



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

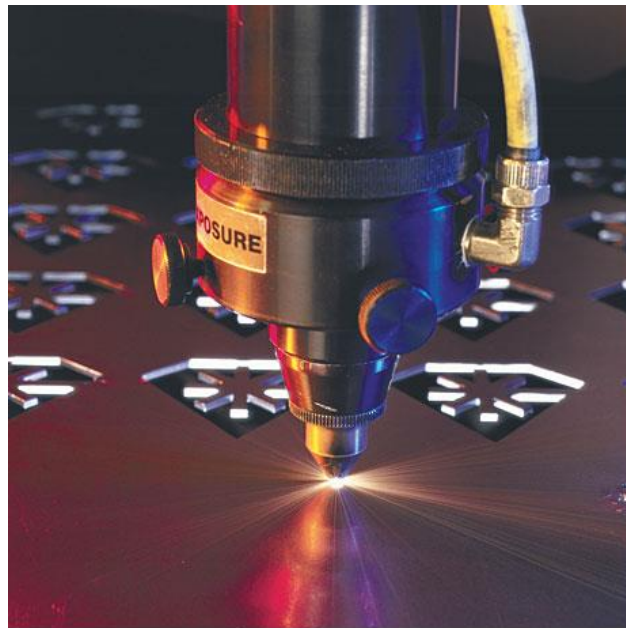
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΟΠΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΙ ΜΕ LASER

ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ



ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΟΠΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΙ ΜΕ LASER

ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ

ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΠΑΠΑΕΥΘΥΜΙΟΥ ΣΠΥΡΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2015

*Στη μητέρα μου Αναστασία και στον αδελφό μου Αθανάσιο.
Στη γυναίκα μου Νατάσα και στην κόρη μου Μαρίσια.
Πέρασαν δεκαοκτώ χρόνια, οι συνθήκες άλλαξαν για όλους μας,
αλλά τελικά κάλλιο αργά παρά ποτέ...*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ		
ΕΙΣΑΓΩΓΗ		3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	5
	2.1 Η μεταλλοτεχνία συμπορεύεται με τον πολιτισμό	5
	2.2 Ο κύκλος και η κατεργασία του μετάλλου	6
	2.3 Κατάταξη των κατεργασιών	8
	2.4 Ταξινόμηση μηχανουργικών κατεργασιών	9
	2.5 Συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες	11
	2.5.1 Κατεργασίες κοπής	11
	2.5.2 Ψαλιδισμός – Απότμηση	13
	2.5.3 Μηχανισμός κοπής – απότμησης	14
	2.5.4 Πριόνια – Κορδέλες	16
	2.5.5 Κοπτικοί – λειαντικοί τροχοί	17
	2.5.6 Υλικά εργαλείων κοπής	18
	2.6 Μη συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες	19
	2.6.1 Γενικά	19
	2.6.2 Ομάδες των μη συμβατικών μηχανουργικών κατεργασιών	20
	2.6.3 Μελλοντικές τάσεις στις μηχανουργικές κατεργασίες	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	ΛΕΙΪΖΕΡ	24
	3.1 Αρχές λειτουργίας	24
	3.1.1 Διάταξη ταλαντωτή λέιζερ	27
	3.2 Είδη λέιζερ	30
	3.3 Εφαρμογές	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	35
	4.1 Αλουμίνιο και ιδιότητές του	35
	4.2 Βιομηχανικά κράματα αλουμινίου	38
	4.2.1 Κραματικά στοιχεία	38
	4.2.2 Ταξινόμηση και συμβολισμός των κραμάτων αλουμινίου	39
	4.3 Προσδιορισμός βασικών κατεργασιών αλουμινίου	42
	4.3.1 Υποκατηγορίες της σκλήρυνσης με ψυχρή κατεργασία	42
	4.3.2 Υποκατηγορίες θερμικών κατεργασιών	43
	4.4 Το κράμα αλουμινίου 7075	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	46
	5.1 Ορισμός – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	46
	5.2 Ταξινόμηση	48
	5.3 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών	49
	5.3.1 Ίνες συνθέτων υλικών	50

	5.3.2 Μήτρες	53
	5.4 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων	54
	5.5 Στρωματικά σύνθετα υλικά	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	57
	6.1 Συνθήκες κοπής δοκιμίων	59
	6.2 Μακροσκοπικός έλεγχος - στερεοσκοπία	62
	6.3 Αποτελέσματα τραχύτητας	69
	6.4 Μικροσκοπικός έλεγχος – Εξέταση και μέτρηση θερμικά επηρεασμένης ζώνης	74
	6.5 Μέτρηση σκληρότητας	81
	6.6 Αποτελέσματα μετρήσεων μικροσκληρότητας	82
	6.7 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο	91
	6.8 Δοκιμές διάβρωσης	92
	6.9 Κοπή συνθέτων υλικών	93
	6.10 Εξέταση και μορφολογία της επιφάνειας κοπής	96
	6.11 Μέτρηση θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης στα σύνθετα υλικά	102
	6.12 Δοκιμές εφελκυσμού	103
	6.13 Έλεγχος c-scan	104
	6.14 Αποτελέσματα διαστασιακού ελέγχου	106
	6.15 Κοπή σύνθετου υλικού τύπου σάντουιτς	108
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	109
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	111

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2.1	Μη Συμβατικές Μηχανουργικές Κατεργασίες	21
-------------	---	----

Κεφάλαιο 4

Πίνακας 4.1	Οι κυριότερες ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου (99,99%)	35
Πίνακας 4.2	Κυριότερα κραματικά στοιχεία στο Al, διαλυτότητες κι επίδραση αυτών	38
Πίνακας 4.3	Κράματα Αλουμινίου διαμόρφωσης	40
Πίνακας 4.4	Κράματα Αλουμινίου χύτευσης	41
Πίνακας 4.5	Μηχανικές ιδιότητες διαφόρων κατεργασμένων κραμάτων Al 7075	44

Κεφάλαιο 5

Πίνακας 5.1	Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα	52
-------------	-----------------------------	----

Κεφάλαιο 6

Πίνακας 6.1	Διαδικασία πειραματικού μέρους	57
Πίνακας 6.2	Συνθήκες κοπής δοκιμίων Al 7075 στην EBETAM	60
Πίνακας 6.3	Συνθήκες κοπής δοκιμίων Al 7075 πάχους 2 mm στο LIC	60
Πίνακας 6.4	Συνθήκες κοπής δοκιμίων Al 7075 πάχους 5 mm στο LIC	61
Πίνακας 6.5	Συνθήκες κοπής δοκιμίων Alclad 7075 πάχους 2 mm στο LIC	61
Πίνακας 6.6	Τραχύτητα δοκιμίων Al 7075-O κομμένων με laser CO ₂ στην EBETAM με διαφορετικές ταχύτητες κοπής.	69
Πίνακας 6.7	Τραχύτητα δοκιμίων Al 7075-O κομμένων με laser CO ₂ στην EBETAM με διαφορετικές πιέσεις προστατευτικού αερίου και ισχύες δέσμης εξόδου.	70
Πίνακας 6.8	Οι καλύτερες μετρήσεις τραχύτητας δοκιμίων Al 7075- O που κόπηκαν με συμβατικές μεθόδους (ψαλίδι, τροχό) και laser CO ₂ .	72
Πίνακας 6.9	Αποτελέσματα τραχύτητας δοκιμίων Al 7075 από EBETAM	73
Πίνακας 6.10	Αποτελέσματα τραχύτητας δοκιμίων Al 7075 και Alclad από LIC	73
Πίνακας 6.11	Έκταση ΘΕΖ των δοκιμίων που κόπηκαν στην EBETAM μετρημένη στο οπτικό μικροσκόπιο.	80
Πίνακας 6.12	Έκταση ΘΕΖ των δοκιμίων που κόπηκαν στο LIC μετρημένη στο οπτικό μικροσκόπιο.	80
Πίνακας 6.13	Έκταση ΘΕΖ μετρημένη με image analysis.	81
Πίνακας 6.14	Μικροσκληρότητα συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια κοπής στα σημεία εισόδου και εξόδου του λέιζερ για όλα τα δοκίμια.	
Πίνακας 6.15	Συνθήκες κοπής δοκιμίων [0] ₈ στο LIC.	94
Πίνακας 6.16	Συνθήκες κοπής δοκιμίων [0] ₁₆ στο LIC.	95
Πίνακας 6.17	Μέτρηση θερμικά επηρεασμένης ζώνης στα σύνθετα υλικά.	102
Πίνακας 6.18	Δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια [0] ₈	103
Πίνακας 6.19	Δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια [0] ₁₆	103
Πίνακας 6.20	Δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια [0....90] _{8s}	104
Πίνακας 6.21	Συνθήκες κοπής με laser CO ₂ δοκιμίων Al και συνθέτων υλικών.	106
Πίνακας 6.22	Ονομαστικές και πραγματικές διαστάσεις δοκιμίων μεταλλικών υλικών, σειρών 1,2,3.	106
Πίνακας 6.23	Ονομαστικές και πραγματικές διαστάσεις δοκιμίων συνθέτων υλικών.	107

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σχήμα 2.1	Ο κύκλος του μετάλλου σε τελικό προϊόν	6
Σχήμα 2.2	Γενική επισκόπηση των μεθόδων παραγωγής και κατεργασιών	8
Σχήμα 2.3	Κατεργασίες χωρίς αφαίρεση υλικού	9
Σχήμα 2.4	Κατεργασίες με αφαίρεση υλικού	10
Σχήμα 2.5	Βασικές έννοιες της κοπής	11
Σχήμα 2.6	Κατεργασίες επίπεδων επιφανειών	12
Σχήμα 2.7	Ηλεκτροϋδραυλικό Ψαλίδι	13
Σχήμα 2.8	Διαδικασίες κοπής: α1) Κοπή ανοικτής γραμμής με δύο στοιχεία α2) Κοπή κλειστού περιγράμματος με δυο στοιχεία (απότμηση) β) Κοπή με ένα στοιχείο	15
Σχήμα 2.9	Φάσεις κατά την κοπή και προκύπτουσα επιφάνεια	14
Σχήμα 2.10	Φάσεις εξέλιξης της διαδικασίας κοπής: α) Ελαστικής παραμόρφωσης β) Ελαστοπλαστικής παραμόρφωσης γ) Πλαστικής ροής (εμφάνιση ρωγμών, πρώτη στην κάτω επιφάνεια και μετά στην πάνω) δ) Θραύσης (επέκταση των ρωγμών)	15
Σχήμα 2.11	Πριονοκορδέλες σε οριζόντια και σε κάθετη διάταξη	16
Σχήμα 2.12	Κοπτικός τροχός	17

Κεφάλαιο 3

Σχήμα 3.1	α) αυθόρμητη εκπομπή, β) εξαναγκασμένη εκπομπή γ) απορρόφηση	24
Σχήμα 3.2	Μοντέλα laser α) 3 επιπέδων β) 4 επιπέδων	26
Σχήμα 3.3	Διάταξη Λείζερ 1. Ενεργό υλικό του λείζερ 2. Προσφερόμενη ενέργεια άντλησης 3. Υψηλής ανακλαστικότητας κάτοπτρο 4. Διάταξη εξόδου δέσμης 5. Δέσμη Λείζερ	27
Σχήμα 3.4	Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και μήκη κύματος διαθέσιμων λείζερ	32
Σχήμα 3.5	Διάταξη κοπής μετάλλου με ακτίνα λείζερ	33

Κεφάλαιο 4

Σχήμα 4.1	Παγκόσμια Παραγωγή Αλουμινίου (εκατομμύρια τόνοι ή 10^6 MT) ανά έτος	36
-----------	--	----

Κεφάλαιο 5

Σχήμα 5.1	Κατηγορίες σύνθετων υλικών	46
Σχήμα 5.2	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διεσπαρμένης φάσης σε σύνθετο υλικό α) συγκέντρωση β) μέγεθος γ) σχήμα δ) κατανομή ε) προσανατολισμός	48

Σχήμα 5.3	Ταξινόμηση διαφόρων τύπων συνθέτων υλικών	49
Σχήμα 5.4	Διάταξη των ινών α) μονοδιευθυντικές ίνες (μονοαξονικό ύφασμα) β) άτακτων διευθύνσεων (πλέγμα) γ) πλέξη ύφανσης (ύφασμα) δ) ίνες σε τρισδιάστατη πλέξη (πεπλεγμένο ύφασμα)	50
<u>Κεφάλαιο 6</u>		
Σχήμα 6.1	Κύρια φαινόμενα κατά την κοπή με laser	59
Σχήμα 6.2	Κοπή δοκιμίων Al 7075 στην EBETAM	61
Σχήμα 6.3	Μορφολογία της επιφάνειας κοπής με λέιζερ. Μέτρηση της τραχύτητας της επιφάνειας κοπής, παράλληλα στη φορά του λέιζερ και κάθετα στις δημιουργηθείσες «ραβδώσεις, λωρίδες» από την τήξη του υλικού.	62
Σχήμα 6.4	Μέτρηση Τραχύτητας δοκιμίου A3 Al 7075-O πάχους 2mm, ταχύτητα κοπής 1,6m/min, Ισχύς δέσμης 1290W, Αέριο O ₂ πίεσης 8bar.	69
Σχήμα 6.5	Απεικόνιση των καθέτων τομών (διαμήκους και εγκάρσιες), ως προς την επιφάνεια κοπής, που πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφική εξέταση. Σημειώνεται η μορφή της ζώνης τήξης (ZT) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (ΘEZ) αντίστοιχα.	74
Σχήμα 6.6	Prepreg tape. Ίνες άνθρακα προεμποτισμένες σε εποξειδική ρητίνη	93
Σχήμα 6.7	Διεύθυνση των ινών στο στρώμα (Παραδοχή)	93
Σχήμα 6.8	Πλάκα συνθέτου υλικού εποξειδικής ρητίνης με ίνες άνθρακα	94
Σχήμα 6.9	Τυπικές επιφάνειες κατά την κοπή συνθέτου με laser. α κάτωψη, β τομή.	96
Σχήμα 6.10	Κοπή με laser unidirectional συνθέτου υλικού . (Α) παράλληλα προς τη διεύθυνση των ινών και (Β) κάθετα προς αυτήν.	101
Σχήμα 6.11	Σύνθετο υλικό με κυψελοειδή δομή τύπου Σάντουιτς.	108

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του Επιχειρησιακού Προγράμματος Έρευνας και Τεχνολογίας, ΓΓΕΤ (ΕΠΕΤ ΙΙ/170) «Κατεργασίες Βιομηχανικών Υλικών με Δέσμες Laser (LaserMat)».

Έλαβε χώρα κατά το χρονικό διάστημα 1996 - 1998 στις εγκαταστάσεις της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (ΕΑΒ) στο Σχηματάρι Βοιωτίας και στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Τα κατεργασμένα με laser δοκίμια προήλθαν από την Εταιρεία Βιομηχανικής Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης Μετάλλων (ΕΒΕΤΑΜ) και από το Ίδρυμα Τεχνολογίας Έρευνας- Κέντρο Καινοτομίας Laser (LIC), που μαζί με την ΕΑΒ ήταν μεταξύ άλλων συνεργάτες του προγράμματος.

Σκοπός του προγράμματος ήταν να μελετήσει και να αξιολογήσει τις κατεργασίες των υλικών με λέιζερ σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές (κοπή, διάτρηση, συγκόλληση, χάραξη κ.λπ.), σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους διαμόρφωσης, που ήδη εφάρμοζε η κάθε βιομηχανία.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αντιπροσωπευτικά αυτών για τα οποία ενδιαφερόταν και χρησιμοποιούσε η κάθε βιομηχανία.

Μελετήθηκε η κοπή μεταλλικών υλικών κράματος Al 7075-O (Bare και Alclad) και η κοπή σύνθετων στρωματοειδών υλικών με συμβατικές μεθόδους και με λέιζερ CO₂.

Νιώθω έντονη την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν στην πραγματοποίηση της εργασίας αυτής:

Τους αείμνηστους καθηγητές μου, δρα Ελένη Μπαντέκα και δρα Παναγιώτη Τσαλαπάτη για την καθοδήγηση και τις παρατηρήσεις τους.

Τη διευθύντρια Διεύθυνσης Έρευνας και Ανάπτυξης ΕΑΒ δρα Ζαΐρα Ρήγα, τη δρα Ρουμπίνη Μαρίνη και τη δρα Αλεξάνδρα Καρανίκα.

Όλο το προσωπικό της ΕΑΒ και ιδιαίτερα τους μηχανικούς Σωκράτη Παναγιωτόπουλο και Σταύρο Καλογερόπουλο, τους τεχνικούς-παρασκευαστές κ.κ. Νίκο Πασχαλόπουλο και Ευθύμιο Ζουμή στο Εργαστήριο Συνθέτων Υλικών για την όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη πραγματοποίηση του πειραματικού μέρους.

Τους προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές του Εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας του ΕΜΠ για το όμορφο κλίμα αρωγής και αλληλεγγύης που υπήρχε.

Ασφαλώς, τον καθηγητή δρα Γεώργιο Φούρλαρη χωρίς την αμέριστη βοήθεια του οποίου δεν θα ολοκληρωνόταν ποτέ η εργασία αυτή και τον καθηγητή δρα Γεώργιο Αναστασάκη για τις πολύτιμες συμβουλές του.

Τέλος, την οικογένειά μου για την ηθική στήριξη που επέδειξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Νικόλαος Παν. Χριστόπουλος

Αθήνα 2015

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της κοπής κράματος αλουμινίου 7075 και συνθέτων πολυστρωματικών υλικών (μήτρα από εποξειδική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες άνθρακα) με μη συμβατικές μεθόδους (κοπή με λέιζερ CO₂). Πρόκειται για υλικά που χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στην αεροναυπηγική και έως τώρα κόβονταν με συμβατικές μεθόδους (ψαλίδι, κοπτικό τροχό, αδαμαντοκορδέλα). Παράγοντες που μελετώνται κατά την κοπή με λέιζερ είναι η ταχύτητα κοπής, η ισχύς της δέσμης (πυκνότητα ισχύος), το είδος και η πίεση του προστατευτικού αερίου για υλικά διαφορετικού πάχους. Τα δοκίμια συγκρίνονται ως προς την ποιότητα της επιφάνειας κοπής (οπτική παρατήρηση, στερεοσκοπία, τραχυμετρία, σκληρομέτρηση, μεταλλογραφία, μικροσκληρότητα). Τα αποτελέσματα κοπής έδειξαν ότι και τα δύο υλικά κόβονται με λέιζερ, εντούτοις η επιφάνεια κοπής και η εντομή δεν είναι αποδεκτές ποιοτικά. Η μεγάλη ανακλαστικότητα και η θερμική αγωγιμότητα του αλουμινίου καθιστά αρκετά δύσκολη την κοπή του υλικού με λέιζερ CO₂.

Λέξεις κλειδιά

Κοπή με laser CO₂ laser, Κράμα αλουμινίου Al 7075, Σύνθετα υλικά, μήτρα από εποξειδική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες άνθρακα.

Abstract

This study deals with the machining of aluminum alloy 7075 and carbon fiber reinforced epoxy resin matrix composite materials (matrix of epoxy resin reinforced with carbon fibers) with nontraditional methods (laser beam cutting). These materials are used particularly in aeronautics and are machined by traditional methods (shearing machine, cutting wheel, bandsaw). Factors studied by CO₂ laser cutting is the cutting speed, the power of the beam (power density), the type and pressure of assisting - protective gas for different thickness materials. The specimens were compared to the cutting quality of the surface (visual observation, stereoscopy, profilometry, hardness, metallography, microhardness). The results showed that laser cutting of both materials is possible, however, the cutting surface and the kerf are not acceptable in terms of quality. Aluminum alloys have high reflectivity and thermal conductivity, that's why proper cutting by laser CO₂ is very difficult.

Key Words

Laser cutting, CO₂ laser, Al 7075, Composite materials, carbon fiber reinforced epoxy resin matrix, cfrp

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κοπή αποτελεί μια από τις αρχαιότερες μεθόδους διαμόρφωσης και κατεργασίας των υλικών. Συντροφεύει όλους στην καθημερινότητά μας. Παράλληλα αποτελεί βασική μηχανουργική κατεργασία, τα προϊόντα της οποίας χρησιμοποιούνται σε όλα τα στάδια της βιομηχανικής παραγωγής.

Η ποιότητα των προϊόντων κοπής εξαρτάται κυρίως από τη μέθοδο και το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται. Έτσι, μπορεί να έχουμε απευθείας παραγωγή του τελικού προϊόντος έως και καταστροφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Στις συμβατικές μηχανουργικές μεθόδους κοπής έχουμε συχνά καταστροφές λόγω θερμικών φαινομένων.

Αντίθετα, με τη χρήση του λέιζερ απορροφάται ενέργεια από τις εξωτερικές στοιβάδες του υλικού, χωρίς να έχουμε διάδοση της θερμότητας στο υλικό.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετάται η κοπή μεταλλικών υλικών κράματος Al 7075-O (Bare και Alclad) σε φύλλα πάχους 2mm και 5mm και η κοπή σύνθετων θερμοσκληρυνόμενων υλικών με μήτρα από εποξειδική ρητίνη, ενισχυμένη με ίνες άνθρακα (carbon fiber reinforced epoxy resin matrix). Τα παραπάνω υλικά είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα στην αεροναυπηγική για την κατασκευή των δομικών μερών αεροσκαφών, συνδυάζοντας υψηλή αντοχή και χαμηλό βάρος.

