical Review B (Condensed Matter)* 48, 15638-45 (1993).
- [46] : M. Goldstein, R. Simha, and New York Academy of Sciences, *The glass transition and the nature of the glassy state* (New York Academy of Sciences, New York, 1976).
- [47] : O. Alejos, C. de Francisco, P. Hernandez, K. Bendimya, and J. M. Munoz, *Applied Physics A (Materials Science Processing)* A63, 471-4 (1996).
- [48] : G. O. Jones, *Glass*, 2nd ed. (Chapman and Hall, New York, 1971).
- [49] : J. Chakrabarty, *Theory of plasticity* (McGraw-Hill, New York, 1987).
- [50] : D. R. J. Owen and E. Hinton, *Finite elements in plasticity : theory and practice* (Pineridge Press, Swansea, 1986).
- [51] : A. D. McLachlan and F. P. Meyer, *Applied Optics* 26, 1728-31 (1987).
- [52] : N. P. Bansal and R. H. Doremus, *Handbook of glass properties* (Academic Press, Orlando, 1986).
- [53] : Jeng, Y. R., 1996, "Impact of Plateaued Surfaces on Tribological Performance," *Tribol. Trans.*, 39~2!, pp. 354–361.
- [54] : Willis, E., 1986, "Surface Finish in Relation to Cylinder Liners," *Wear*, 109, pp. 351–366.
- [55] : Ranjan, R., Lambeth, D. N., Tromel, M., Goglia, P., and Li, Y., 1991, "Laser Texturing for Low-Flying-Height Media," *J. Appl. Phys.*, 69~8!, pp. 5745– 5747.
- [56] : Zhou, L., Kato, K., Vurens, G., and Talke, F. E., 2003, "The Effect of Slider Surface Texture on Flyability and Lubricant Migration under Near Contact Conditions," *Tribol. Int.*, 36~4-6!, pp. 269–277.
- [57] : Komvopoulos, K., 2003, "Adhesion and Friction Forces in Microelectromechanical Systems: Mechanisms, Measurement, Surface Modification Techniques, and Adhesion Theory," *J. Adhes. Sci. Technol.*, 17~4!, pp. 477–517.
- [58] : Hamilton, D. B., Walowit, J. A., and Allen, C. M., 1966, "A Theory of Lubrication by Microasperities," *ASME J. Basic Eng.*, 88~1!, pp. 177–185.
- [59] : Anno, J. N., Walowit, J. A., and Allen, C. M., 1968, "Microasperity Lubrication," *ASME J. Lubr. Technol.*, 90~2!, pp. 351–355.
- [60] : Anno, J. N., Walowit, J. A., and Allen, C. M., 1969, "Load Support and Leakage from Microasperity-Lubricated Face Seals," *ASME J. Lubr. Technol.*, 91~4!, pp. 726–731.
- [61] : Etsion, I., and Burstein, L., 1996, "A Model for Mechanical Seals with Regular Microsurface Structure," *Tribol. Trans.*, 39~3!, pp. 677–683.
- [62] : Etsion, I., Halperin G., and Greenberg, Y., 1997, "Increasing Mechanical Seal Life with Laser-Textured Seal Faces," 15th International Conference On Fluid Sealing BHR Group, Maastricht, pp. 3–11.

- [63] : Schneider, Y. G., 1984, "Formation of Surfaces with Uniform Micropatterns on Precision Machine and Instrument Parts," *Precis. Eng.*, 6, pp. 219–225.
- [64] : Bulatov, V. P., Krasny, V. A., and Schneider, Y. G., 1997, "Basics of Machining Methods to Yield Wear and Fretting Resistive Surfaces, Having Regular Roughness Patterns," *Wear*, 208, pp. 132–137.
- [65] : Saka, A., Lio, M. J., and Suh, N. P., 1984, "The Role of Tribology in Electrical Contact Phenomena," *Wear*, 100, pp. 77–105.