Κατ' αρχάς, κόπηκαν τα υλικά με συμβατικές μεθόδους κατεργασίας (ψαλίδι, τροχός, αδαμαντοκορδέλα). Αντίστοιχα δοκίμια κόπηκαν με λέιζερ συνεχούς λειτουργίας CO₂ και λέιζερ παλμικού τύπου Nd : YAG (ενδεικτικά μόνο για τα σύνθετα υλικά).

Οι παράγοντες που εξετάζονται κατά την κοπή με λέιζερ είναι η ταχύτητα κοπής, η πυκνότητα ισχύος, το είδος και η πίεση του βοηθητικού - προστατευτικού αερίου.

Τα αποτελέσματα της κοπής συγκρίνονται ως προς την ποιότητα της επιφάνειας κοπής (οπτική παρατήρηση, στερεοσκοπία, τραχυμετρία, σκληρομέτρηση, μεταλλογραφία, μικροσκληρότητα). Πρακτικά με την εργασία προσπαθούμε να αξιοποιήσουμε και να κατανοήσουμε τον μηχανισμό της κοπής με λέιζερ, για να διερευνήσουμε τα βέλτιστα αποτελέσματά του και τις εφαρμογές του.

Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας αναφέρονται ορισμένα εισαγωγικά στοιχεία τα οποία βοηθούν στην κατανόηση της ανάλυσης των πειραματικών στοιχείων τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Συγκεκριμένα, στο Δεύτερο Κεφάλαιο γίνεται λόγος για τις μεθόδους διαμόρφωσης και κατεργασίας υλικών γενικά, για τις συμβατικές και μη συμβατικές ειδικότερα. Το Τρίτο Κεφάλαιο αναφέρεται στο λέιζερ, στις αρχές λειτουργίας, στις ιδιότητες, στα είδη και στις εφαρμογές του. Το Τέταρτο Κεφάλαιο αφορά το αλουμίνιο, τα κράματά του και το κράμα αλουμινίου 7075. Το Πέμπτο Κεφάλαιο αναφέρεται στα σύνθετα υλικά και στα στρωματοειδή σύνθετα, που αποτελούν αντικείμενο της εργασίας αυτής.

Το Έκτο Κεφάλαιο αποτελεί το πειραματικό μέρος της εργασίας. Παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματά της.

Αναφέρονται οι συνθήκες κοπής των μεταλλικών και συνθέτων υλικών και ο έλεγχος της ποιότητας κοπής των δοκιμίων μέσω της παρατήρησης σε οπτικό μικροσκόπιο και στερεοσκόπιο. Επίσης, γίνεται μέτρηση της τραχύτητας για την αξιολόγηση της ποιότητας της επιφάνειας κοπής και διαστασιακός έλεγχος για τη σχετική σύγκριση των συμβατικών και μη συμβατικών μεθόδων κοπής. Μέσω της μικροσκληρότητας εκτιμάται η θερμικά επηρεασμένη ζώνη του υλικού μετά την κοπή με λέιζερ. Τα μεταλλικά υλικά εξετάζονται για αντοχή στη διάβρωση, ενώ τα σύνθετα υφίστανται μη καταστρεπτικό έλεγχο με υπερήχους (c-scan) και ακολούθως υποβάλλονται σε δοκιμές εφελκυσμού. Τέλος, δοκιμάζεται και η κοπή με λέιζερ συνθέτου υλικού τύπου σάντουιτς.

Από την παραπάνω διαδικασία εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για το κατά πόσο το λέιζερ CO₂ μπορεί να κόψει αποτελεσματικά και ποιοτικά τα υπό εξέταση μεταλλικά και σύνθετα υλικά και να προταθεί ως εναλλακτική μέθοδος κοπής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 Η μεταλλοτεχνία συμπορεύεται με τον πολιτισμό

Οι μέθοδοι διαμόρφωσης των υλικών, όπως η μεταλλοτεχνία δηλ. η επεξεργασία των μετάλλων, είναι από τις αρχαιότερες τέχνες και η εξέλιξή τους συνδέεται από τα προϊστορικά ακόμα χρόνια με την ιστορία της τεχνικής και του πολιτισμού. Από τη φύση του ο άνθρωπος ωθείται στην εφεύρεση νέων υλικών και μεθόδων για τη διαμόρφωση και κατεργασία τους.

Η μεταλλοτεχνία και οι κατεργασίες των υλικών, δηλαδή η επεξεργασία των μετάλλων, αναπτύχθηκαν σχεδόν εξ ολοκλήρου με εμπειρικό τρόπο και χαρακτήρισαν ολόκληρες εποχές της ανθρωπότητας (εποχή χαλκού, σιδήρου, βιομηχανική επανάσταση κ.λπ.) Άλλωστε δεν χωράει αμφιβολία ότι οι περισσότερες σύγχρονες τεχνικές είναι γνωστές από την αρχαιότητα και το μεσαίωνα.

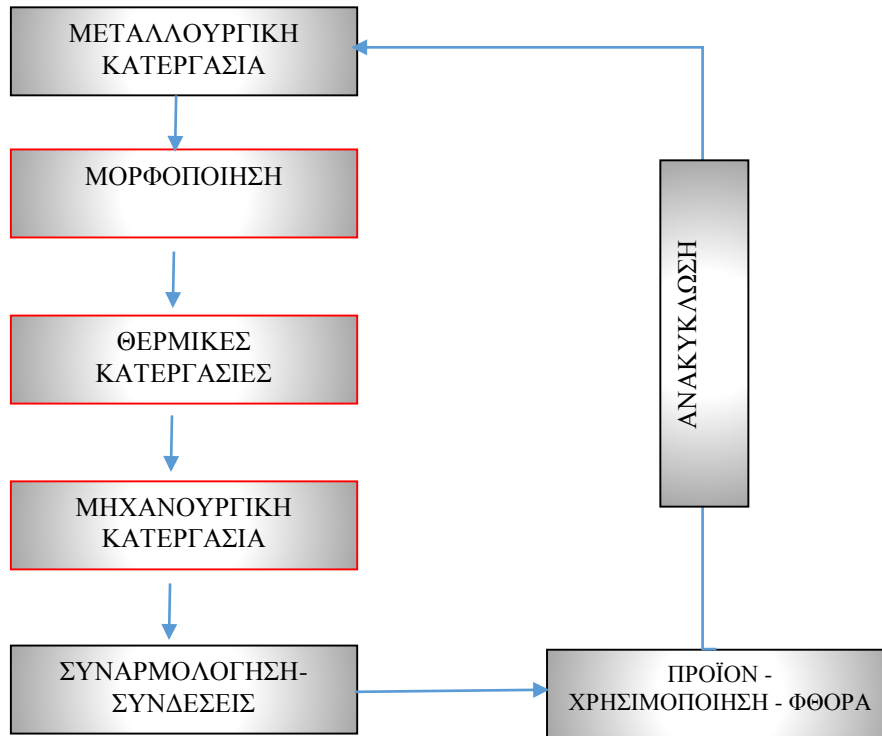
Η σύγχρονη επιστήμη της Μεταλλογνωσίας αναπτύχθηκε ουσιαστικά στον αιώνα μας κι επέτρεψε την καλύτερη κατανόηση των διαφόρων τεχνικών της μεταλλοτεχνίας και τη βελτίωσή τους, τόσο από άποψη ποιότητας των προϊόντων όσο και από άποψη παραγωγικότητας. [Παπαδημητρίου, 1990]

Η προσπάθεια να ικανοποιηθεί μεγάλο πλήθος αναγκών του ανθρώπου με την αξιοποίηση κι εκμετάλλευση του μετάλλου σε συνδυασμό με τη μεγάλη εξέλιξη της τεχνολογίας είχε ως αποτέλεσμα να αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό μια μεγάλη ποικιλία μηχανών και μεθόδων.

Οι αυξανόμενες αυτές ανάγκες για διαρκώς νέα και καλύτερα τελικά προϊόντα, που έπρεπε να μορφοποιηθούν με διαρκώς καλύτερα εργαλεία και μεθόδους, ώθησε και συνεχίζει να ωθεί την εξέλιξη της τεχνολογίας.

2.2 Ο «κύκλος» και η κατεργασία του μετάλλου

Ο κύκλος του μετάλλου και η διαμόρφωσή του, μέσω κατεργασιών σε τελικό βιομηχανικό προϊόν (Σχήμα 2.1) περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:



Σχήμα 2.1 : Ο κύκλος του μετάλλου σε τελικό προϊόν

Η διαδικασία μετατροπής ακατέργαστων υλικών σε προϊόντα ονομάζεται κατεργασία. Όπως είπαμε, πρόκειται για ιδέα πρωτόγονη. Στη σύγχρονη μορφή της κατεργασία είναι η διαδικασία παραγωγής προϊόντων βάσει ενός οργανωμένου κατασκευαστικού σχεδίου. Γενικά πρόκειται για σύνθετη δραστηριότητα με χρήση ευρείας ποικιλίας μεθόδων κι εργαλείων.

Κατά DIN8580 οι κατεργασίες παραγωγής ταξινομούνται σε αρχέγονη μορφοποίηση, διαμόρφωση υλικού, διαχωρισμός υλικού, συνδέσεις κομματιών, τροποποίηση ιδιοτήτων υλικού κι επικαλύψεις (γαλβανισμός, βαφή κλπ). [Schuler, 1998]

Με τη μεταλλουργική κατεργασία από την πρώτη ύλη (μετάλλευμα ή παλιό μέταλλο) οδηγούμαστε σε μέταλλα ή κράματα με κατάλληλη σύσταση.

Κατά τη μορφοποίηση τα μέταλλα ή κράματα χωρίς καθορισμένο σχήμα (σε ρευστή κατάσταση ή σκόνη) από την υγρή φάση άλλοτε χυτεύονται κατευθείαν σε καλούπια που έχουν

τις διαστάσεις του τελικού προϊόντος, όπου και στερεοποιούνται (προϊόντα χύτευσης) ή άλλοτε μετά τη χύτευση σε πλινθώματα υφίστανται περαιτέρω κατεργασία μορφοποίησης, με πρόσδοση μηχανικού έργου.

Στο στάδιο αυτό υπάγονται και τα προϊόντα που προκύπτουν με τεχνικές κονιομεταλλουργίας (παραγωγή καρβιδίων, σκληρομετάλλων και πυρίμαχων μετάλλων με συμπίεση και ψήσιμο).

Η διαμόρφωση - μορφοποίηση με πλαστική παραμόρφωση του σχήματος διατηρεί τη μάζα και τη συνεκτικότητα του υλικού. Η διαμόρφωση γίνεται ελεγχόμενα κατά τις τρεις διαστάσεις και ανάλογα με την επιθυμητή γεωμετρία του τελικού προϊόντος διαμόρφωσης (πλάκες, φύλλα, σύρματα, κύλινδροι ή σωλήνες) διακρίνεται σε κατεργασίες διαμόρφωσης του συμπαγούς υλικού (σφυρηλάτηση, έλαση, διέλαση, ολκή κλπ.) και του επιπέδου ελάσματος (κάμψη, απότμηση, βαθεία κοίλανση, διαμόρφωση με έκταση κλπ [Χρυσουλάκης-Παντελής, 2008]).

Η κατεργασία αυτή μπορεί να γίνει σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από το ήμισυ περίπου του απολύτου σημείου τήξης ($0,5T_m$) ή πάνω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του μετάλλου και λέγεται θερμή κατεργασία ή θερμοπλασσία, ενώ όταν γίνεται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (εν ψυχρώ) ονομάζεται ψυχρή κατεργασία ή ψυχηλασσία.

Συχνά στην πράξη εφαρμόζεται ο συνδυασμός μηχανικής και θερμικής κατεργασίας, έτσι ώστε το μέταλλο να αποκτήσει τις επιθυμητές ιδιότητες (θερμομηχανική κατεργασία) και την επιθυμητή γεωμετρία. Η διαστασιακή ακρίβεια των μηχανικών διαμορφώσεων είναι συνήθως κατώτερη αυτής που επιτυγχάνεται με τις μηχανουργικές κατεργασίες, αλλά συνήθως είναι επαρκής για τη λειτουργικότητα των παραγόμενων κομματιών. Συνήθως η βασική μορφή σ' ένα κομμάτι προσδίδεται με μηχανική διαμόρφωση και η τελική μορφή προσδίδεται με τις μηχανουργικές κατεργασίες.

Στις μηχανουργικές κατεργασίες οι κατεργασίες διαμόρφωσης γίνονται κυρίως με αφαίρεση υλικού, που όλες έχουν σαν κοινό χαρακτηριστικό την αφαίρεση υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο με σκοπό τη παραγωγή ενός αντικειμένου με επιθυμητή ακρίβεια στις τελικές του διαστάσεις και στην επίτευξη κατάλληλης ποιότητας επιφάνειας, σύμφωνα με το κατασκευαστικό σχέδιο.

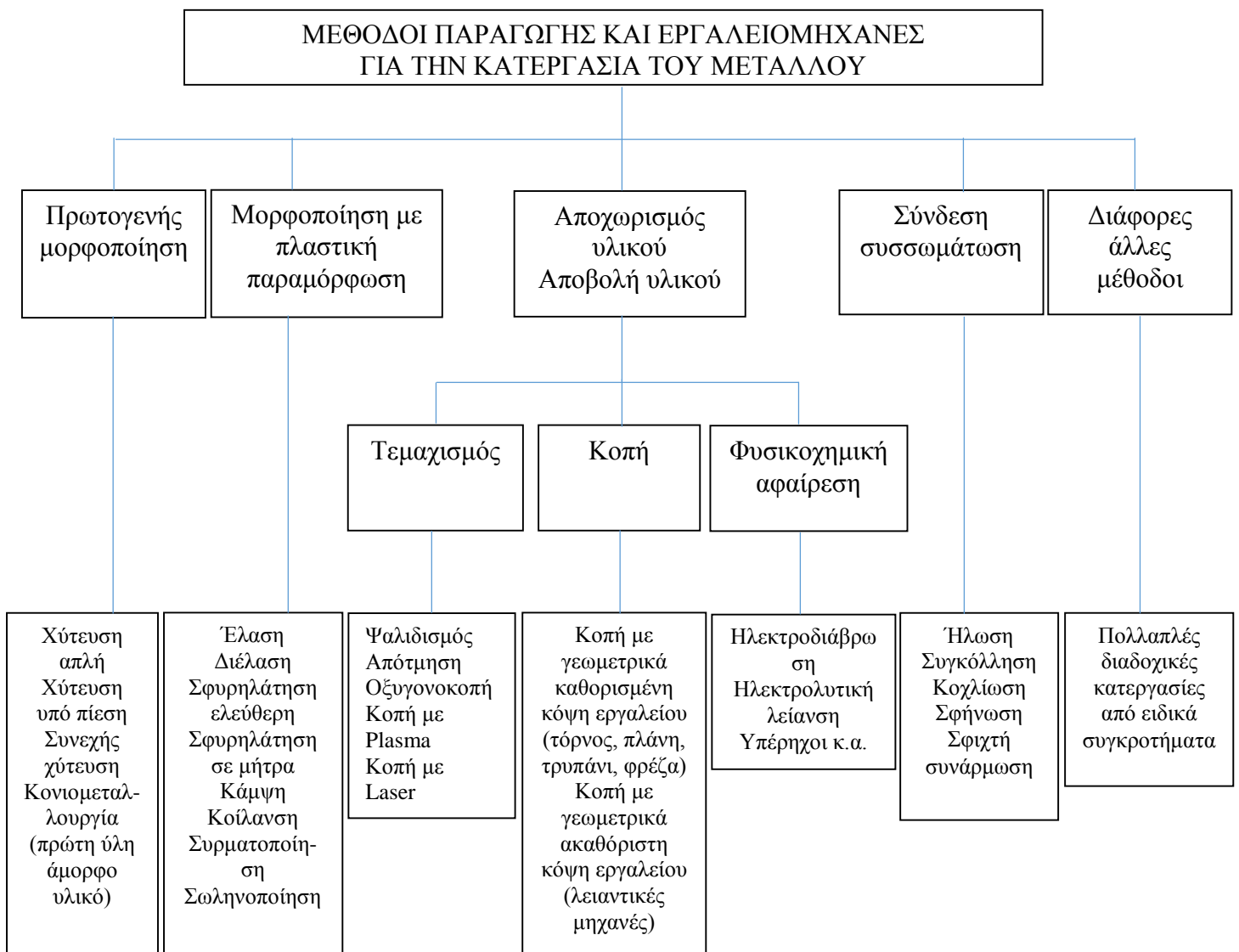
Ο κύκλος του μετάλλου κλείνει με τη συναρμολόγηση και τις συνδέσεις (συγκολλήσεις, ηλώσεις, κοχλιοσυνδέσεις) του τεμαχίου σε συνθετότερα αντικείμενα, βιομηχανικά προϊόντα, που χρησιμοποιούνται, φθείρονται και συνήθως ανακυκλώνονται για να τροφοδοτηθεί εκ νέου η μεταλλουργική βιομηχανία.

2.3 Κατάταξη των κατεργασιών

Οι κατεργασίες (διαμόρφωσης και μηχανουργικές) είναι από τις πιο σημαντικές ανάμεσα στις βασικές κατασκευαστικές μεθόδους. Όλα σχεδόν τα βιομηχανικά προϊόντα περιέχουν ένα ή περισσότερα εξαρτήματα που κατασκευάστηκαν με κάποια από τις μεθόδους αυτές. Γενικά πρόκειται για σύνθετη δραστηριότητα με χρήση ευρείας ποικιλίας εργαλείων.

Εργαλειομηχανές ονομάζονται γενικά οι μηχανές εκείνες που χρησιμεύουν σε πλατιά έννοια ως εργαλεία για την εφαρμογή –με κατανάλωση ενέργειας- των διαφόρων μεθόδων για την παραγωγή προϊόντων.

Λόγω του μεγάλου πλήθους των μεθόδων παραγωγής και των εργαλειομηχανών μία γενική επισκόπηση - κατάταξη κατά DIN 8580 εμφανίζεται στο σχήμα 2.2 [Παπαμιχαήλ-Σφατζίκοπουλος, 1994].

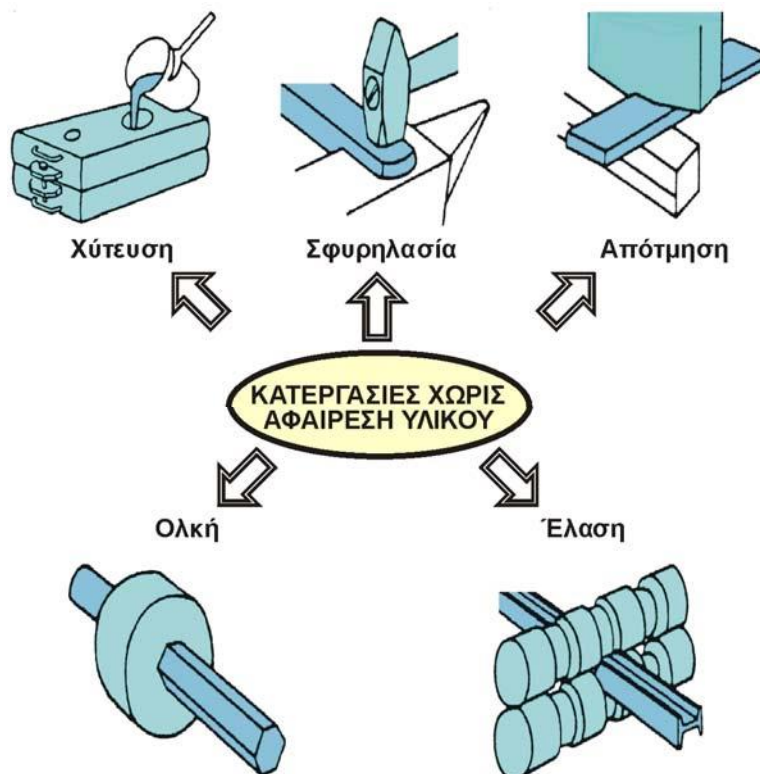


Σχήμα 2.2 : Γενική επισκόπηση των μεθόδων παραγωγής και κατεργασιών

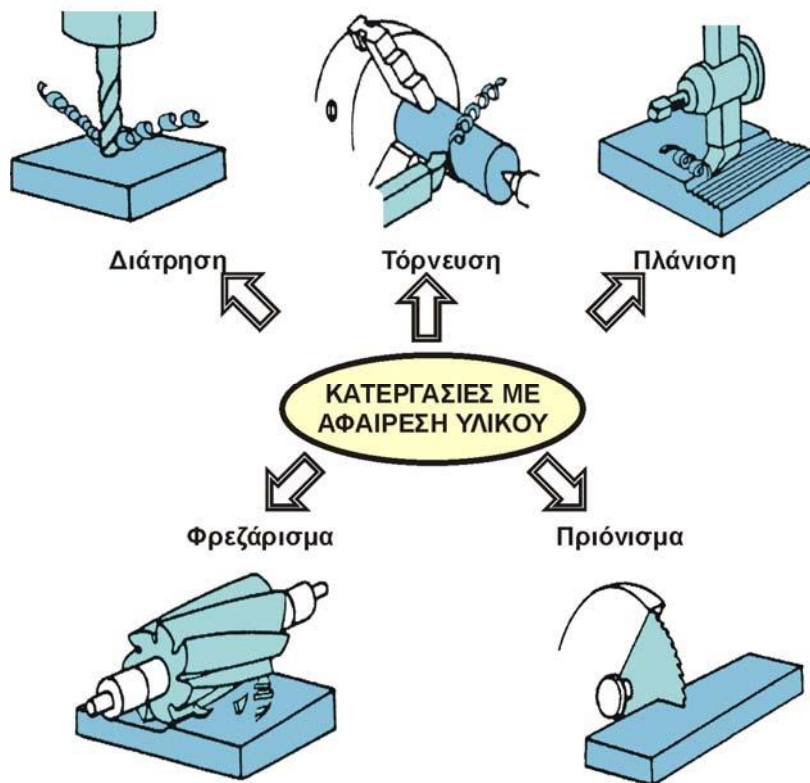
Η κατάταξη των κατεργασιών μπορεί να γίνει με βάση τη θερμοκρασία, (θερμηλασία, ψυχρηλασία), με βάση τη διαδικασία παραμόρφωσης και του τρόπου χειρισμού του μετάλλου, (παραγωγή προϊόντων με πλαστική παραμόρφωση ή απ' ευθείας κοπή).[Καρούζος, 2003]

2.4 Ταξινόμηση μηχανουργικών κατεργασιών

Οι μηχανουργικές κατεργασίες διακρίνονται σε κατεργασίες χωρίς αφαίρεση υλικού (Σχήμα 2.3), όπως είναι η χύτευση, η σφυρηλασία, η απότμηση, η ολκή, έλαση κλπ και σε κατεργασίες με αφαίρεση υλικού (Σχήμα 2.4), όπως είναι η διάτρηση, η τόννευση, η πλάνιση, το φρεζάρισμα, πρίονισμα κλπ. [Μανσούρ, 2010].



Σχήμα 2.3 : Κατεργασίες χωρίς αφαίρεση υλικού



Σχήμα 2.4 : Κατεργασίες με αφαίρεση υλικού

Οι κατεργασίες διαμόρφωσης ενός εξαρτήματος με αφαίρεση υλικού ονομάζονται μηχανουργικές κατεργασίες. Έχουν συνήθως μεγαλύτερο κόστος από τις μεθόδους μηχανικής διαμόρφωσης, λόγω της αφαίρεσης υλικού. Με τη σταδιακή αφαίρεση υλικού επιτυγχάνεται μεγαλύτερη διαστατική ακρίβεια και καλύτερη ποιότητα επιφανείας. Η αφαίρεση υλικού με τη μορφή απόβλητου μπορεί να γίνεται χειροκίνητα με τη χρήση εργαλείων χειρός, όπως η λίμα, το πριόνι κ.ά., ή με κατάλληλες εργαλειομηχανές, όπως είναι ο τόρνος, η φρέζα, η πλάνη, το δράπανο κ.λπ.

Επίσης, οι μηχανουργικές κατεργασίες με αφαίρεση υλικού διακρίνονται σε συμβατικές και μη συμβατικές ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη ενέργεια και εξοπλισμό.

Οι συμβατικές χρησιμοποιούν μηχανική ενέργεια και πραγματοποιούνται από τις συνήθεις εργαλειομηχανές, ενώ οι μη συμβατικές χρησιμοποιούν για την αφαίρεση υλικού άλλου είδους ενέργεια (ηλεκτρική, θερμική, χημική, μηχανική) και πραγματοποιούνται από διαφορετικές διατάξεις – εργαλειομηχανές, ανάλογα με την κατεργασία.

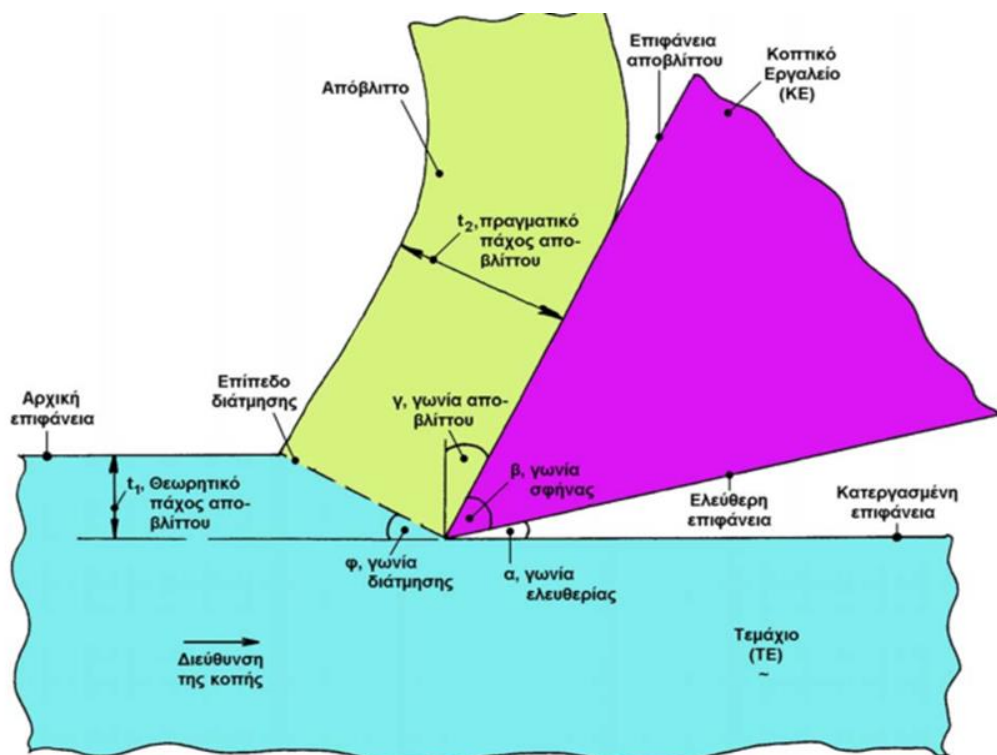
2.5 Συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες

2.5.1 Κατεργασίες Κοπής

Η κοπή είναι, κατά πάσα πιθανότητα, η πιο διαδεδομένη κατασκευαστική διαδικασία. Είναι μέρος της καθημερινής πρακτικής μας εμπειρίας, αν και όχι τόσο ως μέθοδος παραγωγής προϊόντων, πάντως σίγουρα ως οικιακή εφαρμογή, όπως π.χ. κόψιμο ψωμιού, νυχιών, υφάσματος, χαρτιού, κλπ.

Με τις κατεργασίες κοπής ένα τεμάχιο διαμορφώνεται σε μικρότερα σχήματα για περαιτέρω επεξεργασία ή στο τελικό του σχήμα, όπως αυτό ορίζεται στο κατασκευαστικό του σχέδιο. Το τελικό σχήμα επιτυγχάνεται με αφαίρεση του πλεονάζοντος υλικού μηχανικά, με τη βοήθεια ενός ή περισσοτέρων κοπτικών εργαλείων που είναι προσαρμοσμένα σε μια εργαλειομηχανή.

Με οποιοδήποτε τρόπο και με οποιοδήποτε σκοπό και αν γίνεται η κοπή, οι βασικές αρχές της είναι οι ίδιες, όπως φαίνονται στο σχήμα 2.5 (ASM, vol 16).

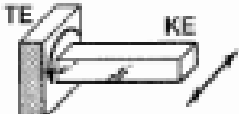










Σχήμα 2.5 : Βασικές έννοιες της κοπής

Το κοπτικό εργαλείο (ΚΕ) κινείται σε σχέση προς το τεμάχιο (ΤΕ) σε συγκεκριμένη κατεύθυνση (διεύθυνση κοπής) με ταχύτητα v , ενώ συγχρόνως σχηματίζεται το απόβλητο που κινείται επί του ΚΕ μετά από ισχυρή πλαστική παραμόρφωσή του. Η μορφοποίηση του τεμαχίου επιτυγχάνεται με συνδυασμό πλαστικής παραμόρφωσης σε διάτμηση και αποβολή υλικού (τόρνευση, διάτρηση, φρεζάρισμα, λείανση κ.λπ.).

Το αφαιρούμενο υλικό ονομάζεται απόβλητο (γρέζι) η μορφή του οποίου ποικίλλει, ανάλογα με τη κατεργασία και τις τιμές των παραμέτρων της κοπής, το εργαλείο κοπής και το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Ορισμένες κατεργασίες επιπέδων επιφανειών εικονίζονται στο παρακάτω σχήμα 2.6.

ΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ
	Τόρνευση
	Πλάνισμα
	Φρεζάρισμα
	Φρεζάρισμα
	Φρεζάρισμα
	Λείανση
	Broaching
	Πλάνισμα
	Φρεζάρισμα

Σχήμα 2.6 : Κατεργασίες επίπεδων επιφανειών.

Στις παραπάνω περιπτώσεις οι βασικές μας απαιτήσεις κατά την κοπή είναι δύο: η ελαχιστοποίηση της απώλειας υλικού (φύρα) και η εξασφάλιση ότι τα παραγόμενα τεμάχια δεν επηρεάζονται από τη διαδικασία κοπής.

Το απόβλητο, που πάντοτε παράγεται κατά την κοπή, συνήθως δεν είναι επαναχρησιμοποιήσιμο. Οι λόγοι γι' αυτό είναι ότι έχει μολυνθεί με τα υγρά κοπής και έχει υποστεί αλλαγές στη μικρογραφική του δομή. Επίσης, αναλόγως των συνθηκών κοπής και της φύσης του υλικού μπορεί να έχει οξειδωθεί, έτσι ώστε η ανακύκλωση του να είναι δύσκολη και δαπανηρή.

Για την επιλογή της μεθόδου κατεργασίας κοπής λαμβάνεται υπόψη η κατεργασιμότητα του υλικού, η γεωμετρία του τεμαχίου, η απαιτούμενη ποιότητα επιφανείας, οι διαστασιακές ανοχές και ο όγκος παραγωγής.

2.5.2 Ψαλιδισμός (Shearing) – Απότμηση

Η κοπή με ψαλιδισμό είναι μια διαδικασία διαχωρισμού μεταλλικών ελασμάτων και φύλλων (και όχι διαμόρφωσης) χωρίς αφαίρεση υλικού. [Παραδεισιάδης, 2012]

Τα μέσα που χρησιμοποιούνται είναι τα ψαλίδια χειριού, μηχανικά και ηλεκτροϋδραυλικά ψαλίδια για πάχος ελάσματος έως 5mm.

Είναι ο ευκολότερος τρόπος για να γίνει κοπή του ελάσματος σε μία ευθεία γραμμή ασκώντας τεράστια δύναμη κατά μήκος μίας ευθεία γραμμής. [Frisch D.-S., 1998]

Υπάρχουν, επίσης τα ψαλίδια ευθείας κοπής (καρμανιόλα – guillotine shearing machine), όπου το πάχος της μεταλλικής πλάκας μπορεί να φτάσει τα 50mm και το πλάτος τους έως και 6m. Σχήμα 2.7 [ASM, vol. 14].

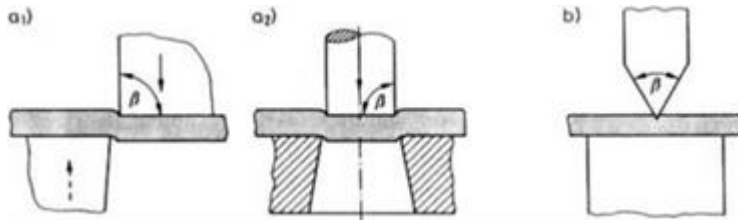
Φυσικά σε κάθε περίπτωση λαμβάνεται υπόψη το πάχος του ελάσματος, το είδος του υλικού, η μορφή και το μέγεθος της κοπής κα. [Παρίκος, 1995]



Σχήμα 2.7: Ηλεκτροϋδραυλικό Ψαλίδι

2.5.3 Μηχανισμός κοπής - απότμησης

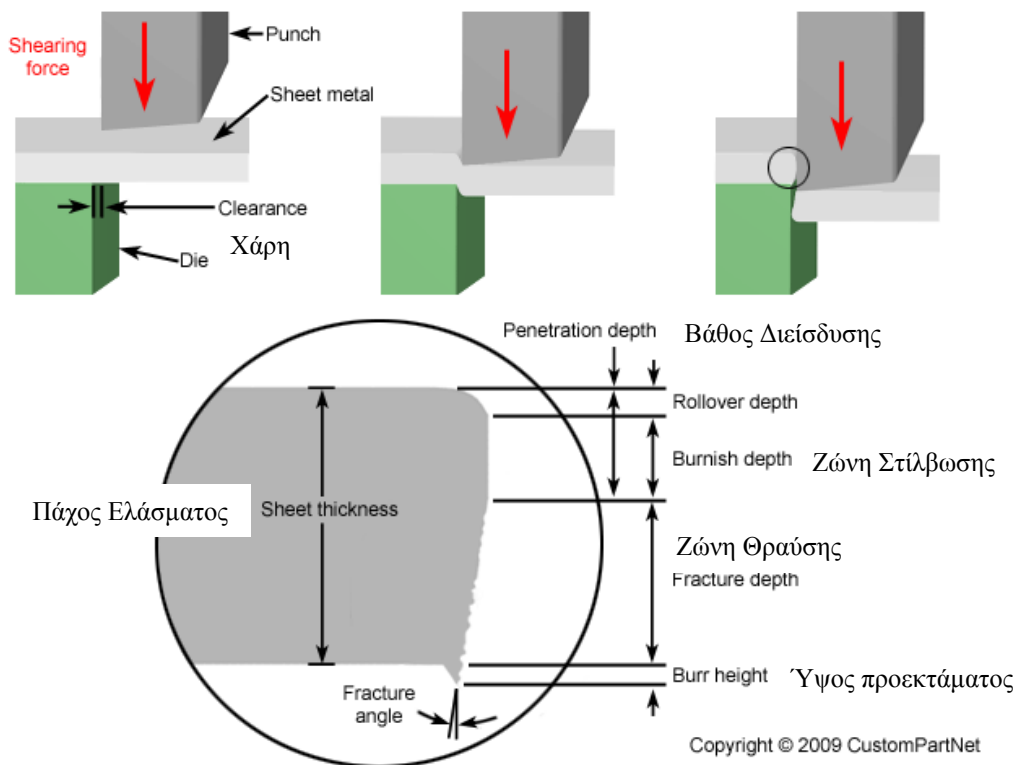
Η κοπή διακρίνεται σε κοπή με δύο στοιχεία που είναι η συνηθέστερη και σε κοπή με ένα στοιχείο που χρησιμοποιείται σπάνια, σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8 Διαδικασίες κοπής: α1) Κοπή ανοικτής γραμμής με δύο στοιχεία
α2) Κοπή κλειστού περιγράμματος με δύο στοιχεία (απότμηση)
b) Κοπή με ένα στοιχείο

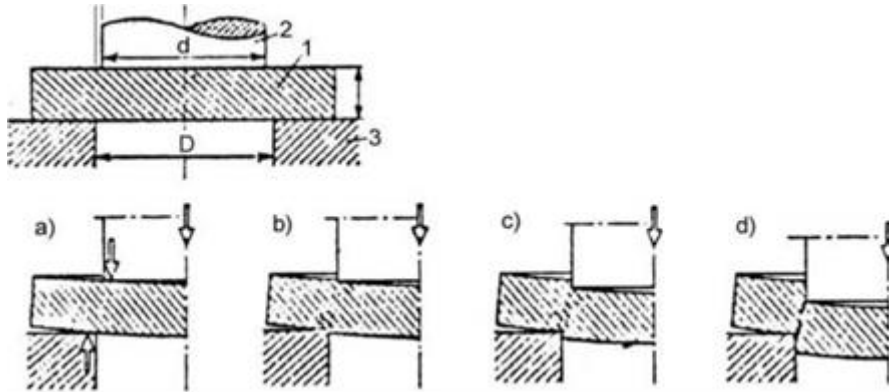
Ο μηχανισμός απότμησης περιλαμβάνει διατμητική καταπόνηση του υλικού του ελάσματος μέχρι τη θραύση του.

Οι φάσεις εξέλιξης της διαδικασίας κοπής με δύο στοιχεία φαίνονται στα σχήματα 2.9 και 2.10.



Σχήμα 2.9 : Φάσεις κατά την κοπή και προκύπτουσα επιφάνεια

Το διάκενο μεταξύ εμβόλου (2) και μήτρας (3) ονομάζεται χάρη (clearance) κι έχει σημαντική επίδραση στην όλη διαδικασία.



Σχήμα 2.10: Φάσεις εξέλιξης της διαδικασίας κοπής:

- a) Ελαστικής παραμόρφωσης
- b) Ελαστοπλαστικής παραμόρφωσης
- c) Πλαστικής ροής (εμφάνιση ρωγμών, πρώτα στην κάτω επιφάνεια και μετά στην πάνω)
- d) Θραύσης (επέκταση των ρωγμών).

Όταν το εργαλείο προσκρούσει στο μεταλλικό φύλλο:

(α) Στην αρχή συμβαίνει ελαστική συμπίεση αυτού μεταξύ εμβόλου/μήτρας συνοδευόμενη από ελαφρά διείσδυση των κόψεων μέσα σ' αυτό.

(β) Κατόπιν συμβαίνει περαιτέρω διείσδυση του εμβόλου, η χάρη μεταξύ υλικού κι εργαλείου επιτρέπει την πλαστική ροή του υλικού, μείωση της διατομής αποχωρισμού. Εμφάνιση περιοχής στίλβωσης.

(γ) Εμφάνιση ζωνών διατμητικής θραύσης στην επιφάνεια απότμησης.

(δ) Επέκταση των ζωνών θραύσης μέχρι συναντήσεώς τους, οπότε προκαλείται αποχωρισμός του υλικού.

Η σωστή χάρη είναι πολύ σημαντική για το τελικό προϊόν.

2.5.4 Πριόνια – Κορδέλες

Τα πριόνια (Bandsawing) είναι εργαλεία που χρησιμοποιούν μία συνεχόμενη οδοντωτή λεπίδα μετάλλου για να κόψουν το υλικό.

Η πριονοκορδέλα περιστρέφεται ατέρμονα μεταξύ δύο ή περισσότερων τροχών. Πρέπει να είναι λεπτή, ώστε να περιστρέφεται μεταξύ των τροχών, αλλά ικανή να αντέξει τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κατά την κοπή.

Μπορεί να είναι σε οριζόντια ή κάθετη διάταξη. Σχήμα 2.11.

Κατά την κοπή μπορεί να χρησιμοποιηθούν και υγρά κοπής.

Λόγω του λεπτού πάχους της κορδέλας απαιτείται λιγότερη ενέργεια και η προκύπτουσα κοπή έχει μικρή εντομή (1,6mm). Αυτό συνεπάγεται οικονομία υλικού.

Επίσης, το αποβληθέν υλικό είναι σε μορφή κομματιών και όχι μικρών αποβλήτων. Ακόμα λόγω της συνεχούς ομοιόμορφης κοπής η φθορά στην κορδέλα γίνεται επίσης ομοιόμορφα [ASM, vol. 16].

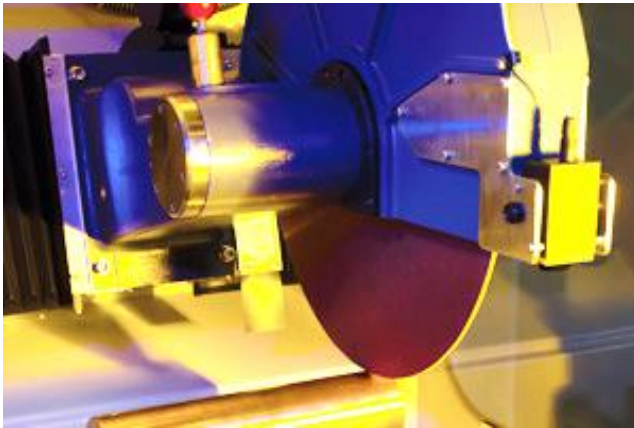


Σχήμα 2.11: Πριονοκορδέλες σε οριζόντια και σε κάθετη διάταξη

2.5.5 Κοπτικοί – λειαντικοί τροχοί

Ο κοπτικός τροχός, σχήμα 2.12, είναι ένας αναλώσιμος τροχός που αποτελείται από σκληρό – λειαντικό υλικό από σωματίδια που έχουν συσσωματωθεί σε ένα κυκλικό σχήμα. Περιστρέφεται και εισχωρεί στο υλικό οριζόντια, κάθετα ή υπό γωνία κόβοντάς το. Είναι μέθοδος με υψηλή ακρίβεια λόγω της ακαμψίας της μηχανής και τροχού και παράγει επιφάνειες μικρής τραχύτητας, που συχνά δε χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία.

Η προκύπτουσα εντομή κατά την κοπή είναι μεγαλύτερη από αυτή μιας πριονοκορδέλας, αλλά ο τροχός αντέχει σε μεγαλύτερες καταπονήσεις κατά την κοπή [ASM, vol. 16].



Σχήμα 2.12 : Κοπτικός τροχός.

2.5.6 Υλικά Εργαλείων Κοπής

Κάθε μηχανουργική κατεργασία συνοδεύεται από πλαστική παραμόρφωση και τριβή, με αποτέλεσμα τη θέρμανση του κοπτικού εργαλείου και τη μείωση της αντοχής του στη φθορά.

Είναι, λοιπόν, ευνόητο ότι το εργαλείο πρέπει να έχει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή και να είναι σκληρότερο από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το οποίο πρέπει κατ' αρχήν, να μπορεί να παραμορφωθεί, να είναι δηλαδή όλκιμο. Επίσης, το κοπτικό εργαλείο πρέπει να έχει αυστηρά καθορισμένη και μελετημένη γεωμετρία, προσαρμοσμένη κάθε φορά στο είδος του υλικού που θα κατεργαστεί.