- [66] : Saka, N., Tian, H., and Suh, N. P., 1989, "Boundary Lubrication of Undulated Metal Surfaces at Elevated Temperatures," *Tribol. Trans.*, 32~3!, pp. 389–385.
- [67] : Tian, H., Saka, N., and Suh, N. P., 1989, "Boundary Lubrication Studies on Undulated Titanium Surfaces," *Tribol. Trans.*, 32~3!, pp. 289–296.
- [68] : Suh, N. P., Mosleh, M., and Howard, P. S., 1994, "Control of Friction," *Wear*, 175, pp. 151–158.
- [69] : Mosleh, M., Laube, S. J. P., and Suh, N. P., 1999, "Friction of Undulated Surfaces Coated with MoS₂ by Pulsed Laser Deposition," *Tribol. Trans.*, 42~3!, pp. 495–502.
- [70] : Wang, X., Kato, K., and Adachi, K., 2002, "The Lubrication Effect of Micro-Pits on Parallel Sliding Faces of SiC in Water," *Tribol. Trans.*, 45~3!, pp. 294–301.
- [71] : Wang, X., and Kato, K., 2003, "Improving The Anti-Seizure Ability of SiC Seal in Water with RIE Texturing," *Tribol. Lett.*, 14~4!, pp. 275–280.
- [72] : Wang, X., Kato, K., Adachi, K., and Aizawa, K., 2003, "Loads Carrying Capacity Map for The Surface Texture Design of SiC Thrust Bearing Sliding in Water," *Tribol. Int.*, 36~3!, pp. 189–197.
- [73] : Wakuda, M., Yamauchi, Y., Kanzaki, S., and Yasuda, Y., 2003, "Effect of Surface Texturing on Friction Reduction Between Ceramic and Steel Materials under Lubricated Sliding Contact," *Wear*, 254, pp. 356–363.
- [74] : Stephens, L. S., Siripuram, R., Hyden, M., and McCartt, B., 2004, "Deterministic Micro Asperities on Bearings and Seals Using a Modified LIGA Process," *J. Eng. Gas Turbines Power*, 126~1!, pp. 147–154.
- [75] : Pettersson, U., and Jacobson, S., 2003, "Influence of Surface Texture on Boundary Lubricated Sliding Contacts," *Tribol. Int.*, 36~11!, pp. 857–864.
- [76] : Geiger, M., Roth, S., and Becker, W., 1998, "Influence of Laser-Produced Microstructures on the Tribological Behavior of Ceramics," *Surf. Coat. Technol.*, 100-101, pp. 17–22.
- [77] : Geiger, M., Popp, U., and Engel, U., 2002, "Eximer Laser Micro Texturing of Cold Forging Tool Surface-Influence on Tool Life," *Ann. CIRP*, 51, pp. 231–234.
- [78] : Hoppermann, A., and Kordt, M., 2002, "Tribological Optimisation Using Laser-Structured Contact Surfaces," *O1P "Oelhydraulik und Pneumatik"*, 46~4!, Vereinigte Fachverlage Mainz, ISSN 0341-2660.
- [79] : Wang, X., Kato, K., Adachi, K., and Aizawa, K., 2001, "The Effect of Laser Texturing of SiC Surface on the Critical Load for the Transition of Water Lubrication Mode from Hydrodynamic to Mixed," *Tribol. Int.*, 34~10!, pp. 703–711.
- [80] : Kononenko, T. V., Garnov, S. V., Pimenov, S. M., Konov, V. I., Romano, V., Borsos, B., and Weber, H. P., 2000, "Laser Ablation and Micropatterning of Thin TiN Coatings," *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.*, 71, pp. 627–631.
- [81] : Dumitru, G., Romano, V., Weber, H. P., Haefke, H., Gerbig, Y., and Pflüger, E., 2000, "Laser Microstructuring of Steel Surfaces for Tribological Applications," *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.*, 70, pp. 485–487.