Τα συμβατικά εργαλεία κοπής άλλοτε έχουν γεωμετρικά καθορισμένη μορφή, όπως ο τόρνος, το δράπανο, η πλάνη, η φρεζομηχανή και άλλοτε ακαθόριστη, όπως συμβαίνει με τους κοπτικούς κόκκους του λειαντικού τροχού. Επίσης, η κόψη του εργαλείου μπορεί να είναι μία (τόρνος, πλάνη) ή περισσότερες (τρύπανο, γλύφανο, φρέζα).

Η συνδυαστική χρήση των κοπτικών εργαλείων καθιστά πιο ευέλικτη τη διαδικασία μορφοποίησης του υλικού.

Το υλικό κατασκευής τους είναι συνήθως ανθρακούχος χάλυβας με άνθρακα 0,6-1,5% και λίγο Mn, Si, Cr, ταχυχάλυβες, σκληρομέταλλα (WC, TiC), κράματα Co χύτευσης (στελλίτες), Cermets (κεραμικά με συνδετικό υλικό μέταλλο), υπέρσκληρα υλικά (διαμάντια, CBN) κ.λπ.

Με την πάροδο του χρόνου και χρήση παρουσιάζεται άμβλυνση της κόψης ή των κόψεων του εργαλείου (στόμωμα του εργαλείου). Η αλλαγή της γεωμετρίας του προκαλούν μεγαλύτερο βέλος κάμψης του τεμαχίου και πιθανούς κραδασμούς (τριξίμο), που εκδηλώνονται με την εκπομπή χαρακτηριστικού ήχου (μάγκωμα - άρπαγμα) στο σημείο επαφής εργαλείου και τεμαχίου. Για το λόγο αυτό επιβάλλεται η αντικατάσταση του κοπτικού εργαλείου στην βέλτιστη χρονική στιγμή για την απρόσκοπτη συνέχιση της παραγωγής, τη διατήρηση της ποιότητας και την ασφάλεια των εργαζομένων.

Εξίσου σημαντική με την επιλογή του κοπτικού εργαλείου είναι και η επιλογή της συγκρατητικής μηχανής (π.χ. τσοκ στο τόρνο, μέγγενη ή σφιγκτήρες στο δράπανο, ιδιοσυσκευές (jigs) κλπ.) για τη σωστή στήριξη του τεμαχίου και την πρόσδοση σε αυτό της απαιτούμενης ακρίβειας. Ανάλογα με το συνδυασμό υλικού τεμαχίου - υλικού κοπτικού εργαλείου επιλέγεται το σωστό υγρό κοπής για τα καλύτερα αποτελέσματα [Τσαλαπάτης, 1998].

2.6 Μη συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες

2.6.1 Γενικά.

Με τις συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες η κατεργασία των κομματιών γίνεται με την αφαίρεση υλικού σε μορφή απόβλητου. Λόγω των θλιπτικών και διατμητικών τάσεων, υπάρχουν περιορισμοί και μειονεκτήματα, με κυριότερα την υψηλή κατανάλωση ενέργειας, την παραμόρφωση του αντικειμένου και την ανάγκη περαιτέρω επεξεργασίας του για την απάλειψή τους. Έτσι υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι συμβατικές κατεργασίες δε μπορούν να εφαρμοστούν για διάφορους λόγους, όπως :

- Η σκληρότητα και η αντοχή του υλικού του κομματιού είναι πολύ υψηλή (τυπικά, σκληρότητα > 400 HB) ή/και είναι πολύ εύθραυστο.
- Το κομμάτι είναι πολύ ευλύγιστο ή λεπτό ή ευπαθές για να αντέξει τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη κοπή ή τη λείανση ή είναι αδύνατο να στερεωθεί στην εργαλειομηχανή ικανοποιητικά, με τα διαθέσιμα μέσα συγκράτησης.
- Το σχήμα του κομματιού είναι περίπλοκο, με εξωτερικές και εσωτερικές διαμορφώσεις ή πρέπει να ανοιχτούν οπές εξαιρετικά μικρής διαμέτρου (π.χ. οπές σε μπεκ καυσίμου για Μ.Ε.Κ. (ζιγκλέρ) έχουν, τυπικά, διάμετρο 0,15 - 0,20 mm και ανοίγονται σε τοίχωμα πάχους 1-1,2 mm).
- Η ποιότητα επιφάνειας και οι διαστασιακές ανοχές πρέπει να είναι ανώτερες απ' αυτές που αποδίδονται με τις συμβατικές κατεργασίες κοπής ή λείανσης.
- Δεν επιτρέπεται η άνοδος της θερμοκρασίας του κομματιού.

Τα παραπάνω, σε συνδυασμό και με την ολοένα και πιο συχνή χρήση πια νέων υλικών, υψηλών απαιτήσεων, όπως, σύνθετα, κεραμικά, πολυμερή υψηλών αντοχών, κλπ. οδήγησαν στην ανάπτυξη και εφαρμογή, από τις αρχές της δεκαετίας του 1940, νέων μεθόδων κατεργασίας με αφαίρεση υλικού, των λεγόμενων μη συμβατικών μηχανουργικών κατεργασιών [Τσαλαπάτης, 1998].

Αυτές οι κατεργασίες χωρίζονται σε τέσσερις ομάδες, ανάλογα με τη μορφή ενέργειας που χρησιμοποιούν.

2.6.2 Ομάδες των Μη Συμβατικών Μηχανουργικών Κατεργασιών

α. Μηχανικές μέθοδοι.

Μ' αυτές, η αφαίρεση υλικού γίνεται με εφαρμογή της δράσης εκτριβής λειαντικών ή υπερλειαντικών υλικών. Εφαρμόζονται σε περιπτώσεις υλικών όπως, σύνθετα, κεραμικά και οργανικά υλικά, τα οποία είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και είναι ευαίσθητα σε θερμικά φορτία.

β. Ηλεκτρικές μέθοδοι.

Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε υλικά που είναι ηλεκτρικά αγωγίμα. Μπορούν να παραχθούν πολύπλοκες μορφές με ένα πάσσο και στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει φθορά του χρησιμοποιούμενου εργαλείου.

γ. Θερμικές μέθοδοι.

Στις θερμικές μεθόδους περιλαμβάνονται δύο από τις μη συμβατικές μεθόδους κατεργασίας η χρήση των οποίων εξαπλώνεται με ταχύ ρυθμό, η ηλεκτροδιάβρωση και η χρήση laser. Επειδή μ' αυτές τις μεθόδους γίνεται χρήση της θερμικής ενέργειας, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να απαιτηθεί η αφαίρεση από τα κομμάτια τυχόν θερμικά επηρεασμένων ζωνών.

δ. Χημικές μέθοδοι.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των μεθόδων αυτής της ομάδας είναι ο μεγάλος ρυθμός αφαίρεσης υλικού και ο υψηλός ρυθμός παραγωγής. Εφαρμόζονται ευρύτατα στη παραγωγή ελατηρίων, φύλλων οπλισμού ηλεκτροκινητήρων, εξαρτήματα ηλεκτρονικών συσκευών, κ.τ.ό., δηλαδή μεγάλης, σε σειρά, παραγωγής. Επειδή με τις μεθόδους αυτές η αφαίρεση υλικού γίνεται με χημική δράση, δεν εξασκούνται δυνάμεις πάνω στα κομμάτια και έτσι δεν υπάρχει κίνδυνος παραμόρφωσης τους ή πρόκλησης άλλης ζημιάς. Η χημική δράση και επομένως και η κατεργασία συμβαίνει ταυτόχρονα σε όλες τις επιφάνειες του κομματιού και γι' αυτό το λόγο ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού είναι υψηλός, τόσο ώστε να μπορεί να συγκριθεί μ' αυτόν των συμβατικών κατεργασιών κοπής υψηλού όγκου παραγωγής.

Στον πίνακα 2.1 που ακολουθεί αναφέρονται οι διάφορες, σε χρήση, μη συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες, κατανεμημένες στις ομάδες που αναφέρθηκαν πιο πριν.

Πίνακας 2.1 : Μη Συμβατικές Μηχανουργικές Κατεργασίες.

<p>A. Μηχανικές.</p> <ol style="list-style-type: none">1. Εκτριβή με λειαντικούς κόκκους σε ρεύμα αερίου υψηλής ταχύτητας.2. Εκτριβή με λειαντικούς κόκκους σε ρευστό υψηλού ιξώδους.3. Υδατοκοπή.4. Υδατοκοπή με λειαντικούς κόκκους.5. Υπέρηχοι.
<p>B. Ηλεκτρικές.</p> <ol style="list-style-type: none">1. Ηλεκτροχημική κατεργασία.2. Ηλεκτροχημική λείανση.3. Λείανση με ηλεκτροχημική διάβρωση.4. Διάτρηση με ροή ηλεκτρολύτη.5. Ηλεκτρολυτική κατεργασία.
<p>Γ. Θερμικές.</p> <ol style="list-style-type: none">1. Ηλεκτροδιάβρωση.2. Ηλεκτροδιάβρωση με σύρμα κοπής.3. Ηλεκτροδιάβρωση με εκτριβή.4. Δέσμη ηλεκτρονίων.5. Laser.6. θερμική ενέργεια.
<p>Δ. Χημικές.</p> <ol style="list-style-type: none">1. Αφαίρεση υλικού με χημική δράση.2. Αφαίρεση υλικού με φωτοχημική δράση.

Συγκρινόμενες με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας κοπής, οι μη συμβατικές, έχουν απεριόριστες δυνατότητες και το μόνο σημείο στο οποίο, προς το παρόν τουλάχιστο, υστερούν, είναι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού. Στο μεγαλύτερο ποσοστό τους οι εργαλειομηχανές των μη συμβατικών μεθόδων είναι του τύπου CNC. Πάντως, τουλάχιστον για το εγγύς μέλλον, οι μέθοδοι αυτές δεν θα αντικαταστήσουν τις συμβατικές μεθόδους, τόσο για λόγους κόστους παγίου κεφαλαίου και επισκευής και συντήρησης, όσο και ανάγκης ύπαρξης υψηλά εξειδικευμένου προσωπικού αλλά και απαίτησης παράλληλων βοηθητικών εγκαταστάσεων [ASM, vol. 16].

2.6.3 Μελλοντικές τάσεις στις μηχανουργικές κατεργασίες

Οι μηχανουργικές κατεργασίες είναι παραγωγικές μέθοδοι υπό συνεχή εξέλιξη. Η εξέλιξη αφενός συνίσταται στην εμφάνιση νέων υλικών και τη συνακόλουθη τελειοποίηση των κοπτικών εργαλείων και των εργαλειομηχανών για την κατεργασία αυτών.

Νεότερα υλικά θα εμφανιστούν πέρα από τα γνωστά παραδοσιακά υλικά, όπως κράματα τελευταίας γενιάς αλουμινίου - λιθίου, τιτανίου, κραματωμένοι χάλυβες, υπερκράματα, σύνθετα με μεταλλική μήτρα κι ενίσχυση με μονοκρυστάλλους (whisker) SiC, υψηλής αντοχής και υψηλής θερμοκρασίας κράματα κονιομεταλλουργίας. Τα υλικά αυτά, χάρη στις συνέχεια τελειοποιούμενες μεθόδους κατεργασίας τους, γίνονται όλο και πιο ισχυρά και σκληρά και κατά συνέπεια καθίσταται όλο και πιο δύσκολη η μηχανουργική κατεργασία τους με τα έως τώρα διαθέσιμα μέσα.

Οπότε η εξέλιξη στον τομέα αυτό οδηγεί αφ' ενός σε πιο τελειοποιημένα επιστρώματα των κοπτικών εργαλείων που θα βελτιώσουν τη διάρκεια ζωής τους και την αποτελεσματικότητά τους και αφ' ετέρου σε πιο καλοσχεδιασμένες και αποτελεσματικές εργαλειομηχανές.

Επίσης, η ολοένα αυξανόμενη χρήση υλικών όπως, κεραμικά, σύνθετα, πολυμερή υψηλών αντοχών, ηλεκτρονικά υλικά, θα οδηγήσει στην ανάπτυξη και πιο εκτεταμένη εφαρμογή μη συμβατικών μηχανουργικών κατεργασιών. Επιπρόσθετα θα εξελιχθεί και η κατεργασία της λείανσης τόσο σε μέθοδος, όσο και από την άποψη της χρήσης υπερσκληρών λειαντικών υλικών όπως διαμάντι ή CBN (Cubic Boron Nitride - νιτρίδιο του Βορίου, κυβικής δομής).

Παλαιότερα οι κατεργασίες γίνονταν σε διαδοχικά στάδια, συνήθως χειροκίνητα και η τάση ήταν κάθε στάδιο να προσπαθεί να γίνεται όλο και πιο γρήγορα. Στις μέρες μας όμως, λόγω και της οικονομικής κρίσης, και με σεβασμό στο περιβάλλον η τάση είναι η βελτιστοποίηση στο τελικό προϊόν από πλευράς απώλειας υλικού, ποιότητας και χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας. Έχουν εμφανιστεί λοιπόν μεγάλες αυτοματοποιημένες μονάδες – εργαλειομηχανές που ενσωματώνουν πολλά από τα διαδοχικά στάδια επεξεργασίας από την παραγωγή έως και την αποθήκευση σε μία γραμμή παραγωγής που παρακολουθείται μέσω υπολογιστών.

Στο πεδίο της μορφοποίησης λοιπόν, η τάση είναι να προκύπτει κατά την επεξεργασία όσο το δυνατόν πιο τελικό προϊόν (net or near-net shape), που να μη χρειάζεται περαιτέρω

επεξεργασία για οικονομία υλικού και οικονομία της μεθόδου. Έτσι αναπτύσσεται η ισόθερμη σφυρηλάτηση, η σφυρηλάτηση μέσω θερμής μήτρας και η υπερπλαστική (superplastic) μορφοποίηση για τα μεταλλικά φύλλα.

Επίσης, με την πτώση των τιμών των υπολογιστών και των ηλεκτρονικών μερών και την ανάπτυξη φιλικού προς το χρήστη software, η αναμενόμενη βελτίωση των κοπτικών εργαλείων θα οδηγήσει αναπόφευκτα στην αύξηση κι εξέλιξη των συνηθισμένων εργαλειομηχανών σε «έξυπνες μηχανές». Οι εργαλειομηχανές CNC (Computer Numerical Control) θα είναι εφοδιασμένες με υπολογιστές και αισθητήρες, που μέσω καταλλήλων αλγόριθμων και προγραμματισμού, θα μπορούν να εκτελούν συνεχώς μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, πάνω στο παραγόμενο τεμάχιο και στις παραμέτρους κοπής και να επιφέρουν, όποτε χρειάζεται, τις κατάλληλες μεταβολές, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή ποιότητα και ακρίβεια κοπής, παρά να ελαχιστοποιείται το κόστος ή ο χρόνος παραγωγής.

Επίσης μέσω των υπολογιστών μπορεί να γίνεται και προσομοίωση της σχεδίασης και κατεργασίας του προϊόντος, που οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα από πλευράς χρόνου, οικονομίας και παράδοσης. [Τσαλαπάτης, 1998, ASM vol. 16].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΛΕΙΖΕΡ

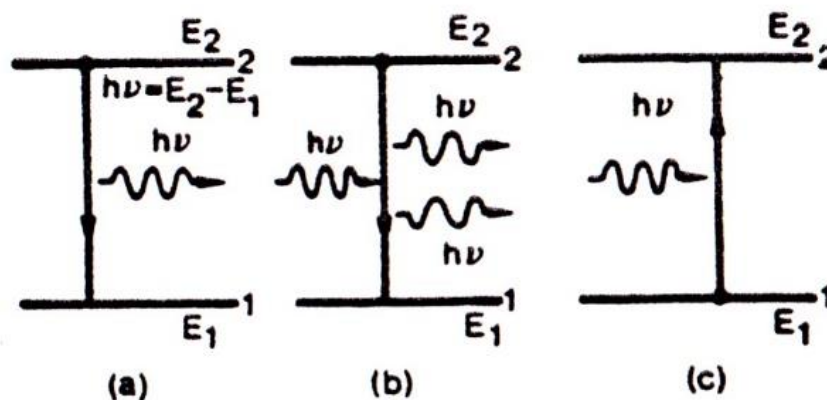
3.1 Αρχή λειτουργίας

Ο όρος λέιζερ (LASER: light amplification by stimulated emission of radiation), που αποδίδεται στα ελληνικά ως ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας, καλύπτει τόσο τις συσκευές που την παράγουν όσο και την αντίστοιχη ακτινοβολία. Η λειτουργία του λέιζερ ερμηνεύεται από τη θεωρία της κβαντικής μηχανικής και της θερμοδυναμικής.

Το λέιζερ εκμεταλλεύεται τρία βασικά φαινόμενα που συμβαίνουν, όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα αλληλεπιδρά με ένα υλικό, δηλαδή τις διεργασίες της αυθόρμητης και εξαναγκασμένης εκπομπής και τη διεργασία της απορρόφησης.

Στο έργο του ιταλού καθηγητή της πολυτεχνικής σχολής του Μιλάνου Orazio Svelto *Principles of Lasers* (ελληνική μετάφραση από τους Γ. Κουρούκλη και Α. Σεραφετινίδη) γίνεται μια εμπειριστατωμένη ανάλυση των διεργασιών αυτών.

Θεωρώντας 2 ενεργειακά επίπεδα 1 και 2 κάποιου υλικού με ενέργειες E_1 και E_2 ($E_1 < E_2$) μπορεί να συμβούν οι διεργασίες, όπως στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: a) αυθόρμητη εκπομπή, b) εξαναγκασμένη εκπομπή c) απορρόφηση

Υποθέτουμε ότι κάποιο άτομο βρίσκεται αρχικά στο επίπεδο 2. Αφού $E_2 > E_1$ το άτομο θα έχει την τάση να μεταβεί στο επίπεδο μικρότερης ενέργειας E_1 και να αποδιεγερθεί. Η ενεργειακή διαφορά $E_2 - E_1$ ελευθερώνεται από το άτομο με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος συχνότητας

$$\nu = \frac{(E_2 - E_1)}{h}$$

Όπου h η σταθερά του Planck

Η διεργασία αυτή ονομάζεται αυθόρμητη εκπομπή και χαρακτηρίζεται από την εκπομπή ενός φωτονίου ενέργειας $h\nu = E_2 - E_1$.

Ας υποθέσουμε ότι το άτομο βρίσκεται αρχικά στο επίπεδο 2 και ότι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας ν (ίσης με αυτή της αυθόρμητης εκπομπής) προσπίπτει στο υλικό. Αφού το προσπίπτον κύμα έχει την ίδια συχνότητα με τη συχνότητα του ατόμου, υπάρχει μία πιθανότητα ότι αυτό το κύμα θα εξαναγκάσει το άτομο να υποστεί τη μετάπτωση $E_2 - E_1$. Σε αυτή την περίπτωση η ενεργειακή διαφορά αποδίδεται με τη μορφή ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος που προστίθεται στο προσπίπτον. Πρόκειται για το φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής, όπου η εκπομπή κάθε ατόμου είναι σε φάση με το προσπίπτον κύμα.

Ας υποθέσουμε ότι το άτομο βρίσκεται στο επίπεδο 1. Αν είναι το βασικό επίπεδο τότε το άτομο θα παραμείνει εκεί αν δεν δεχτεί κάποιο εξωτερικό ερέθισμα. Αν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας ν (ίσης με αυτή της αυθόρμητης εκπομπής) προσπέσει στο υλικό υπάρχει μία πιθανότητα το άτομο να διεγερθεί στο επίπεδο 2. Η διαφορά ενέργειας $E_2 - E_1$ που απαιτείται για τη μετάπτωση αυτή παρέχεται από την ενέργεια του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος και η διεργασία αυτή καλείται απορρόφηση.

Στην ορολογία των φωτονίων οι διεργασίες αυτές περιγράφονται ως εξής: Κατά τη διεργασία της αυθόρμητης εκπομπής το άτομο αποδιαγείρεται από το επίπεδο 2 στο 1 με την απελευθέρωση ενός φωτονίου. Στην εξαναγκασμένη εκπομπή το προσπίπτον φωτόνιο προκαλεί τη μετάπτωση $2 \rightarrow 1$ και έχουμε τότε 2 φωτόνια. Στη διεργασία της απορρόφησης το προσπίπτον φωτόνιο απορροφάται προξενώντας τη μετάπτωση 1-2.