- [82] : Dumitru, G., Romano, V., Weber, H. P., Sentis, M., and Marine, W., 2002,

- “Femtosecond Ablation of Ultrahard Materials,” *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.*, 74, pp. 729–739.
- [83] : Dumitru, G., Romano, V., Weber, H. P., Pimenov, S., Kononenko, T., Hermann, J., Bruneau, S., Gerbig, Y., and Shupegin, M., 2003, “Laser Treatment of Tribological DLC Films,” *Diamond Relat. Mater.*, 12, pp. 1034–1040.
- [84] : Dumitru, G., Romano, V., Weber, H. P., Sentis, M., and Marine, W., 2003, “Ablation of Carbide Materials with Femtosecond Pulses,” *Appl. Surf. Sci.*, 205, pp. 80–85.
- [85] : Kovalchenko, A., Ajayi, O., Erdemir, A., Fenske, G., and Etsion, I., 2004, “The Effect of Laser Texturing of Steel Surfaces and Speed-Load Parameters on the Transition of Lubrication Regime from Boundary to Hydrodynamic,” *Tribol. Trans.*, 47~2!, pp. 299–307.
- [86] : Etsion, I., 2000, “Improving Tribological Performance of Mechanical Seals by Laser Surface Texturing,” *Proceedings of the 17th International Pump Users Symposium*, pp. 17–22.
- [87] : Etsion, I., 2000, “Improving Tribological Performance of Mechanical Seals by Laser Surface Texturing,” *Proceedings of the 17th International Pump Users Symposium*, pp. 17–22.
- [88] : Yu, X. Q., He, S., and Cai, R. L., 2002, “Frictional Characteristics of Mechanical Seals with a Laser-Textured Seal Face,” *J. Mater. Process. Technol.*, 129, pp. 463–466.
- [89] : Etsion, I., and Halperin, G., 2002, “A Laser Surface Textured Hydrostatic Mechanical Seal,” *Tribol. Trans.*, 45~3!, pp. 430–434.
- [90] : Pride, S., Folkert, K., Guichelaar, P., and Etsion, I., 2002, “Effect of Micro Surface Texturing on Breakaway Torque and Blister Formation on Carbon- Graphite Faces in a Mechanical Seal,” *Lubr. Eng.*, 58, pp. 16–21.
- [91] : Kligerman, Y., and Etsion, I., 2001, “Analysis of the Hydrodynamic Effects in a Surface Textured Circumferential Gas Seal,” *Tribol. Trans.*, 44~3!, pp. 472– 478.
- [92] : McNikel, A., and Etsion, I., 2004, “Near-Contact Laser Surface Textured Dry Gas Seals,” *ASME J. Tribol.* 126~4!, pp. 788–794.
- [93] : Ronen, A., Etsion, I., and Kligerman, Y., 2001, “Friction-Reducing Surface Texturing in Reciprocating Automotive Components,” *Tribol. Trans.*, 44~3!, pp. 359–366.
- [94] : Ryk, G., Kligerman, Y., and Etsion, I., 2002, “Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components,” *Tribol. Trans.*, 45~4!, pp. 444–449.
- [95] : Golloch, R., Merker, G. P., Kessen, U., and Brinkmann, S., 2004, “Benefits of Laser-Structured Cylinder Liners for Internal Combustion Engines,” in *Proceedings of the 14th International Colloquium Tribology*, January 13–15 Esslingen, pp. 321–328.
- [96] : Gehring GmbH & Co. KG, URL [http://www. Gehring.de](http://www.Gehring.de)
- [97] : Brizmer, V., Kligerman, Y., and Etsion, I., 2003, “A Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearing,” *Tribol. Trans.*, 46~3!, pp. 397–403.
- [98] : Etsion, I., Halperin, G., Brizmer, V., and Kligerman, Y., 2004, “Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings,” *Tribol. Lett.*, 17~2!, pp. 295–300.