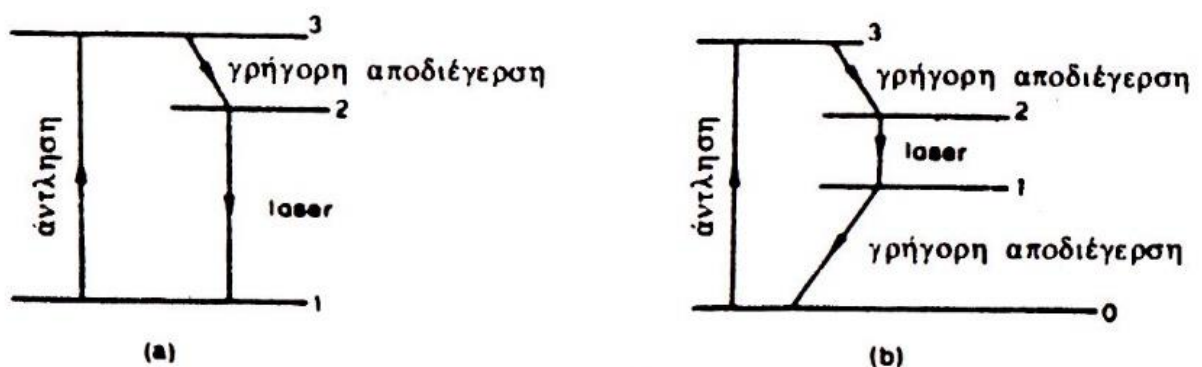
Στην περίπτωση που ο πληθυσμός των ατόμων N_2 στο ενεργειακό επίπεδο 2 είναι μεγαλύτερος από αυτόν στο ενεργειακό επίπεδο 1, ($N_2 > N_1$) υπάρχει αντιστροφή πληθυσμού και το υλικό μας (ενεργό μέσο) θα δράσει ως ενισχυτής. Τότε ένα φωτόνιο συχνότητας ν προσπίπτει στο διεγερμένο άτομο και το παρακινεί να μεταπέσει στην αρχική του στάθμη με την ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου συχνότητας ν . Με την εκπομπή του δεύτερου φωτονίου παρατηρείται μια ενίσχυση στον αριθμό των φωτονίων από ένα σε δύο, που με τη σειρά τους θα αποδιαγείρουν άλλα 2 άτομα και τα φωτόνια θα αυξηθούν στα 4 κοκ.

Η διαδικασία αυτής της ενίσχυσης δίνει το όνομα στο λέιζερ.

Εάν η συχνότητα μετάπτωσης εμπίπτει στη μικροκυματική περιοχή ο ενισχυτής ονομάζεται maser (microwave amplification by stimulated emission of radiation). Αν η συχνότητα ανήκει στην οπτική περιοχή η λέξη microwave αντικαθίσταται από το light κι ο ενισχυτής ονομάζεται laser. Στην πράξη ο όρος laser χρησιμοποιείται για κάθε συχνότητα (υπέρυθρο, υπεριώδες, ακτίνες X).

Βασική προϋπόθεση είναι ότι τα άτομα στη στάθμη διέγερσης πρέπει να είναι περισσότερα απ' αυτά στην αρχική στάθμη. Αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί με 2 ενεργειακά επίπεδα, όπου η εξαναγκασμένη εκπομπή και απορρόφηση θα αντιστάθμιζε η μία την άλλη.

Η αντιστροφή πληθυσμών όμως μπορεί να επιτευχθεί στην περίπτωση που υπάρχουν 2 ή και 3 ενεργειακά επίπεδα, σχήμα 3.2



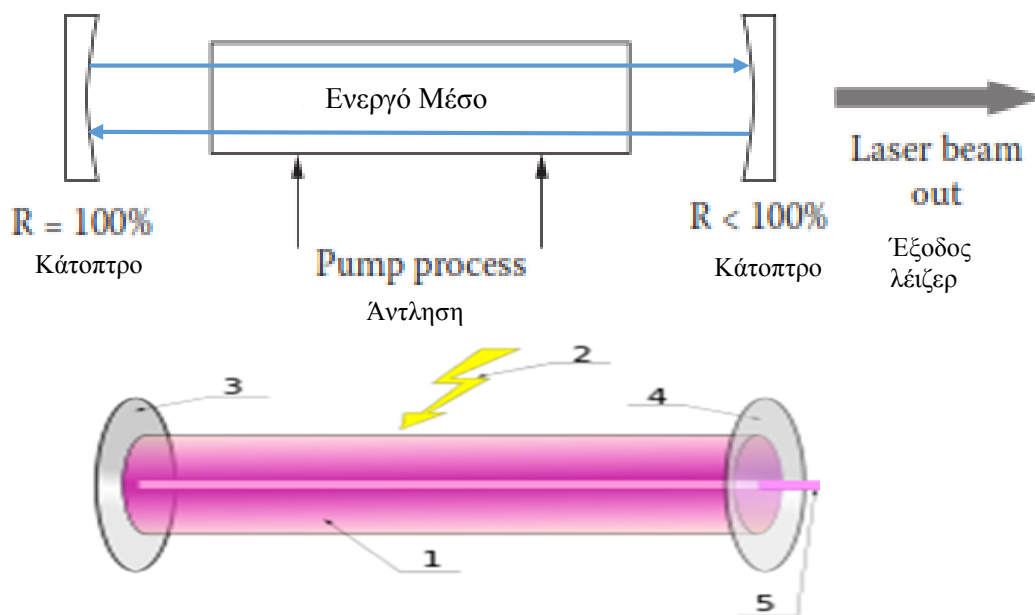
Σχήμα 3.2 : Μοντέλα laser a) 3 επιπέδων και b) 4 επιπέδων

Σε ένα λέιζερ τριών επιπέδων τα άτομα διαγείρονται από το επίπεδο 1 στο 3. Εάν το υλικό είναι τέτοιο που μετά τη διέγερση στο 3, αποδιαγείρεται γρήγορα στο 2, τότε μπορεί να επιτευχθεί αναστροφή πληθυσμών μεταξύ των επιπέδων 2 και 1. Αντίστοιχη αναστροφή πληθυσμών επιτυγχάνεται και για το λέιζερ 4 επιπέδων, όπου η αναστροφή πληθυσμών μεταξύ 2 και 1 επιτρέπει τη cw (continuous wave – συνεχούς κύματος) λειτουργία. Η διεργασία με

την οποία διεγείρονται τα άτομα από το επίπεδο 1 στο 3 ονομάζεται άντληση και συνήθως γίνεται οπτικά ή ηλεκτρικά. Μετά την αναστροφή πληθυσμών η ενίσχυση γίνεται μέγιστη όταν επιτραπεί στην ακτινοβολία να διασχίσει το ενεργό μέσο όσο το δυνατό περισσότερες φορές.

3.1.1 Διάταξη ταλαντωτή Laser

Μία διάταξη λέιζερ περιλαμβάνει τα παρακάτω, σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 : Διάταξη Λείζερ

1. Ενεργό υλικό του λέιζερ, 2. Προσφερόμενη ενέργεια άντλησης, 3. Υψηλής ανακλαστικότητας κάτοπτρο, 4. Διάταξη εξόδου δέσμης, 5. Δέσμη Λείζερ

Το ενεργό υλικό τοποθετείται σε μία συντονιστική κοιλότητα (οπτικό αντηχείο, optical resonator). Η οπτική κοιλότητα αποτελείται από το θάλαμο που περιέχει το ενεργό υλικό και 2 κάτοπτρα, όπου το ένα είναι πλήρως ανακλαστικό $R=100\%$ και το άλλο στην έξοδο του laser μερικά διαπερατό $R<100\%$. Το ενεργό υλικό μπορεί να είναι αέριο, στερεό, υγρό, ημιαγωγός με συγκεκριμένο μέγεθος, σύσταση, καθαρότητα, μορφή, και θα παρέχει τις ενεργειακές στάθμες για τις μεταπτώσεις των ατόμων.

Η διεργασία της άντλησης για το ενεργό υλικό μπορεί να συμβεί με διάφορους τρόπους, προσφέροντας ενέργεια στο υλικό μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης, μέσω φωτεινής πηγής (flashlamp) ή διόδου, μέσω χημικής αντίδρασης, ακτίνων X και διέγερση μέσω δέσμης

ηλεκτρονίων. Η ενέργεια που απορροφάται αποτίθεται στα άτομα του ενεργού υλικού, έτσι ώστε αυτά να οδηγηθούν σε μία διεγερμένη κβαντική κατάσταση και να έχουμε το φαινόμενο της αντιστροφής πληθυσμού μεταξύ βασικής και διεγερμένης κατάστασης. Η δράση – ενίσχυση του laser ξεκινάει από την αυθόρμητη εκπομπή (ή μέσω μιας δέσμης φωτός) κι ενισχύεται μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής καθώς η ακτίνα περνάει από το ενεργό μέσο, ανακλάται στα 2 κάτοπτρα και ξαναπερνάει από το ενεργό μέσο για περαιτέρω ενίσχυση της δέσμης. Η περισσότερη ενέργεια που διατίθεται για την άντληση χάνεται ως θερμότητα, μόνο ένα ποσοστό της τάξης του 2 έως 40% εμφανίζεται στη δέσμη εξόδου του λέιζερ.

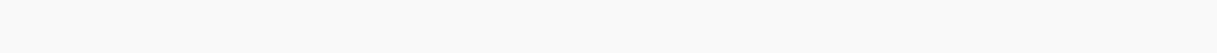
Κάθε φωτόνιο λοιπόν πρέπει να περνά τουλάχιστον δύο φορές από το ενεργό υλικό προτού φύγει από την οπή εξόδου της πηγής λέιζερ ή χαθεί λόγω απορρόφησης ή περίθλασης. Αν η ενίσχυση που προέρχεται από την επαναλαμβανόμενη διέλευση του φωτός μέσα από το ενεργό υλικό είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες της κοιλότητας, τότε εμφανίζεται εκθετική αύξηση της ισχύς του φωτός μέσα στην κοιλότητα. Όμως, κάθε εξαναγκασμένη εκπομπή αναγκάζει ένα σωματίδιο να επιστρέψει από την διεγερμένη κατάσταση στην βασική, μειώνοντας έτσι την ικανότητα του ενεργού υλικού για επιπλέον ενίσχυση.

Όταν αυτό το φαινόμενο μεγιστοποιείται τότε λέμε ότι η ενίσχυση έχει φτάσει σε κορεσμό. Η συνθήκη όπου η ισχύς άντλησης γίνεται περίπου ίση με την τιμή κορεσμού της ενίσχυσης και με τις απώλειες της κοιλότητας οδηγεί σε κατάσταση ισορροπίας της ισχύς του λέιζερ μέσα στην κοιλότητα. Αυτή η τιμή ισορροπίας καθορίζει και το σημείο λειτουργίας του λέιζερ. Αν η ισχύς άντλησης είναι πολύ μικρή, η ενίσχυση δεν είναι αρκετή ώστε να καλυφθούν οι απώλειες του ταλαντωτή, με αποτέλεσμα να εκπέμπεται πολύ μικρή ένταση λέιζερ. Η ελάχιστη τιμή ισχύος άντλησης που απαιτείται για την παραγωγή λέιζερ ονομάζεται κατώφλι λέιζερ. Το ενεργό υλικό ενισχύει οποιοδήποτε φωτόνιο περάσει μέσα από αυτό, αλλά μόνο αυτά που είναι ευθυγραμμισμένα με την κοιλότητα μπορεί να περάσουν περισσότερο από μια φορά μέσα από το ενεργό υλικό, για να επιτευχθεί σημαντική ενίσχυση.

Η ακτινοβολία λέιζερ χαρακτηρίζεται από συμφασικό, μονοχρωματικό φως (δηλαδή φως με συγκεκριμένο μήκος κύματος-χρώμα), το οποίο διαδίδεται σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, σχηματίζοντας στενές δέσμες. Οι τέσσερις χαρακτηριστικές ιδιότητες των δεσμών λέιζερ είναι η μονοχρωματικότητα, η χωρική και χρονική συμφωνία, η κατευθυντικότητα και η λαμπρότητα.

Αν η δέσμη δημιουργείται και διαδίδεται σε ελεύθερο περιβάλλον και όχι μέσα σε κυματοδηγούς (όπως στην περίπτωση των οπτικών ινών), τότε η ένταση του φωτός

εμφανίζει κανονική (Gauss) κατανομή, κάθετα στην διεύθυνση διάδοσής της. Η δέσμη του λέιζερ είναι σχεδόν απόλυτα ευθυγραμμισμένη, δηλαδή δεν αποκλίνει. Παρ' όλα αυτά τέλεια ευθυγραμμισμένη δέσμη δεν μπορεί να υπάρξει λόγω περίθλασης. [Schaeffer, 2012, Injeyan-Goodno 2011, Svelto 1986].



3.2 Είδη λέιζερ

Ανάλογα με το ενεργό υλικό που παράγει την ακτινοβολία, υπάρχουν διάφοροι τύποι λέιζερ:

- Λείζερ στερεάς κατάστασης, (Solid State Laser, SSL) : Το ενεργό μέσο είναι σε στερεή φάση, μονωτικός κρύσταλλος ή γυαλί, δεν ρέει κατά τη διαδικασία και η άντληση γίνεται οπτικά με λάμπα.

Διακρίνονται σε λέιζερ κρυστάλλου (π.χ. YAG, Ruby, YLF, YVO, κ.τ.λ.) σε μορφή δίσκου (thin disc lasers), ράβδου ή πλάκας (zig zag slab lasers) και σε λέιζερ υάλου (π.χ. BK7, πυριτίου κ.τ.λ.) σε μορφή ίνας (fiber laser) ή ράβδου.

Στην κατηγορία αυτή περιέχεται το δημοφιλές λέιζερ Nd : YAG, όπου σε ένα κρύσταλλο $Y_3Al_5O_{12}$ (Yttrium Aluminum Garnet, YAG) τα ιόντα Y^{3+} έχουν αντικατασταθεί με ιόντα Nd^{3+} . Το μήκος κύματος της δέσμης είναι στα 1,06μm και λειτουργούν σε παλμική και συνεχή λειτουργία.

Με τεχνικές συνδυασμού ακτίνων από επιμέρους λέιζερ έχει δημιουργηθεί λέιζερ με ισχύς εξόδου 100 kW για συνεχή λειτουργία και παλμούς με ισχύ κορυφής 1 PW και ενέργεια 1 MJ αντίστοιχα. Επίσης οι παλμοί κυμαίνονται σε διάρκεια από fs έως ps.

- Λείζερ αερίων: Το ενεργό μέσο είναι αέριο και η άντληση γίνεται με ηλεκτρικά μέσα, δηλαδή περνώντας ένα μεγάλο ρεύμα συνεχές ή παλμικό διαμέσου του αερίου.

Διακρίνονται σε: λέιζερ ουδετέρων ατόμων (He, Ne, Kr, Ar, Xe),

λέιζερ αερίων ιόντων (Ar^+ , Kr^+), και μεταλλικών ατμών (Sn, Pb, Zn, Cd και Se).

Σε λέιζερ μοριακών αερίων που είναι τα : δονητικά-περιστροφικά λέιζερ (CO_2 , δονητρονιακά λέιζερ (N_2), λέιζερ διεγερμένων διμερών (Excimer Lasers) με ενεργό μέσο μίγμα ευγενούς αερίου και αλογόνου, ArF, KrCl, KrF, XeBr, XeCl XeF, με παλμική λειτουργία μόνο, μήκη κύματος στην υπεριώδη περιοχή από 193 nm έως 351nm και ισχύς εξόδου από 2 W το 1976 σε 1200W το 2010 χρησιμοποιείται στη μικρολιθογραφία, σε ιατρικές εφαρμογές και στη βιομηχανία.

Το λέιζερ CO_2 είναι και παραμένει το πιο διαδεδομένο στη χρήση βιομηχανικών εφαρμογών από πλευράς πλήθους και χρηματικής αξίας. Τυπικές του εφαρμογές αποτελούν η κοπή και συγκόλληση μετάλλων, η κατεργασία αμετάλλων (πλαστικών, υφάσματος, γυαλιού), η χάραξη και επίσης οδοντιατρικές, ιατρικές κι επιστημονικές

εφαρμογές. Συνολικά η κοπή με λέιζερ αποτελεί το 25% όλων των βιομηχανικών εφαρμογών παγκοσμίως αξίας 5 δισεκατομμυρίων € (στοιχεία 2008).

Το ενεργό μέσο είναι ένα μίγμα αερίων με τυπική σύνθεση είναι 10% CO₂, 10% N₂, 80% He. Το CO₂ είναι ένα γραμμικό τριατομικό μόριο με δυνατότητα ταλάντωσης και περιστροφής που διαγείρεται μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης.

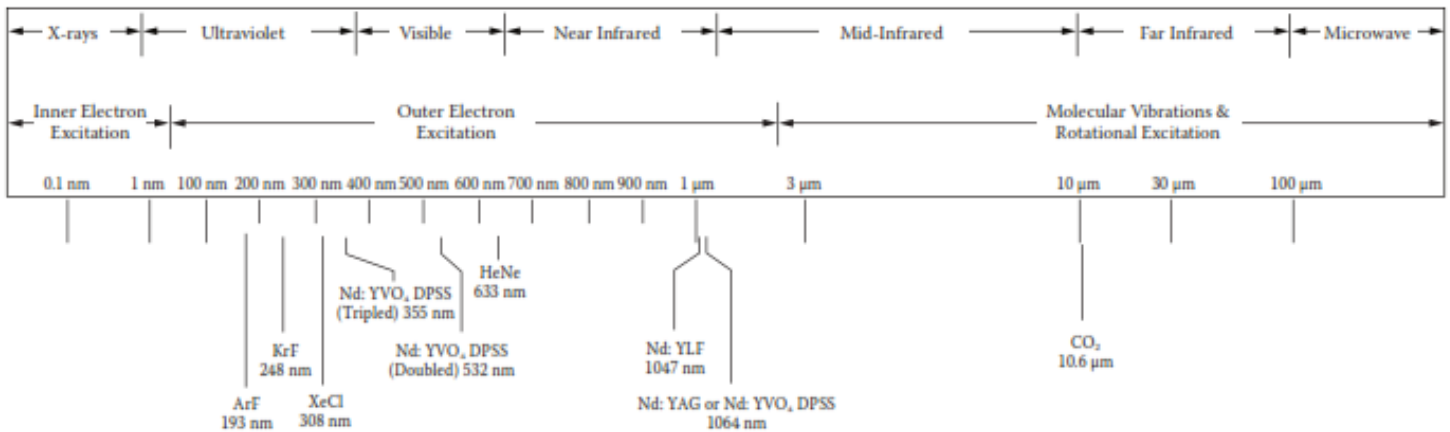
Η δέσμη λέιζερ έχει πολύ καλά χαρακτηριστικά με μήκος κύματος 10,6μm και ενεργειακή απόδοση της τάξης του 20%. Μπορεί να λειτουργήσει σε παλμική και συνεχή λειτουργία με ισχύς εξόδου 10 kW για συνεχή λειτουργία και παλμούς με ισχύ κορυφής 10 TW.

Από άποψη κατασκευής τα CO₂ λέιζερ χωρίζονται σε λέιζερ με διαμήκη ροή, σφραγισμένα λέιζερ, λέιζερ κυματοδηγού, λέιζερ εγκάρσιας ροής, εγκάρσια διεγερμένα λέιζερ ατμοσφαιρικής πίεσης, TEA και λέιζερ δυναμικής αερίων.

- Λέιζερ υγρών χρωστικών, όπου το ενεργό υλικό αποτελείται από διαλύματα οργανικών χρωστικών σε υγρά όπως αιθυλική αλκοόλη, μεθυλική αλκοόλη ή νερό. (π.χ. Ροδαμίνης 6G, Φλουορεσκεΐνης, Κουμαρίνης, Στιλβενίου, Σκιαδοφερόνης, Τετρακαΐνης, Πράσινου του μαλαχίτη κ.τ.λ.)
- Χημικά Λέιζερς, όπου η αντιστροφή πληθυσμών παράγεται άμεσα μέσω μιας χημικής αντίδρασης, συνήθως μεταξύ αερίων στοιχείων (HF).
- Λέιζερ ημιαγωγών : είναι δίοδοι (GaAs), που παραδοσιακά χρησιμοποιούνται ως πηγή άντλησης ή ενεργοποίησης άλλου λέιζερ ή οπτικού ενισχυτή, αλλά τώρα χρησιμοποιούνται αυτόνομα, αντικαθιστώντας τις λάμπες ενεργοποίησης και τα λέιζερ στερεάς κατάστασης.
- Λέιζερ χρωματικών κέντρων (KCl, RbCl) σε κρυστάλλους αλογονούχων αλκαλίων με μήκος κύματος 0,8 έως 3,3 μm.
- Λέιζερ ελευθέρων ηλεκτρονίων (Free Electron Laser, FEL), όπου τα ηλεκτρόνια κινούνται ελεύθερα στο κενό, δια μέσου ενός περιοδικού μαγνητικού πεδίου και η διεργασία εξαναγκασμένης εκπομπής προέρχεται από την αλληλεπίδραση του

ηλεκτρομαγνητικού πεδίου της δέσμης laser με τα ηλεκτρόνια που κινούνται σε αυτή την περιοδική δομή.

Στο παρακάτω σχήμα 3.4 εμφανίζονται τα μήκη κύματος στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα διαφόρων λέιζερ που διατίθενται για εμπορική χρήση.