- [99] : Lo, S. W., and Wilson, W. R. D., 1999, “A Theoretical Model of Micro-Pool Lubrication in Metal Forming,” *J. Tribol.*, 121~4!, pp. 731–738.
- [100] : Varenberg, M., Halperin, G., and Etsion, I., 2002, “Different Aspects of the Role of Wear Debris in Fretting Wear,” *Wear*, 252, pp. 902–910.

- [101] : Volchok, A., Halperin, G., and Etsion, I., 2002, "The Effect of Surface Regular Micro-Topography on Fretting Fatigue Life," *Wear*, 253, pp. 509–515.
- [102] : Tonder, K., 2004, "Hydrodynamic Effects of Tailored Inlet Roughness: Extended Theory," *Tribol. Int.*, 37, pp. 137–142.
- [103] : Siripuram, R. B., and Stephens, L. S., 2004, "Effect of Deterministic Asperity Geometry on Hydrodynamic Lubrication," *J. Tribol.*, 126~3!, pp. 527–534.
- [104] : Dumitru, G., Romano, V., Weber, H. P., Gerbig, Y., Haefke, H., Bruneau, S., Hermann, J., and Sentis, M., 2004, "Femtosecond Laser Ablation of Cemented Carbides: Properties and Tribological Applications," *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.*, 79, pp. 629–632.
- [105] : Surface Technologies Ltd. URL <http://surface-tech.com>
- [106] : L. Chefneux, Y. Renauld, B. Dauby, D. Bouquegneau, and M. Gerday, Ten Years of Laser Texturing in Cockerill Sambre, Proceedings of METEC Congress'94 : 2nd European Continuous Casting Conference, 6th International Rolling Conference 1994, Dusseldorf: Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Germany), pp.356-362.
- [107] : Y. Yamada, M. Saito, S. Ujihara, and M. Nagaoka, Development of High Image Clarity Steel Sheet Laser Mirror, Mechanical Working and Steel Processing XXVIII: Proceedings of 32nd Mechanical Working and Steel Processing Conference, (Cincinnati, OH), 1990, pp.259-265.
- [108] : F. Terreur, Device for modulating a Laser Beam. US Patent #4917962, 1990.
- [109] : M. Imanaka, T. Fujiwara, T. Furubayashi, T. Obara, K. Tunoyama, and K. Furikawa, Development of High Image Clarity Steel Sheet by Application of Laser Texturing, Proceedings of International Deep Drawing Research Group, 15th Congress, (ASM International: Metals Park, OH, 1988, pp.109-116.
- [110] : M. Imanaka, T. Kato, O. Hashimoto, Y. Hishida, and Shin Ujihara, Development of Laser- Textured Dull Steel Sheets with Superior Press Formability, Sheet Metal and Stamping Symposium, 1993 : Detroit, MI, (Warrendale, PA), 1993, pp.231-239
- [111] : D.A. Scott, M. Brandt, B. Dorien-Brown, B. Valentine, and P.De, Laser Modification of Metal Surfaces, Optics and Lasers in Engineering, Vol.18, 1993, pp.1-13.
- [112] : R. Ranjan, D. N. Lambeth, M. Tromel, P. Goglia, and Y. Li, Laser Texturing for Low-Flying-Height Media, *Journal of Applied Physics*, Vol.69 (No8) 1991, pp.5745-5747.
- [113] : A.J. Pedraza, M.J. Godbole, E.A. Keinik, D.H. Lowndes, and J.R. Thompson, Laser Enhanced Adhesion of Copper Films to Sapphire Substrates, *Journal of Vacuum Science Technology*, Vol.A6 (No3), 1988, 1763-67.]
- [114] : G. Kinsman and W.W. Duley, Treatment of Metal Surfaces with Excimer Laser Radiation for Radiative Applications, *Applied Optics*, Vol.32 (No36) 1993, pp.7462-7470.