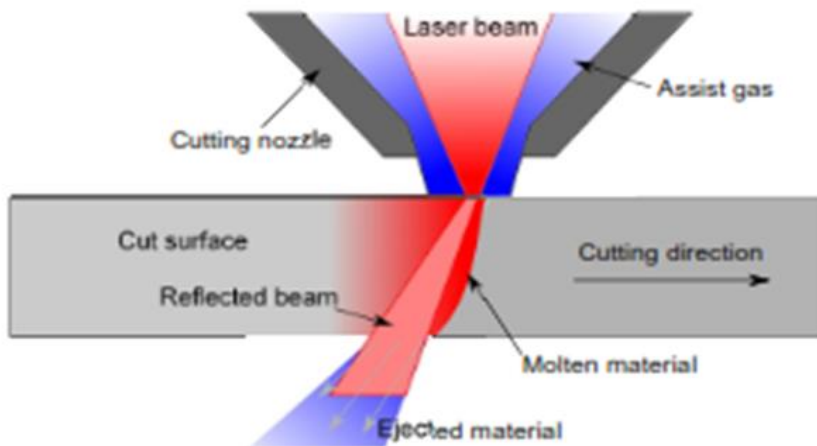
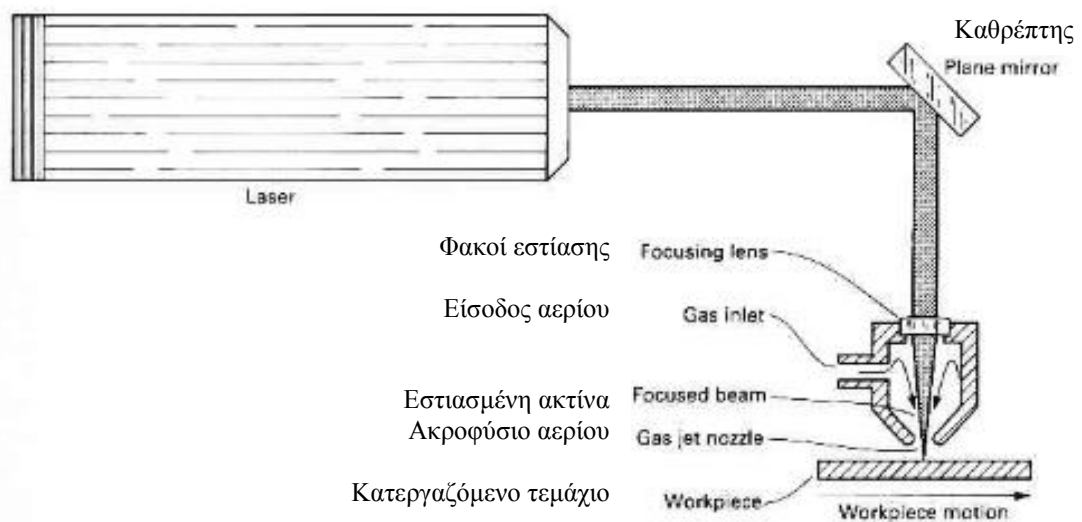


Σχήμα 3.4 : Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και μήκη κύματος διαθέσιμων λέιζερ

Στα λέιζερ θα συνεχιστεί η τάση να εμφανίζονται νέες πηγές λέιζερ με βελτιωμένα οπτικά συστήματα ελέγχου. Θα παράγονται συσκευές λέιζερ μικρότερες, γρηγορότερες και φθηνότερες. Θα είναι αξιόπιστες, απλές και με λιγοστή συντήρηση. Για μικρομηχανουργική κατεργασία αναμένουμε ένα λέιζερ με χαρακτηριστικά όπως : παλμό λειτουργίας 100 fs, μήκος κύματος εξόδου στα UV (250 nm περίπου), υψηλό ρυθμό λειτουργίας (100 kHz ή παραπάνω), υψηλή ενέργεια παλμού (μεγαλύτερη από 100 μJ/παλμό) και σε λογικό κόστος. [Schaeffer, 2012, Injeyan-Goodno 2011, Svelto 1986].

3.3 Εφαρμογές

Το λέιζερ αποτελεί την πιο διαδεδομένη πηγή ακτινοβολίας και έχει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών. Οι εφαρμογές του είναι άμεση συνέπεια των ειδικών χαρακτηριστικών του. Καλύπτουν διάφορους επιστημονικούς και τεχνολογικούς τομείς [Ready, 1997] συμπεριλαμβανομένων της φυσικής και της χημείας, της βιολογίας και της ιατρικής (χειρουργική, φυσικοθεραπεία, αισθητική, βιοχημικές αναλύσεις), των οπτικών τηλεπικοινωνιών, της μέτρησης και εξέτασης, της θερμοπυρηνικής σύντηξης, των στρατιωτικών εφαρμογών (ραντάρ, γυροσκοπία, τηλέμετρα, υπέρυθρες δέσμες στόχευσης, συστήματα ασφαλείας), της ολογραφίας και της επεξεργασίας υλικών. Η κοπή αλουμινίου με λέιζερ, σχήμα 3.5, που είναι το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, αποτελεί μια σημαντική εφαρμογή του λέιζερ στον τομέα της κατεργασίας υλικών [Caristan, 2004, Svelto O 1986, ASM 1980].



Σχήμα 3.5: Διάταξη κοπής μετάλλου με ακτίνα λέιζερ

Η κοπή, η συγκόλληση, η διάτρηση, το μαρκάρισμα, η επεξεργασία επιφανειών και η επιμετάλλωση είναι σημαντικές βιομηχανικές εφαρμογές των lasers. Η δέσμη λέιζερ παρουσιάζει βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, τα οποία μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα:

- Μειώνεται σημαντικά η παραμόρφωση του υλικού και έτσι μπορεί να ελεγχθεί καλύτερα η εργασία, γιατί η θερμοκρασία που αναπτύσσεται από το λέιζερ σε μια δεδομένη διεργασία είναι συνήθως μικρότερη απ' αυτήν που αντιστοιχεί σε συνήθεις εργασίες
- Είναι δυνατή η κατεργασία σε μη προσιτές περιοχές. Με την υψηλή ισχύ και την ευκολία ελέγχου της δέσμης λέιζερ καθίστανται δυνατές μεταλλουργικές εργασίες που πριν ήταν πρακτικά ανέφικτες.
- Είναι ταχύτερη η κατεργασία, με αποτέλεσμα τον υψηλό βαθμό παραγωγής.
- Είναι ευκολότερη η αυτοματοποίηση. Η μετακίνηση της δέσμης λέιζερ μπορεί να επιτευχθεί με τη μετακίνηση του οπτικού συστήματος εστίασης και να ελεγχθεί από υπολογιστή. Αυτή η δυνατότητα παρέχει την ευχέρεια κοπής υλικών με ακρίβεια ακόμη και σε πολύπλοκα σχήματα.
- Δεν υπάρχει φθορά του εργαλείου λέιζερ, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό στην κοπή.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα πρέπει, βέβαια, να συνεκτιμηθούν με το γεγονός ότι ένα σύστημα λέιζερ έχει υψηλό κόστος κεφαλαίου και συντήρησης, παρουσιάζει προβλήματα αξιοπιστίας και αναπαραγωγισιμότητας, καθώς και προβλήματα ασφάλειας και προστασίας.

Στη μεταλλουργία χρησιμοποιούνται συνήθως τα λέιζερ CO₂, μήκους κύματος 10,6μm, ισχύος 100 W μέχρι 15 Kw, κόστος λειτουργίας \$10/h, κόστος επένδυσης \$250/W.

Τα διηγεμένα διμερών, μήκους κύματος 248nm, κόστος λειτουργίας \$50/h, κόστος επένδυσης \$4000/W.

Επίσης στερεάς κατάστασης λέιζερ με δίοδο (DPSS) Nd:YAG με ισχύ μεταξύ 50 και 500 W, μήκη κύματος 1064nm, 355nm, 266nm κόστος λειτουργίας \$15/h και επένδυσης \$1000/W, \$10.000/W, \$75.000/W.

Επίσης στερεάς κατάστασης με οπτική ίνα μήκους κύματος 1064nm, κόστος λειτουργίας \$10/h και επένδυσης \$600/W.

Η δέσμη Nd:YAG απορροφάται σημαντικά μόνο από τα μεταλλικά υλικά και χάρη στη χαμηλότερη ισχύ του χρησιμεύει στην κατεργασία υλικών που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια και ελάχιστη δυνατή θέρμανση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ και ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

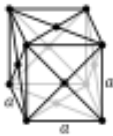
4.1 Αλουμίνιο και ιδιότητές του

Το αλουμίνιο (Al) είναι το αφθονότερο μεταλλικό στοιχείο στο φλοιό της γης μετά από το οξυγόνο και το πυρίτιο (O 49,2.%κ.β., Si 25,7%κ.β., Al 8,1%κ.β.) [CRC chemistry handbook, 90th edition, 2010) και το δεύτερο μεταλλικό στοιχείο σε όλη τη Γη. Είναι πολύ δραστικό χημικά και δεν απαντάται ελεύθερο στη φύση παρά μόνο σε διάφορα ορυκτά.

Παράγεται από το μέταλλευμα του βωξίτη με την ηλεκτρόλυση της άνυδρης αλουμίνας (Al_2O_3).

Οι κυριότερες ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου (99,99%) είναι οι εξής:

Πίνακας 4.1 : Οι κυριότερες ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου (99,99%)

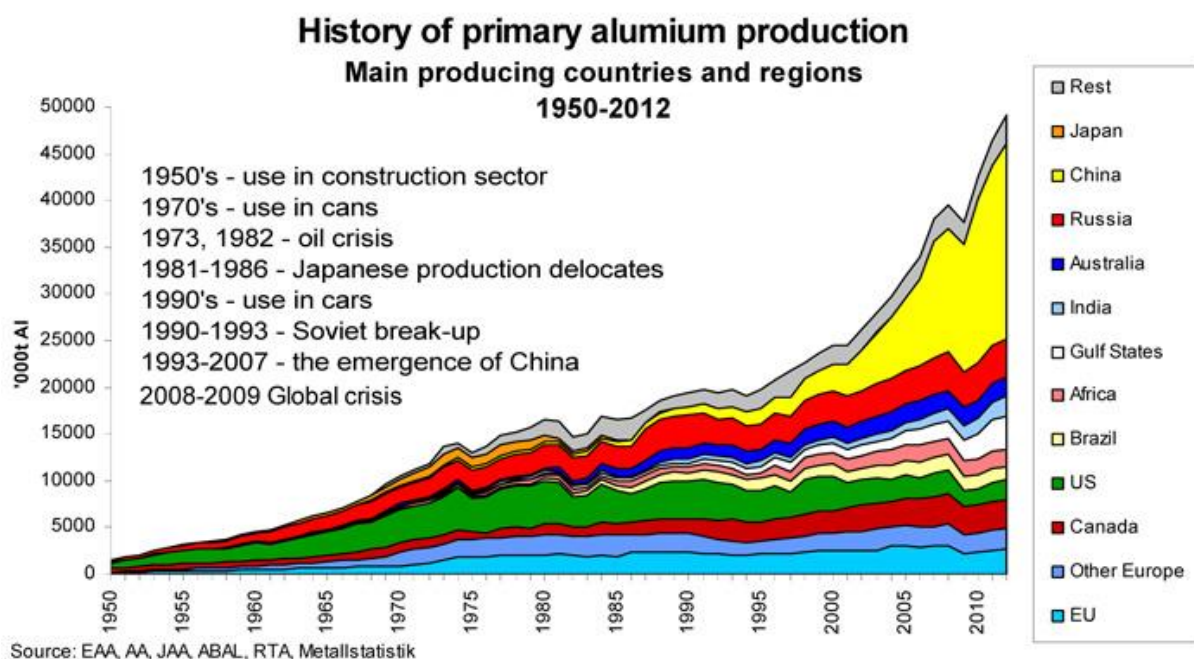
Κρυσταλλική Δομή Κυβική εδροκεντρωμένη (FCC)		
Σταθερή σε θερμοκρασία από 4 K έως σημείο τήξης, ($a = 4,0496 \cdot 10^{-10}$ m, στους 298 K), διάμετρος ατόμου $2,86 \cdot 10^{-10}$ m		
Ατομικός Αριθμός	13	
Σθένος στις χημικές ενώσεις	3	
Ατομικό Βάρος	26,98	
Πυκνότητα	$2,7 \text{ g/cm}^3$	
Σημείο Τήξης	933,4 K ή 660,4 °C	
Θερμότητα Τήξης	397 J / g	
Σημείο Βρασμού	2.519 °C	
Θερμότητα Εξάτμισης	$1,08 \cdot 10^4 \text{ J / g}$	
Συντελεστής θερμικής Διαστολής	$(23 \text{ έως } 24,9) \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ από 20 έως 127 °C	
Θερμική Αγωγιμότητα	$2,37 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ στους 25 °C	
Ηλεκτρική Αντίσταση	$2,6548 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ στους 20 °C	
Θερμοχωρητικότητα	$0,9 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
Όριο Διαρροής	10 Mpa	
Όριο Θραύσης	45 Mpa	

(aluminum handbook)

Το αλουμίνιο εμφανισιακά έχει «ελκυστικό» ασημί χρώμα, πολύ καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, υψηλή ανακλαστικότητα. Αντανακλά το φως πάνω από 90% για μήκη κύματος από 0,9 έως 12μm. Είναι παραμαγνητικό υλικό, όλκιμο, μη πυροφορικό, μη τοξικό κι εύκολα ανακυκλώσιμο.

Από το 1950 και μετά αποτελεί το υπ' αριθμόν «δύο» μέταλλο, με πρώτο το σίδηρο και τα κράματά του (χάλυβες, χυτοσίδηροι), στην παγκόσμια παραγωγή και βιομηχανία των μετάλλων.

Ενδεικτικά, το 2010 παρήχθησαν παγκοσμίως 46 εκατομμύρια τόνοι αλουμινίου (Σχήμα 4.1), έναντι 1,2 δισεκατομμυρίων τόνων χάλυβα περίπου.



Σχήμα 4.1 : Παγκόσμια Παραγωγή Αλουμινίου (εκατομμύρια τόνοι ή 10^6 MT) ανά έτος

Πηγή : European Aluminium Association

Η αύξηση της χρήσης και παραγωγής του αλουμινίου οφείλεται στην αξιοσημείωτη προσαρμοστικότητά του μέσω των κραμάτων του. Έχει μικρό ειδικό βάρος, που συνεπάγεται υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E/ρ) και υψηλή ειδική μηχανική αντοχή. Άλλες ιδιότητές του είναι η υψηλή αντίστασή του (λόγω παθητικοποίησης) στη διάβρωση σε όλα τα περιβάλλοντα, η πλαστικότητά του, η ευκολία στην κατεργασία και διαμόρφωσή του, ο μεταλλουργικός έλεγχος της δομής του και των ιδιοτήτων του και η σχετικά χαμηλή τιμή του.

Είναι αξιοσημείωτο ότι οι φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες μπορούν να διαμορφωθούν κατά το δοκούν σε μια μεγάλη περιοχή -από το καθαρό αλουμίνιο μέχρι τα πιο

πολύπλοκα κράματά του- για μία πληθώρα εφαρμογών. Πάνω από 300 κράματα έχουν αναγνωριστεί διεθνώς και αναπτύσσονται συνεχώς καινούρια.

Το αλουμίνιο έχει το ένα τρίτο της πυκνότητας του χάλυβα ($2,7 \text{ g/cm}^3$ έναντι $7,8 \text{ g/cm}^3$) και αντικαθιστά σταδιακά αυτόν στις εφαρμογές που απαιτούν χαμηλό βάρος και ισοδύναμη αντοχή, μειώνοντας έτσι το βάρος κατά τουλάχιστον 50%.

Χρησιμοποιείται ευρέως στις δομικές κατασκευές, στις συσκευασίες τροφίμων και φαρμάκων, σε ηλεκτρικές εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη ναυπηγική, στην αεροδιαστημική και σε πληθώρα οικιακών και καταναλωτικών προϊόντων.

Διαμορφώνεται σε μία μεγάλη γκάμα τυποποιημένων προϊόντων: Πλάκες (πάχος $>6,25\text{mm}$), φύλλα ($6,25\text{mm}<\text{πάχος}<0,15\text{mm}$), φιλμ (πάχος $<0,15\text{mm}$), πλινθώματα, κύλινδροι, ράβδοι οποιαδήποτε διατομής, σύρματα, σωλήνες κλπ. [Μπαντέκα, 1995, ASM (Specialty Handbook) 1993, Χρυσουλάκης-Παντελής, 2008]

4.2 Βιομηχανικά κράματα αλουμινίου

4.2.1 Κραματικά στοιχεία.

Τα κυριότερα μέταλλα που χρησιμοποιούνται με το αλουμίνιο για να σχηματίσουν κράματα είναι ο χαλκός (Cu), το μαγγάνιο (Mn), το πυρίτιο (Si), το μαγνήσιο (Mg) και ο ψευδάργυρος (Zn).

Η διαλυτότητα των κυριότερων μετάλλων στο αλουμίνιο κι η επίδρασή τους στις ιδιότητές του εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 : Κυριότερα κραματικά στοιχεία στο Al, διαλυτότητες κι επίδραση αυτών.

Προσθήκη Κραματικού Στοιχείου	Διαλυτότητα στην υγρή και στερεή φάση, (ευθηκτική θερμοκρασία)					Επίδραση στις ιδιότητες του Αλουμινίου
		Υγρό		Στερεό		
	T (°C)	% κβ	% κα	% κβ	% κα	
Χαλκός	550	33,15	17,39	5,67	2,48	Σκλήρυνση με κατακρήμνιση. Μέγιστη αντοχή για 4-6 % Cu. Μείωση επιμήκυνσης
Μαγγάνιο	660	1,95	0,97	1,82	0,9	Αύξηση αντοχής με ενδοτράχυνση. Καλή κατεργασιμότητα. Ελάττωση ολκιμότητας. Αντοχή στη διάβρωση
Πυρίτιο	580	12,6	12,16	1,65	1,59	Αύξηση ρευστότητας και χυτευσιμότητας, αντοχή στη φθορά
Μαγνήσιο	450	35,0	37,34	14,9	16,26	Σκλήρυνση με ενδοτράχυνση. Μικρή μείωση επιμήκυνσης. Καλή αντοχή στη διάβρωση
Ψευδάργυρος	380	95,0	88,7	82,8	66,4	Σκλήρυνση με κατακρήμνιση, ενδοτράχυνση, υψηλή αντοχή

Σε όλα τα κράματα αλουμινίου τα παραπάνω στοιχεία συνυπάρχουν μεταξύ τους. Σκοπός της κραμάτωσης είναι η αύξηση της αντοχής του αλουμινίου, διατηρώντας φυσικά όλες τις επιθυμητές, καλές ιδιότητές του.

Αυτό επιτυγχάνεται μέσω δημιουργίας στερεού διαλύματος κι ενδοτράχυνσης -για τα μη θερμικώς κατεργάσιμα κράματα- ή μέσω δημιουργίας στερεού διαλύματος κι ακόλουθης θερμικής κατεργασίας (διαλυτοποίηση – βαφή) για κατακρήμνιση ενδομεταλλικών σωματιδίων, που συνοδεύεται από γήρανση (οι κατακρημνίσεις συνεχίζονται με την πάροδο του χρόνου) ή και ενδοτράχυνση.

4.2.2 Ταξινόμηση και Συμβολισμός των κραμάτων του αλουμινίου

Τα κράματα του αλουμινίου, διακρίνονται σε κράματα διαμόρφωσης (Wrought Alloys) και σε κράματα χύτευσης (Casting Alloys).

Τα κράματα των δύο αυτών κατηγοριών υποδιαιρούνται σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία και σε κράματα των οποίων η θερμική κατεργασία είναι αδύνατη. Οι ιδιότητες των πρώτων εξαρτώνται από την ακολουθούμενη θερμική κατεργασία, ενώ των δεύτερων εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί.

Κατά την Aluminum Association ένα σύστημα με 4 ψηφία χρησιμοποιείται για να προσδιοριστούν το αλουμίνιο και τα κράματα διαμόρφωσης, πίνακας 4.3.

Το πρώτο ψηφίο ορίζει το κράμα του αλουμινίου, το κύριο κραματικό στοιχείο που χρησιμοποιείται.

Το δεύτερο ψηφίο δείχνει το όριο των ακαθαρσιών, που μπορεί να περιέχονται στο κράμα και τις τροποποιήσεις, (0 για το πρωταρχικό κράμα, 1 έως 9 οι τροποποιήσεις)

Τα δύο τελευταία ψηφία xx κυρίως ορίζουν το κράμα του αλουμινίου ή δείχνουν την καθαρότητα του αλουμινίου.

Πίνακας 4.3: Κράματα Αλουμινίου διαμόρφωσης

Κωδικός	Κύριο Κραματικό στοιχείο, Χαρακτηριστικά
1xxx	Καθαρό αλουμίνιο (99%) για χρήση στις ηλεκτρικές και χημικές βιομηχανίες. Μη θερμικώς κατεργάσιμα
2xxx	Κράματα με κύριο στοιχείο το χαλκό (Cu), αν και άλλα κραματικά στοιχεία (πχ Mg) είναι παρόντα σε σημαντικό βαθμό. Χρησιμοποιείται σε μέρη αεροσκαφών. Θερμικώς κατεργάσιμα.
3xxx	Κράματα με κύριο στοιχείο το μαγγάνιο (Mn). Γενικού σκοπού για αρχιτεκτονικές εφαρμογές και διάφορα προϊόντα. Μη θερμικώς κατεργάσιμα
4xxx	Κράματα με κύριο στοιχείο το πυρίτιο (Si). Χρησιμοποιούνται σε ράβδους και φύλλα συγκόλλησης. Μη θερμικώς κατεργάσιμα.
5xxx	Κράματα με κύριο στοιχείο το μαγνήσιο (Mg). Χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική και κοντά σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Μη θερμικώς κατεργάσιμα
6xxx	Κράματα με κύριο στοιχείο το μαγνήσιο (Mg) και το πυρίτιο (Si). Χρησιμοποιούνται για αρχιτεκτονικές εφαρμογές (προφίλ κλπ). Θερμικώς κατεργάσιμα.
7xxx	Κράματα με κύριο στοιχείο τον ψευδάργυρο (Zn), αν και άλλα στοιχεία όπως Cu, Mg, Cr, Zr μπορούν να καθορίζονται. Χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική και όπου χρειάζεται υψηλή αντοχή. Θερμικώς κατεργάσιμα.
8xxx	Κράματα με Sn, Li, και διάφορες συνθέσεις με άλλα στοιχεία
9xxx	Κωδικός «κρατημένος» για μελλοντική χρήση

Ανάλογο σύστημα με 4 ψηφία χρησιμοποιείται για τον ορισμό των κραμάτων αλουμινίου χύτευσης, πίνακας 4.4. Το πρώτο ψηφίο δείχνει την ομάδα κραμάτων. Τα δύο δεύτερα ψηφία δείχνουν το κράμα του αλουμινίου ή δείχνει την καθαρότητα του αλουμινίου. Το τελευταίο ψηφίο που χωρίζεται από τα προηγούμενα τρία, με μία τελεία δείχνει την μορφή του χυτού, π.χ. χυτό τελικής μορφής ή πλίνθωμα. Η πιο συνηθισμένη όμως μορφή προσδιορισμού είναι με 3 ψηφία.

Πίνακας 4.4: Κράματα Αλουμινίου χύτευσης

Κωδικός	Κύριο κραματικό στοιχείο, Χαρακτηριστικά
1xx.x	Καθαρό αλουμίνιο (99%) για χρήση σε μηχανές (στροφέα κλπ).
2xx.x	Κράματα με κύριο στοιχείο το χαλκό (Cu), αν και άλλα κραματικά στοιχεία μπορούν να υπάρχουν.
3xx.x	Κράματα με κύριο στοιχείο το πυρίτιο και χαλκό και μαγνήσιο. Αποτελούν το 90% των παραγομένων χυτών προϊόντων.
4xx.x	Κράματα με κύριο στοιχείο το πυρίτιο.
5xx.x	Κράματα με κύριο στοιχείο το μαγνήσιο.
6xx.x	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7xx.x	Κράματα με κύριο στοιχείο τον ψευδάργυρο (Zn), αν και άλλα στοιχεία όπως Cu, Mg, μπορούν να καθορίζονται.
8xx.x	Κράματα με κύριο στοιχείο τον κασσίτερο
9xx.x	Άλλα στοιχεία

Στην Ευρώπη, ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (International Organization for Standardization) έχει αναπτύξει το δικό του Αλφαριθμητικό σύστημα για την ονοματολογία των κραμάτων. Καθορίζεται η χημική σύσταση του κύριου κραματικού στοιχείου (μέση τιμή) στρογγυλοποιημένη στο πλησιέστερο 0,5.

Παράδειγμα : το Al 5052 συμβολίζεται Al Mg2.5

Το Al 7075 συμβολίζεται AlZn5.5MgCu.

4.3 Προσδιορισμός Βασικών Κατεργασιών Αλουμινίου

Οι κωδικοί που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κατεργασία (θερμική ή μηχανική) σύμφωνα με την Aluminum Association είναι ίδιοι για τα κράματα διαμόρφωσης και χύτευσης (με εξαίρεση τα πλινθώματα). Συμβολίζονται με κεφαλαία γράμματα που χωρίζονται από τον κωδικό του κράματος με μία παύλα (-). Υποκατηγορίες κατεργασιών συμβολίζονται με 2 ψηφία μετά το γράμμα.

F : Όπως παρήχθη, (As Fabricated). Χωρίς κατεργασία.

O : Ανοπτημένο (Annealed) και ανακρυσταλλωμένο υλικό με τη χαμηλότερη αντοχή και υψηλότερη ολκιμότητα.

H : Σκληρυμένο με ψυχρή κατεργασία, (μόνο για κράματα διαμόρφωσης). Συνοδεύεται από δύο ή περισσότερα ψηφία

T : Θερμικά κατεργασμένο για τη δημιουργία υλικού με σταθερές ιδιότητες διαφορετικές από την F και O. Συνοδεύεται πάντα από ένα ψηφίο από το 1 έως 10.

W : Θερμικά κατεργασμένο (Διαλυτοποίηση), που αναφέρεται στην ασταθή κατάσταση κραμάτων, των οποίων η αντοχή αυξάνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για μήνες ή και χρόνια μετά την κατεργασία. Φυσική γήρανση που δεν σταθεροποιείται, αλλά εξελίσσεται συνεχώς.

4.3.1 Υποκατηγορίες της σκλήρυνσης με ψυχρή κατεργασία

H1x : Σκληρυμένο με ψυχρή κατεργασία. Ο βαθμός σκλήρυνσης δίνεται από το x (1 έως 8) και μεταβάλλεται από 1/4 σκληρό (H12) μέχρι πλήρως σκληρυμένο (H18), που παράγεται με 75% ελάττωση της επιφάνειας.

H2x : Σκληρυμένο με ψυχρή κατεργασία και μερικώς ανοπτημένο. Υλικά που κυμαίνονται από το 1/4 σκληρό μέχρι το πλήρως σκληρό και που παράγονται με μερική ανόπτηση ψυχρά κατεργασμένου υλικού, το οποίο έχει αρχική αντοχή μεγαλύτερη από τη ζητούμενη. Οι κατεργασίες χαρακτηρίζονται σαν H22 H24 H26 και H28.

H3x : Σκληρυμένο με ψυχρή κατεργασία και σταθεροποιημένο.

Κατεργασίες για κράματα που μαλακώνουν με γήρανση (πχ Al-Mg), τα οποία σκληραίνουν με ψυχρή κατεργασία και ακολούθως θερμαίνονται σε χαμηλή θερμοκρασία για να αυξηθεί η ολκιμότητα και να σταθεροποιηθούν οι μηχανικές ιδιότητες. Οι χαρακτηρισμοί είναι H32 H34 H36 και H38.

4.3.2 Υποκατηγορίες θερμικών κατεργασιών

T1 - Με φυσική γήρανση. Το προϊόν ψύχεται από την υψηλή θερμοκρασία της διαμόρφωσης (βαφή) και αφήνεται για φυσική γήρανση σε μια ουσιαστικά σταθερή κατάσταση.

T2 : Ψυχρή κατεργασία και αφήνεται για φυσική γήρανση σε μια ουσιαστικά σταθερή κατάσταση

T3 – Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, βαφή, ψυχρή κατεργασία, φυσική γήρανση σε μία ουσιαστικά σταθερή κατάσταση.

T4 - Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, βαφή, φυσική γήρανση σε ουσιαστικά σταθερή κατάσταση.

T5 - Ψύξη από την υψηλή θερμοκρασία διαμόρφωσης (βαφή) και τεχνητή γήρανση.

T6 - Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, βαφή, τεχνητή γήρανση.

T7 - Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, βαφή, υπεργήρανση ή σταθεροποίηση.

T8 - Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, βαφή, ψυχρή κατεργασία, τεχνητή γήρανση.

T9 - Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης - Τεχνητή γήρανση - Ψυχρή κατεργασία

T10 - Το προϊόν ψύχεται από την υψηλή θερμοκρασία της διαμόρφωσης (βαφή), ψυχρή κατεργασία, τεχνητή γήρανση

Στα παραπάνω θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης είναι η θέρμανση στην υψηλότερη θερμοκρασία που δημιουργείται ομοιογενές στερεό διάλυμα αλουμινίου και κραματικών στοιχείων.

Βαφή είναι η γρήγορη ψύξη με νερό στη θερμοκρασία δωματίου μετά τη διαλυτοποίηση. Με την απότομη ψύξη παίρνουμε στη θερμοκρασία δωματίου ένα υπέρκορο στερεό διάλυμα κραματικών στοιχείων σε αλουμίνιο.

Γήρανση : Το υπέρκορο διάλυμα που προκύπτει δεν είναι σταθερό στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κι έχει την τάση να μετασχηματιστεί προς άλλες μετασταθείς φάσεις για να ελαττωθεί η ενέργεια του συστήματος.

Εάν αρκετή ποσότητα κατακρημνιστεί σε θερμοκρασία δωματίου, έχουμε φυσική γήρανση. Σε υψηλότερη θερμοκρασία έχουμε τεχνητή γήρανση.

4.4 Το Κράμα Αλουμινίου 7075

Το κράμα Αλουμινίου 7075 με κύριο κραματικό στοιχείο τον ψευδάργυρο είναι κράμα υψηλής αντοχής και δυσθραυστότητας και από τα κατ' εξοχήν χρησιμοποιούμενα στην αεροπορική βιομηχανία.

Η χημική του σύσταση ως κάτωθι:

Zn 5,1-6,1 %, Mg 2,1-2,9 %, Cu 1.2-2.0% , Si 0.40%, Fe 0.50%, Mn 0.30%, Cr 0,18-0,28%, Ti 0,20%.

Κατά ISO συμβολίζεται Al Zn5.5MgCu

Οι φυσικές του ιδιότητες σε κατάσταση T6 ως κάτωθι:

Συντελεστής θερμικής διαστολής : 23.6 $\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ 20 έως 100 $^\circ\text{C}$

Θερμοκρασία τήξης : 475 – 635 $^\circ\text{C}$

Θερμική αγωγιμότητα : 130 $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ στους 25 $^\circ\text{C}$

Ηλεκτρική αντίσταση : 0,0515 $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ στους 20 $^\circ\text{C}$

Πυκνότητα : 2,81 g/cm^3

Οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος Al 7075 εμφανίζονται στον πίνακα 4.5

Πίνακας 4.5: Μηχανικές ιδιότητες διαφόρων κατεργασμένων κραμάτων Al 7075

Θερμική κατεργασία (Temper)	7075-O	7075-T6, T651	Alclad 7075-O	Alclad 7075-T6,T651
Όριο θραύσης (MPa)	230	570	220	525
Όριο διαρροής (MPa)	105	505	95	460
Επιμήκυνση στα 50 mm (%)	17	11	17	11
Σκληρότητα HB	60	150		
Όριο διάτμησης (MPa)	150	330	150	315
Αντοχή στην κόπωση		160		
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	72	72	72	72

* Πάχος δοκιμίων εφελκυσμού: 1.6 mm.

Το κράμα αυτό παρουσιάζει καλή αντοχή στη διάβρωση και κατεργασιμότητα, όχι όμως όσο άλλα κράματα αλουμινίου. Έχει χαμηλή αντοχή στη διάβρωση με μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε ψαθυρή θραύση. Αντιμετωπίζεται με ειδικές θερμικές κατεργασίες.

Το κράμα 7075 σκληραίνει με κατακρήμνιση μετά από θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, βαφή και γήρανση.

Από το υπέρκορο στερεό διάλυμα Zn και Mg η σειρά κατακρήμνισης είναι η ακόλουθη: Υπέρκορο στερεό διάλυμα → ζώνες GP → n' (μετασταθής φάση) → n (MgZn₂)

Οι ζώνες GP έχουν σφαιρικό σχήμα. Η ενέργεια που στη διεπιφάνεια αυτών των ζωνών στο σύστημα Al – Zn – Mg είναι τόσο μικρή ώστε σε χαμηλές θερμοκρασίες (20 – 120 °C) να παρατηρείται μεγάλη πυκνότητα ζωνών με μικρό μέγεθος.

Μία από τις ιδιότητες του κράματος αυτού, είναι το ότι γηράσκει φυσικά για απεριόριστο χρονικό διάστημα (οπότε δεν νοείται ως T4).

Είναι χαρακτηριστικό πως μετά από χρονικό διάστημα 25 ετών, εξακολουθεί να σκληραίνει και μάλιστα η αντοχή του είναι ίση με το 95% της T6.

Το κράμα αυτό δεν σκληραίνει με ψυχρή κατεργασία μεταξύ βαφής και γήρανσης, διότι σκληραίνουν πλήρως με σχηματισμό ζωνών και ακόλουθη κατακρήμνιση. Οπότε σχεδόν πάντα χρησιμοποιείται σε κατάσταση γήρανσης και σπανίως στην πλήρως ανοπτημένη κατάσταση - O-.

Οι συνήθεις μορφές με τις οποίες χρησιμοποιείται είναι οι:

T6, T651, T652, T6510, T6511, T73, T7351, T7352, T76, T7651.

Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τις ειδικές θερμικές κατεργασίες T73 και T76 (και τις συναφείς T7351, T7352 και T7651) οι οποίες, παρόλο που έχουν ελαφρώς μειωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με την T6, έχουν αυξημένη αντοχή σε αυτό το είδος διάβρωσης.

Ορισμένα από τα κράματα διαμόρφωσης, κυρίως αυτά με υψηλή αντοχή σε μορφή πλακών και φύλλων, χρησιμοποιούνται με τη μορφή Alclad: Η μορφή αυτή συνίσταται από το κυρίως κράμα στο οποίο, είτε στην μία είτε και στις δύο πλευρές, είναι μεταλλουργικά συνδεδεμένο άλλο κράμα αλουμινίου. Το πάχος του επιστρώματος κυμαίνεται σε 2.5 - 5% του ολικού πάχους σε κάθε πλευρά.

Συνήθως γίνεται σε κράματα με μειωμένη αντιδιαβρωτική αντοχή, τα οποία προστατεύονται με κράματα που έχουν αυξημένη. Επιπλέον το προστατευτικό κράμα (cladding alloy) διαλέγεται ώστε να είναι ανοδικό στο προστατευόμενο (core alloy), συνεπώς το προστατεύει και ηλεκτροχημικά από την διάβρωση θυσιαζόμενο.

Συνήθως για το 7075 χρησιμοποιούνται τα κράματα 7072, 7008, 7011.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

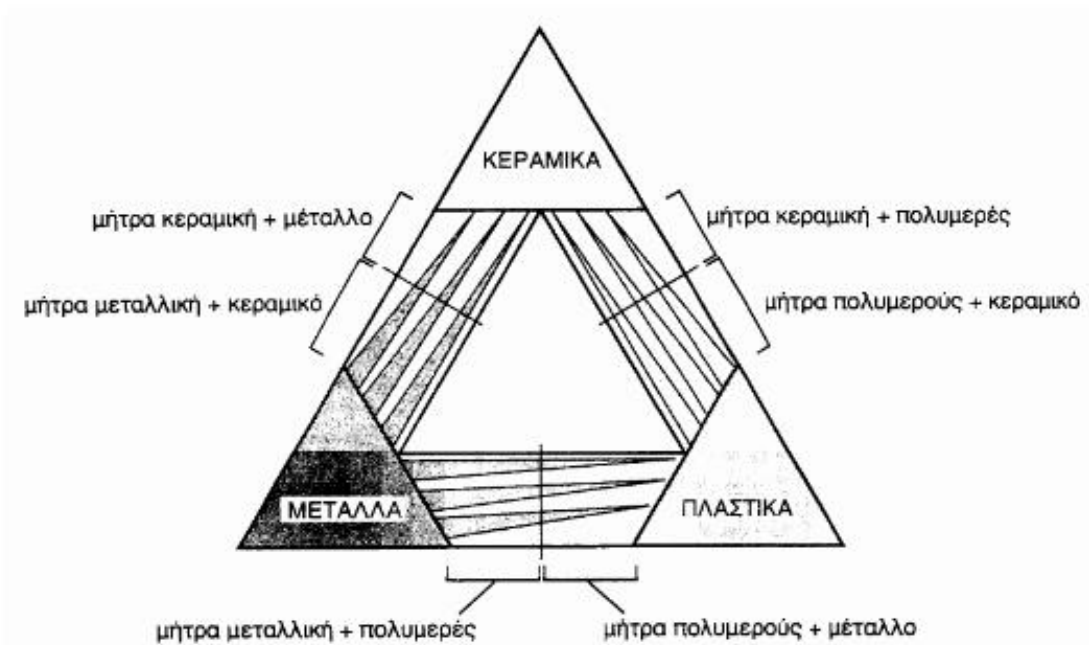
5.1 Ορισμός – Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Τα υλικά συνήθως κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- σε μέταλλα και κράματα, που στην πλειονότητά τους έχουν βρει πολλές βιομηχανικές εφαρμογές,
- σε μη μεταλλικά ανόργανα υλικά, με κυρίους εκπροσώπους τα κεραμικά υλικά και τα τεχνικά γυαλιά, και
- σε οργανικά υλικά, με ιδιαίτερη αναφορά στα πλαστικά.

Όμως, η σαφής διάκριση μεταξύ των υλικών έχει αναθεωρηθεί, διότι συνδυασμοί μεταξύ αυτών, οδήγησαν σε οικογένειες νέων υλικών, που καταργούν τα όρια μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών, με κύριο αντιπρόσωπο τα σύνθετα υλικά.

Αν θεωρήσουμε ότι οι τρεις κατηγορίες υλικών καταλαμβάνουν τις κορυφές ενός τριγώνου, (σχήμα 5.1), τότε ο συνδυασμός ανά δύο των υλικών αυτών, οδηγεί σε οικογένειες νέων, συνθέτων υλικών.



Σχήμα 5.1 : Κατηγορίες σύνθετων υλικών

Σύνθετα (composites) είναι τα υλικά που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα συστατικά, τα οποία συνδυάζονται για να επιτευχθούν ειδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά που κανένα από τα συμμετέχοντα συστατικά δεν μπορεί από μόνο του να επιτύχει. (Αρχή συνδυασμένης δράσης). Αναφέρεται σε υλικά που προκύπτουν τεχνητά και όχι φυσικά. Επιπλέον οι δύο φάσεις του σύνθετου υλικού πρέπει να είναι χημικά ανόμοιες και χωρισμένες με διακριτή διεπιφάνεια.

Τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από τη συνύπαρξη δύο τουλάχιστον μακροσκοπικά διακρινόμενων συστατικών, από τα οποία το ένα που χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό, το οποίο καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

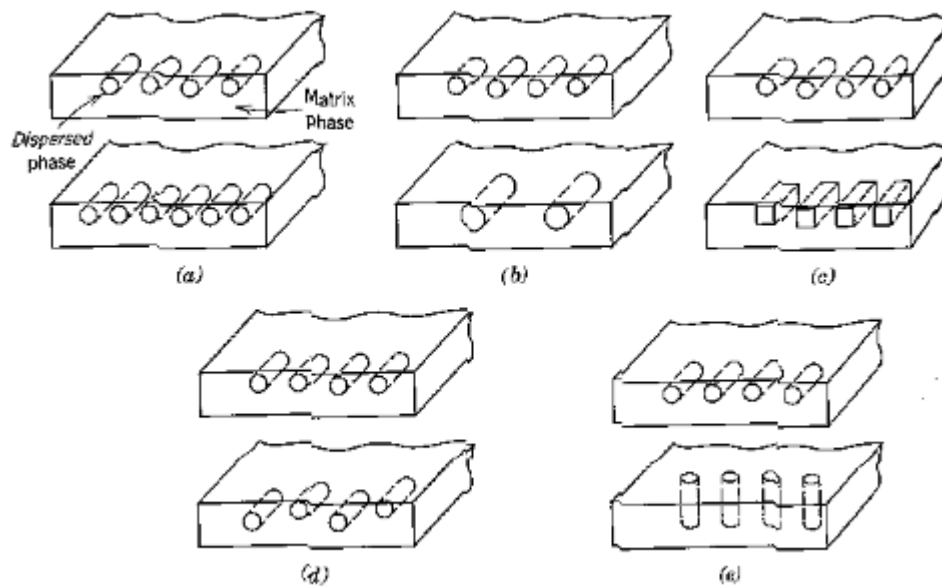
Αν και ως ιδέα η ενίσχυση ενός υλικού με ένα άλλο είναι γνωστή από αρχαιοτάτων χρόνων, πχ πηλός με άχυρα, η σύγχρονη βιομηχανία συνθέτων υλικών έχει μόλις 40-50 χρόνων ιστορία και ξεκίνησε με την παραγωγή συνθέτων υλικών πολυμερούς μήτρας με ενίσχυση ινών γυαλιού (glass fibre reinforced polymers, GFRP) ή ινών άνθρακα (carbon fibre reinforced polymers, CFRP).

Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής, το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους παράγοντες που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην ναυπηγική και στην αεροναυπηγική βιομηχανία.

Μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών, όπως τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά, η ευαίσθητη πολλές φορές συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος αντιμετωπίζονται πλέον πιο αποτελεσματικά με τη συνεχή τεχνολογική ανάπτυξη στην παραγωγή καλλίτερων ινών, ρητινών και με την εξέλιξη των μεθόδων παραγωγής [Chawla, 1987, Παναγόπουλος, 1990, Παντελής, 2008, ASM, vol. 21].

5.2 Ταξινόμηση συνθέτων υλικών

Τα περισσότερα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο φάσεις: τη μήτρα, που είναι συνεχής και περιβάλλει την άλλη φάση, και τη διεσπαρμένη φάση. Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων των δύο φάσεων, των σχετικών τους ποσοστών αναλογίας, και της γεωμετρίας της διεσπαρμένης φάσης. Η τελευταία σημαίνει το σχήμα και το μέγεθος των διεσπαρμένων σωματιδίων, την κατανομή τους, και τον προσανατολισμό τους, σχήμα 5.2.