- [115] : I. Ursu, I.N. Michailescu, A. Popa, A.M. Prokhorov, V.P. Ageev, A.A. Gorbunov and V.I. Konov, Studies of the Change of Metallic Surface Microrelief as a Result of Multiple-Pulse Action of Powerful UV Laser Pulses, *Journal of Applied Physics*, Vol. 58, 1985, pp.3909-3913.
- [116] : W.W. Duley, *UV Lasers : Effects and Applications in Material Science*, (Cambridge University Press).
- [117] : A.S. Bransden, A.H.P.C. Megaw, P.H. Backwill, and C. Westcott, Metal Surface Treatment and Reduction in Pitting Corrosion of 304L Stainless Steel by Excimer Laser, *Journal of Modern Optics*, Vol.37, 1990, pp813-828.

- [118]: V.P. Ageev, L.L. Builov, V.I. Konov, A.V. Kuzmichev, S.M. Pimenov, A.M. Prokhorov, V.G. Ral'chenko, B.V. Spitsyn and B.I. Chapliev, Interaction of Laser Light with Diamond Films, *Sov. Phys.-Doklady*, Vol.33(No11), 1988, pp.840-842.
- [119]: P.A. Temple, W.H. Lowdermilk, and D.Milam, Carbon dioxide Laser Polishing of Fused Silica Surfaces for Increased Laser-Damage Resistance at 1064 nm, *Applied Optics*, Vol. 21(No18), 1982, pp.3240-3255.
- [120]: X. Wang, K. Kato, K. Adachi, and K. Aizawa, "The Effect of Laser Texturing of SiC on the Critical Load for the Transition of Water Lubrication Mode from Hydrodynamic to Mixed," *Tribology International*, , 703–711 (2001).
- [121]: R. Stribeck, "Die Wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager," *Z. Verein. Deut. Ing.*, (38), 1341–1348 (1902).
- [122]: K. Kato, "Water Lubrication of Textured Silicon Carbide," presented at the Conference on Boundary Lubrication for Transportation, Copper Mountain, CO, August 3–8, 2003. To be published in the proceedings.
- [123]: Hoshi, M., (1984), "Reducing Friction Losses in Automobile Engines," *Trib. Int.*, 17, 4, pp 185-189.
- [124]: Knoll, G. D and Peeken, H. J, (1982), "Hydrodynamic Lubrication of Piston Skirts," *Trans. ASME Jour. Lubr. Tech.*, 104, 4, pp 504-509.
- [125]: Hoshi, M. and Baba, Y., (1987), "A Study of Piston Friction Force in an Internal Combustion Engine," *ASLE Trans.*, 30, 4, pp 444-451
- [126]: Takiguchi, M., Machida, K. and Furuham, S., (1988), "Piston Friction Force of A Small High Speed Gasoline Engine," *Trans. ASME Jour. of Trib.*, 110, 1, pp 112-118.
- [127]: Sanda, S. and Someya, T., (1987), "The Effect of Surface Roughness on Lubrication Between a Piston Ring and a Cylinder Liner," in *Proc. IMechE, Int. Conf. Trib.*, London, 1, C 223/87, pp 135-143.
- [128]: Richez, M. F., Constants, B. and Winqvist, K., (1983), "Theoretical and Experimental Study of Ring-Liner Friction Force," in *Proc. of 9th Leeds-Lyon Symp. on Trib.*, Trib. of Reciprocating Engines, Dowson, D., Taylor, C. M., Godet, M. and Berthe, D., eds., Butterworths, Leeds, pp 122-131,
- [129]: Nakada, M., (1994), "Trends in Engine Technology and Tribology," *Trib. Int.*, 27, 1, pp 3-8.
- [130]: Ting, L. L., (1993), "Development of a Reciprocating Test Rig for Tribological Studies of Piston Engine Moving Components – Part I: Rig Design and Piston Ring Friction Coefficients Measuring Method," *SAE Trans., Jour. of Fuels and Lubricants*, Section 4, 102, 930685, pp 462-469.
- [131]: Dearlove, J. and Cheng, W. K., (1995), "Simultaneous Piston Ring Friction and Oil Thickness Measurements in a Reciprocating Test Rig," *SAE Trans., Jour. Of Fuels & Lubricants*, Section 4, 104, 952470, pp 1452-1462.
- [132]: Etsion, I., Kligerman, Y. and Halperin, G., (1999), "Analytical and Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal Faces," *Trib. Trans.*, 42, 3, pp 511-516.
- [133]: Kligerman, Y. and Etsion, I., (2001), "Analysis of the Hydrodynamic Effects in a Surface Textured Circumferential Gas Seals," *Trib. Trans.*, 44, 3, pp 472-478.
- [134]: Wang, X., Kato, K., Adachi, K. and Aizawa K., (2001), "The Effect of Laser Texturing of SiC Surface on the Critical Load for the Transition of Water Lubrication Mode from Hydrodynamic to Mixed," *Trib. Int.*, 34, 10, pp 703-711.
- [135]: Ronen, A., Etsion, I. and Kligerman, Y., (2001), "Friction-Reducing Surface-Texturing in Reciprocating Automotive Components," *Trib. Trans.*, 44, 3, pp 359-366.

- [136]: Etsion, I., Halperin, G. and Ryk, G., (2000), "Improving Tribological Performance of Mechanical Components by Laser Surface Texturing," Jour. Of the Balkan Tribological Association, 6, pp 72-77,
- [137]: McGeehan, J. A., (1980), "A Survey of the Mechanical Design Factors Affecting Engine Oil Consumption," SAE Paper 790864, pp 2942-2976.
- [138]: Furuhashi, S., Hyuga, T., Takigushi, M. and Serizawa, S., (1991), "A Study of Decrease Oil Consumption for NSOR - Two - Ring Package Piston," SAE Paper 910435, pp 622-630.
- [139]: Ronen, A., Kligerman, Y., Ryk, G. and Etsion, I., (2000), "Improving Tribological Properties of Automotive Mechanical Components by Laser Surface Texturing," in Proc. of the 2000 Global Powertrain Congress, 16, Roessler, D. M., ed., GMC, Detroit, pp 54-61.
- [140]: S. Kataoka, K. Kanno and J. Kihara, J. JSTP 29 (1988) 368-373.
- [141]: Z. Wang, K. Kondo and T. Mori, ASME Journal of Engineering for Industry 117 (1995) 351-356.
- [142]: K. Steinhoff, W. Rasp and O. Pawelski, Tribologie + Schmierungstechnik, 45 (1998) 31-36.
- [143]: H.K. Tönshoff, D. Hesse and J. Mommsen, Annals of the CIRP 42 (1993) 247-251.
- [144]: J. Arnold, G. Müller, H. Schneider, H.K. Müller, and H. Hürgerl, Laser Optoelektronik 25 (1993) 66-70.
- [145]: M. Geiger, S. Roth and W. Becker, Surf. Coatings Technology 100-101 (1998) 17-22.
- [146]: T. Neudecker, C. Hinsel and U. Engel, Paper presented at the Symposium on Computational and Experimental Methods in Mechanical and Thermal Engineering, 07 May 1998, Gent (Belgium).
- [147]: G. Dumitru, V. Romano, H.P. Weber, H. Haefke, Y. Gerbig and E. Pflüger, Appl. Phys. A 70 (2000) 485- 487.
- [148]: S. Nolte, C. Momma, C.N. Chichkov and H. Welling, Phys. Bl. 55 (1999) 41
- [149]: Cheng, H. S., Chow, C. Y. and Wilcock, D. F., (1968), "Behavior of Hydrostatic and Hydrodynamic Noncontacting Face Seals," Trans. ASME Jour. Lubr. Tech., 90, pp 510-519.
- [150]: Adams, M. L. and Colsher, R. J., (1969), "An Analysis of Self-Energized Hydrostatic Shaft Seals," Trans. ASME Jour. Lubr. Tech., 91, pp 658-667.
- [151]: Lipshitz, A. and Etsion, I., (1978), "A Modified Face Seal for Positive Film Stiffness," ASLE Trans., 21, pp 356-360.
- [152]: Etsion I., (1978), "Nonaxisymmetric Incompressible Hydrostatic Pressure Effects in Radial Face Seals," Trans. ASME Jour. Lubr. Tech., 100 pp379-385
- [153]: Metcalfe, R., (1978), "Predicted Effects of Sealing Gap Convergence on Performance of Plain End Face Seals," ASLE Trans., 21, pp 134-142.
- [154]: Etsion, I. And Sharoni, A., (1980), "Performance of End-Face Seals with Diametral Tilt and Coning – Hydrostatic Effects," ASLE Trans., 23, pp 279-288.
- [155]: Doust, T. G. and Parmar, A., (1986), "Hydrostatic Effects in a Mechanical Face Seal," ASLE Trans., 29, pp 467-462.
- [156]: Lebeck, A. O., (1988), "Contacting Mechanical Seal Design Using a Simplified Hydrostatic Model," Trib. Int., 21, pp 2-14.
- [157]: Harp, S. R. and Salant, R. F., (1998), "Analysis of Mechanical Seal Behavior During Transient Operation," Trans. ASME Jour. Trib., 120, pp 191-197.
- [158]: Divakar, R., (1994), "Sintered Silicon Carbides with Controlled Porosity for Mechanical Face Seal Applications," Lubr. Eng., 50, pp 75-80.

- [159]: Etsion, I. and Michael, O., (1994), "Enhancing Sealing and Dynamic Performance with Partially Porous Mechanical Face Seals," Trib. Trans., 37, pp 701-710.
- [160]: Etsion, I., Kligerman, Y. and Halperin, G., (1999), "Analytical and Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal Faces," Trib. Trans., 42, pp 511-516.
- [161]: Etsion, I., (2000), "Improving Tribological Performance of Mechanical Seals by Laser Surface Texturing," in Proc. 17th Int. Pump Users Symp., pp 17-22.
- [162]: Wang, X., Kato, K., Adachi, K. and Aizawa, K., (2001), "The Effect of Laser Texturing of SiC Surface on the Critical Load for the Transition of Water Lubrication Mode from Hydrodynamic to Mixed," Trib. Int., 34, pp 703-711.
- [163]: Kligerman, Y. and Etsion, I., (2001), "Analysis of the Hydrodynamic Effects in a Surface Textured Circumferential Gas Seal," Trib. Trans., 44, pp 472-478.
- [164]: K. L. Mittal: in Particles on Surfaces, Vol. 1 (Plenum Press, New York, 1988), p. 3.
- [165]: K. L. Mittal: in Particles on Surfaces (Marcel Dekker, New York, 1995), p. 1, 405.
- [166]: W. Zapka, W. Ziemlich, and A. C. Tam: Appl. Phys. Lett. 58, 2217 (1991).
- [167]: K. Imen, S. J. Lee, and S. D. Allen: Appl. Phys. Lett. 58, 203 (1991).
- [168]: A. C. Tam, W. P. Leung, W. Zapka, and W. Ziemlich: J. Appl. Phys. 71, 3515 (1992).
- [169]: J. D. Kelley and F. E. Hovis: Microelectron. Eng. 20, 159 (1993).
- [170]: Y. F. Lu, M. Takai, S. Komuro, T. Shiokawa, and Y. Aoyagi: Appl. Phys. A 59, 281 (1994).
- [171]: H. K. Park, C. P. Grigoropoulos, W. P. Leung, and A. C. Tam: IEEE Trans. Comp. Packaging, Manuf. Technol. A 17, 631 (1994).
- [172]: Y. F. Lu, W. D. Song, M. H. Hong, B. S. Teo, T. C. Chong, and T. S. Low: J. Appl. Phys. 80, 499 (1996).
- [173]: K. Mann, B. Wolff-Rottke, and F. Muller: Appl. Surf. Sci. 98, 463 (1996).
- [174]: R. Oltra, O. Yavas, F. Cruz, J. P. Boquillon, and C. Sartori: Appl. Surf. Sci. 98, 484 (1996).
- [175]: D. A. Wesner, M. Mertin, F. Lupp, and E. W. Kreutz: Appl. Surf. Sci. 98, 479 (1996).
- [176]: M. Afif, J. P. Girardeau-Montaut, C. Tomas, M. Romamd, M. Charbonnier, N. S. Prakash, A. Perez, G. Marest, and J. M. Frigerio: Appl. Surf. Sci. 98, 469 (1996).
- [177]: I. Gobernado-Mitre, J. Medina, B. Calvo, A. C. Prieto, L. A. Leal, B. Perez, F. Marcos, and A. M. de Frutos: Appl. Surf. Sci. 98, 474 (1996).
- [178]: J. B. Heroux, S. Boughaba, I. Ressejac, E. Sacher, and M. Meunier: J. Appl. Phys. 79, 2857 (1996).
- [179]: W. D. Song, Y. F. Lu, K. D. Ye, C. K. Tee, M. H. Hong, D. M. Liu, and T. S. Low: Proc. SPIE 3184, 158 (1997).
- [180]: Y. F. Lu, W. D. Song, B. W. Ang, M. H. Hong, D. S. H. Chan, and T. S. Low: Appl. Phys. A65, 9 (1997).
- [181]: Y. F. Lu, W. D. Song, K. D. Ye, Y. P. Lee, D. S. H. Chan, and T. S. Low: Jpn. J. Appl. Phys. 36, L1304 (1997).
- [182]: Y. F. Lu, W. D. Song, K. D. Ye, M. H. Hong, D. M. Liu, D. S. H. Chan, and T. S. Low: Appl. Surf. Sci. 120, 317 (1997).
- [183]: Y. F. Lu, W. D. Song, C. K. Tee, D. S. H. Chan, and T. S. Low: Jpn. J. Appl. Phys. 840 (1998).

- [184]: D. M. Liu, Y. F. Lu, Y. Yuan, W. J. Wang, T. S. Low, T. S. Wee, K. T. Chang, and R. J. K. Goh: Appl. Surf. Sci. 139, 482 (1999).
- [185]: Y. F. Lu, J. J. Yu, and W. K. Choi: Appl. Phys. Lett. 71, 3439 (1997).
- [186]: Y. F. Lu, Z. H. Mai, G. Qiu, and W. K. Chim: Appl. Phys. Lett. 75, 2359 (1999).
- [187]: Y. F. Lu, Z. H. Mai, Y. W. Zheng, W. D. Song, and W. K. Chim: Appl. Phys. Lett. 76, 1200 (2000).
- [188]: R. Ranjan, D. N. Lambeth, M. Tromel, P. Goglia, and Y. Li, J. App. Phys. 69, 5745 (1991).
- [189]: T. D. Bennett, D. J. Krajnovich, C. P. Grigoropoulos, P. Baumgart, and A. C. Tam, J. Heat. Transfer 119, 589 (1997).
- [190]: S. C. Chen, D. G. Cahill, and C. P. Grigoropoulos, Journal of Heat Transfer 122, 107 (2000).
- [191]: H. K. Park, P. J. M. Kerstens, P. Baumgart, and A. C. Tam, IEE Transactions on Magnetics 34, 1807 (1998).
- [192]: Miles V. Klein and Thomas E. Furtak, Optics, 2nd ed. (Wiley, New York, 1986), see Chapter 6, and, in particular, page 359.
- [193]: V. Y. Balandin, D. Otte, and O. Bostanjoglo, J. Appl. Phys. 78, 2037 (1995).
- [194]: E. Yablonovitch, D. L. Allara, C. C. Chang, T. Gmitter, and T. B. Bright, Phys. Rev. Lett. 57, 249 (1986).