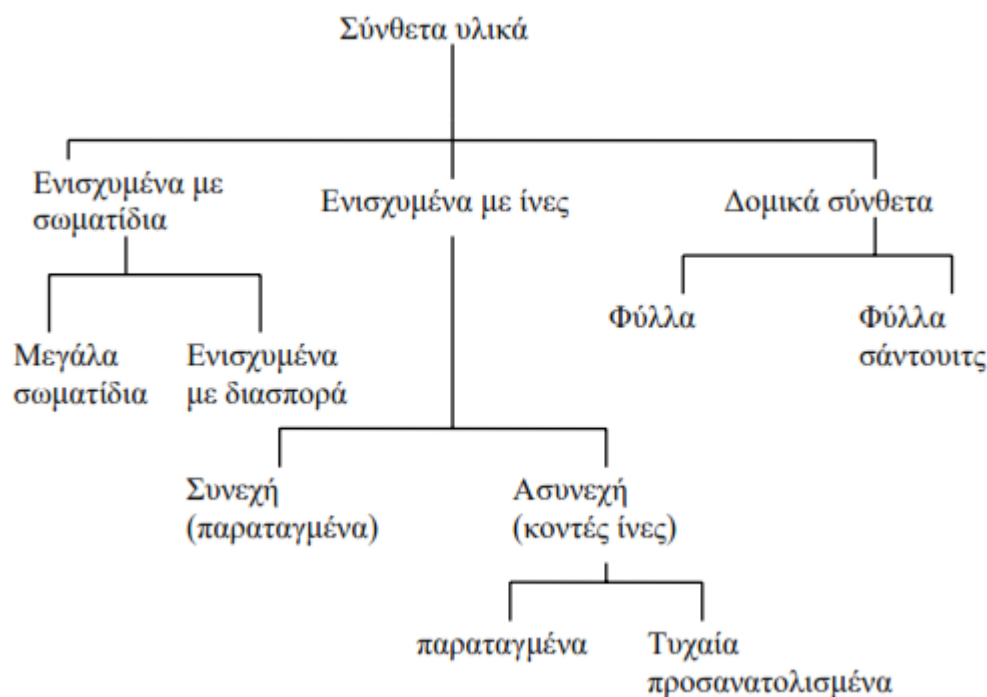


Σχήμα 5.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διεσπαρμένης φάσης σε σύνθετο υλικό
a) συγκέντρωση, b) μέγεθος, c) σχήμα, d) κατανομή, e) προσανατολισμός.

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών (fibrous composites).
- Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων (particulate composites).
- Στρωματικά σύνθετα ή δομικά, δηλαδή με επάλληλες στρώσεις υλικών (laminar composites).

Κάθε κατηγορία ανάλογα με τη μορφή και γεωμετρία της διεσπαρμένης φάσης παρουσιάζει υποδιαιρέσεις, σχήμα 5.3



Σχήμα 5.3: Ταξινόμηση διαφόρων τύπων συνθέτων υλικών

5.3 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών

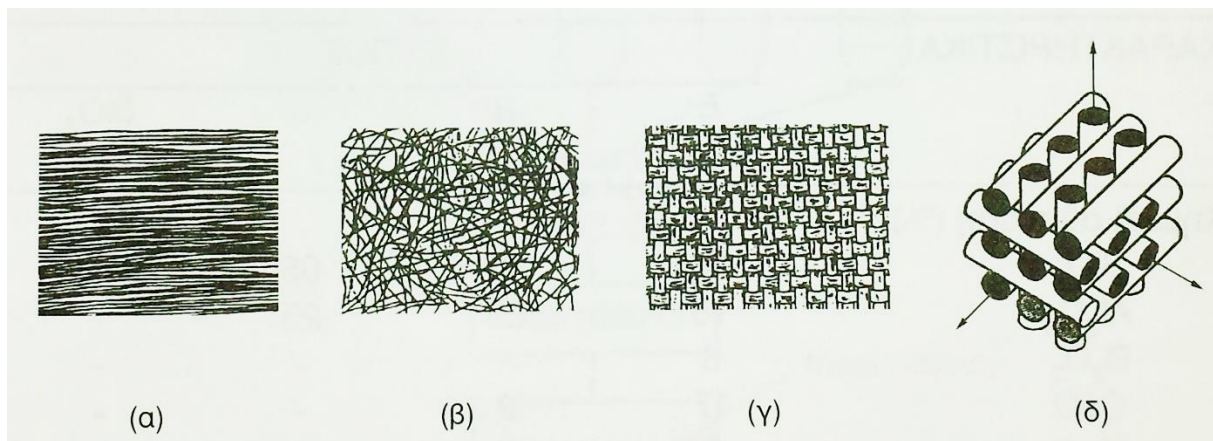
Η μηχανική αντοχή των σύνθετων υλικών εξαρτάται από το υλικό της ενίσχυσης, το υλικό της μήτρας, τη μηχανική συμπεριφορά των δύο, αλλά και από τη μεταξύ τους «συμβατότητα», αφού η καλή συνάφεια ινών-μήτρας είναι καίριας σημασίας για την αντοχή του σύνθετου. Επίσης, η αντοχή του σύνθετου επηρεάζεται από την η κατ' όγκο αναλογία των ινών και τον προσανατολισμό τους ως προς τη διεύθυνση της επιβαλλόμενης τάσης.

Τα ινώδη σύνθετα, ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα, διακρίνονται, σχήμα 5.4 σε :

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα, όταν όλες οι ίνες έχουν την ίδια διεύθυνση
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα, όταν οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις

Τα πολυδιευθυντικά σύνθετα διακρίνονται επιμέρους σε:

- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης
- Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση



Σχήμα 5.4 Διάταξη των ινών α) μονοδιευθυντικές ίνες (μονοαξονικό ύφασμα), β) ίνες άτακτων διευθύνσεων (πλέγμα) (γ) πλέξη ύφανσης (ύφασμα) και (δ) ίνες σε τρισδιάστατη πλέξη (πεπλεγμένο ύφασμα).

Πέραν του προσανατολισμού, μία επιπλέον διάκριση συνθέτων στηρίζεται στον λόγο μήκος (l) προς διάμετρο (d) της ίνας, έχοντας:

- Σύνθετα με συνεχείς (continuous) ή μεγάλου μήκους ίνες ($l/d > 100$)
- Ασυνεχείς (discontinuous) ή κοντές ίνες ($l/d < 100$)
- Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers, μονοκρύσταλοι κεραμικού υλικού)

5.3.1 Ίνες συνθέτων υλικών

Προκειμένου να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, οι ίνες κατασκευάζονται από υλικό που να παρουσιάζει, υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E), υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (UTS), μεγάλη ακαμψία, χαμηλή δυσθραυστότητα και μικρή πυκνότητα.

Τα περισσότερα ενισχυτικά υλικά βασίζονται σε στοιχεία της 2^{ης} και 3^{ης} περιόδου του Περιοδικού Συστήματος: (Be, B, C, N, O, Mg, Al, Si)

Στα προηγμένα σύνθετα υλικά οι ενισχυτικές ίνες είναι κατασκευασμένες είτε από ανόργανα υλικά (γυαλί, άνθρακας, μέταλλα, κεραμικά) είτε από οργανικά υλικά (πολυμερή).

Ίνες γυαλιού

Ήταν οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν και η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς έως σήμερα. Αποτελούνται από SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , MgO και θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση και τις ιδιότητές του οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E (Electrical, χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας), E-CR (αντοχή

στη διάβρωση), (Chemical, χημική αντοχή), S (Strength, υψηλής μηχανικής αντοχής), M (modulus, high stiffness, A (υψηλά ποσοστά αλκαλίων, D (χαμηλή διηλεκτρική συμπεριφορά), R (Resistance, υψηλής μηχανικής αντοχής).

Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες ίνες γυαλιού (90% των περιπτώσεων) είναι τύπου E. Αυτές παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες, καλά χαρακτηριστικά διαμόρφωσης, καλή αντοχή στην υγρασία και μέτρια ανθεκτικότητα σε χημικά αντιδραστήρια. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των ινών γυαλιού είναι η μεγάλη τους ευαισθησία σε λύσεις της συνέχειας της επιφάνειάς τους.

Ίνες άνθρακα

Μετά από σαράντα χρόνια ανάπτυξης και χρήσης σε ειδικές εφαρμογές οι ίνες άνθρακα βρίσκουν εκτεταμένη εμπορική χρήση. Χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροναυπηγική, στην αυτοκινητοβιομηχανία και καθώς ελαττώνεται το κόστος τους στα σπορ και στα καταναλωτικά προϊόντα. Το κόστος παραγωγής των ινών γραφίτη είναι δέκα φορές τουλάχιστον υψηλότερο από το κόστος παραγωγής των ινών γυαλιού.

Μέσω των ινών γραφίτη επιτυγχάνεται ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, δημιουργώντας σύνθετα υλικά ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι, συνήθως, ίνες άνθρακα. Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμούνται, όταν η θερμική διαστολή πρέπει να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών.

Η υπεροχή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα ως στοιχείου και στους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους. Τα άτομα C διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων, όπου ο ισχυρός δεσμός μεταξύ τους στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας παράλληλα στον διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων με υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής.

Τέλος, το κόστος παραγωγής των ινών γραφίτη είναι δέκα φορές τουλάχιστον υψηλότερο από το κόστος παραγωγής των ινών γυαλιού.

Τυπικές ιδιότητες ινών άνθρακα εμφανίζονται στον πίνακα 5.1

Πίνακας 5.1 : Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm ³)	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

Ίνες πολυμερούς (polymer fibers)

Οι ίνες αρωματικών πολυαμιδίων (Aramid) εμφανίστηκαν το 1970 έχοντας το υψηλότερο λόγο αντοχής βάρους, από όλα τα εμπορικά προϊόντα. Οι πιο γνωστές είναι ίνες από πολυαιθυλένιο, Nylon, και Kevlar (εμπορικές ονομασίες).

Τα τελευταία χρόνια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ικανοποιητικά ως υλικό ενίσχυσης, υπερβαίνοντας το πρόβλημα της χαμηλής στιβαρότητας των συνθετικών πολυμερών. Το μέτρο ελαστικότητας των ινών αυτών είναι ίσο ή και υψηλότερο αυτού των ινών γυαλιού.

Μεταλλικές ίνες

Διάφορα μέταλλα (κυρίως βόριο, βηρύλλιο και βολφράμιο) παρουσιάζουν υψηλή τιμή ακαμψίας σε σχέση με το ειδικό τους βάρος (ειδική ακαμψία) και θα μπορούσαν να αποτελέσουν εξαιρετικά ενισχυτικά συνθέτων υλικών. Ωστόσο, οι τεχνικές παραγωγής τέτοιων ινών είναι ακόμα πολύ δαπανηρές.

Κεραμικές ίνες

Οι κεραμικές ίνες που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου και αλούμινας, και λιγότερο οι ίνες Si₃N₄, BeO, B₄C και ZrO₂.

Τριχίτες (whiskers)

Οι τριχίτες είναι νηματικοί μονοκρυστάλλοι οι οποίοι παρουσιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλειου κρυστάλλου. Η διάμετρός τους είναι συνήθως 1 μm, ενώ το μήκος τους

μπορεί να φτάσει ως μερικά χιλιοστά. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τριχίτες είναι από αλούμινα, γραφίτη, καρβίδιο του πυριτίου, βηρύλλια και νιτρίδιο του πυριτίου.

5.3.2 Μήτρες (matrix-matrices)

Αν οι ίνες συνεισφέρουν στην υψηλή μηχανική αντοχή του σύνθετου, η μήτρα την εξασφαλίζει.

Ο ρόλος της μήτρας συνίσταται στη:

- Συγκράτηση των ινών μεταξύ τους
- Προστασία των ινών από περιβαλλοντικές φθορές και προσβολές
- Μεταβίβαση των μηχανικών τάσεων που ασκούνται συνολικά στο σύνθετο υλικό προς τις ίνες
- Ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών που ξεκινούν από θραύση των ινών.

Για να ανταποκρίνεται σε αυτόν το ρόλο, η μήτρα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα, σχετική ευκαμψία και σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συνθέτου υλικού. Οι ιδιότητες αυτές πρέπει, επίσης, να παρουσιάζουν συμβατότητα με τις αντίστοιχες ιδιότητες των ενισχυτικών ινών. Συνήθως, το υλικό της μήτρας έχει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες. Για τη σωστή λειτουργία του συνθέτου υλικού καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας-μήτρας. Η επιλογή της μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του συνθέτου.

Ανάλογα με το υλικό για τα σύνθετα υλικά διακρίνουμε τις ακόλουθες ομάδες υλικών μήτρας:

- Οργανικές μήτρες που διακρίνονται σε:

Θερμοπλαστικές που είναι πολυμερή υλικά με γραμμικές αλυσίδες. Έχουν χαμηλό κόστος και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Ως ενισχυτικά σε αυτές, χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμίαντος, μαρμαρυγίες, κ.λπ.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.

Θερμοσκληρυνόμενες (σε περιπτώσεις που απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες) Τέτοιες μήτρες είναι οι πολυεστερικές ρητίνες, που ενισχύονται με ίνες γυαλιού. Οι εποξειδικές ρητίνες, με καλύτερες ιδιότητες από τις προηγούμενες και με χρήση στην αεροναυπηγική. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι 200 °C.

Οι φαινολικές ρητίνες, που έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες, ωστόσο η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400 °C.

- Μεταλλικές μήτρες : Μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υλικά μήτρας προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα. Για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μητρών, αφού η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών είναι περίπου 300 °C, ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία υψηλότερη των 500 °C. Επομένως, για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μητρών.
- Κεραμικές μήτρες: Τα κεραμικά υλικά, είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και τη χημική προσβολή. Οι ίνες στην περίπτωση της κεραμικής μήτρας αποβλέπουν, αφενός μεν, στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αιφνιδιασμούς, αφετέρου δε, στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής.

5.4 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων

Τα σύνθετα υλικά στα οποία το υλικό ενίσχυσης έχει μορφή σωματιδίων, σφαιρικού συνήθως σχήματος, μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες με βάση το μέγεθος αυτών:

- Σύνθετα με ενίσχυση σωματιδίων μεγάλου μεγέθους (particulate composites). Τα σωματίδια έχουν διάμετρο λίγων μm και περιέχονται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 25% - συνήθως η κατ' όγκο συγκέντρωσή τους είναι 60-90%.
- Σύνθετα με ενίσχυση μικρών σωματιδίων σε διασπορά (dispersion-strengthened metals). Η ενισχυτική φάση -συνήθως πρόκειται για οξείδια- περιέχεται στο σύνθετο σε συγκεντρώσεις μικρότερες από 15% κ.ο. Η διάμετρος των σωματιδίων ποικίλλει μεταξύ 0,01 και 0,1 μm. Η ισχυροποίηση της μήτρας επιτυγχάνεται με την παρεμπόδιση της κίνησης των διαταραχών, λόγω της παρουσίας των σωματιδίων ενίσχυσης.

Τα σύνθετα με ενίσχυση σωματιδίων είναι λιγότερο ανθεκτικά από τα σύνθετα με ενίσχυση ινών, διότι η συμβολή των σωματιδίων στην αντοχή του σύνθετου υλικού είναι μικρότερη αυτής των ινών. Είναι χαμηλότερου κόστους σε σχέση με τα σύνθετα με ίνες και έχουν καλύτερη αντοχή σε φθορά-τριβή λόγω της παρουσίας σκληρών σωματιδίων.

5.5 Στρωματικά σύνθετα υλικά

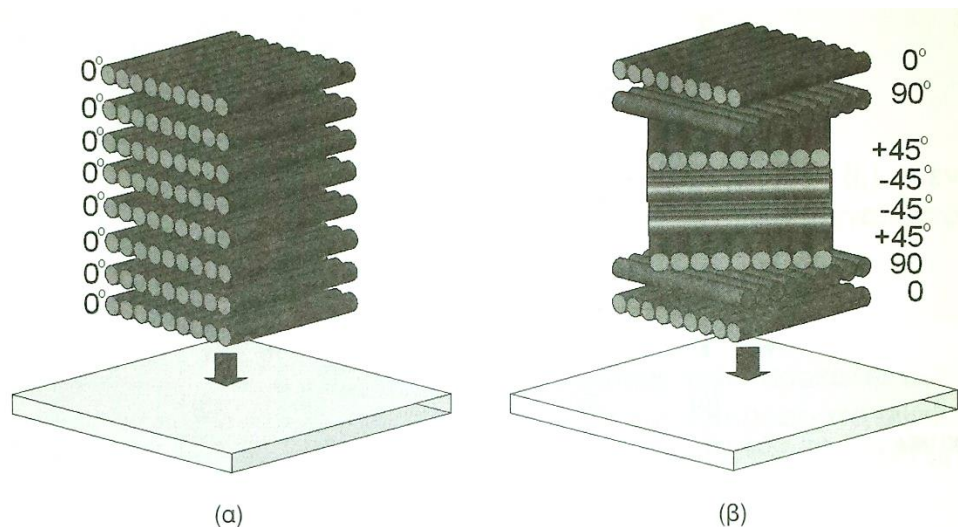
Τα στρωματικά σύνθετα υλικά (laminar composites) περιλαμβάνουν μια μεγάλη ποικιλία συνδυασμού υλικών, τα οποία διατάσσονται σε διαδοχικές στρώσεις, προκειμένου να συνθέσουν το τελικό προϊόν.

Στα στρωματικά σύνθετα περιλαμβάνονται:

- Επιστρωμένα υλικά, δηλαδή υλικά με μικρού και μεγάλου πάχους επιστρώματα.
- Διμεταλλικά, δηλαδή υλικά με δυο μεταλλικές στρώσεις της ίδιας τάξης μεγέθους.
- Πολυστρωματικά, δηλαδή υλικά πολλών διαδοχικών στρώσεων.

Συνήθως, ένα σύνθετο υλικό δεν είναι μονοστρωματικό, αλλά πολυστρωματικό. Αν οι ίνες κάθε στρώσης έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, το σύνθετο είναι ανισότροπο. Οι συνεχείς μονοδιευθυντικές ίνες παρουσιάζουν ισχυρή ανισοτροπία και η μηχανική τους αντοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου.

Ισότροπο σύνθετο λαμβάνεται στην περίπτωση κατά την οποία η ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών βρίσκεται υπό τη μορφή διαδοχικών στρώσεων διαφορετικού προσανατολισμού, σχήμα 5.5.

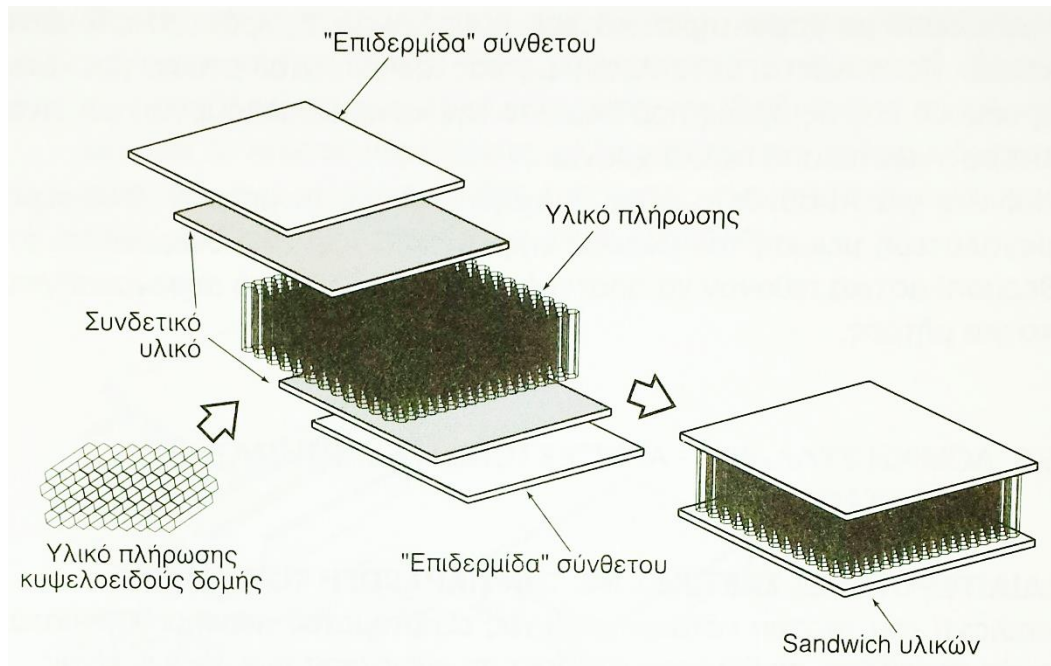


Σχήμα 5.5 Πολυστρωματικά σύνθετα με ενίσχυση στρώσεων μονοδιευθυντικών ινών:

(α) ανισότροπο και (β) ισότροπο σύνθετο.

- Σάντουιτς υλικά, δηλαδή υλικά που προκύπτουν από τη σύνδεση, κόλληση ή συγκόλληση δυο λεπτών επιδερμίδων υλικού υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων πάνω σε μια καρδιά ή ψίχα ελαφρού υλικού χαμηλών ιδιοτήτων που καλείται υλικό πλήρωσης. Συνήθως αυτό είναι

κάποιο αφρώδες πολυμερές είτε κάποιο ελαφρύ μέταλλο (π.χ. Al) , διαμορφωμένο σε κυψελοειδή γεωμετρία, σχήμα 5.6. [Παναγόπουλος, 1990, Παντελής, 2008, ASM, vol. 21]



Σχήμα 5.6 : Σύνθετο υλικό τύπου σάντουιτς με εξαγωνικές κυψελίδες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στο πειραματικό μέρος για τη σύγκριση συμβατικών και μη συμβατικών μεθόδων κοπής ακολουθήθηκε η διαδικασία όπως εμφανίζεται στον παρακάτω πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1 : Διαδικασία πειραματικού μέρους

Έλεγχος ποιότητας κοπής	Εργασία
Υλικό 1. Κράμα Αλουμινίου 7075 - O	Κοπή Διαστασιακός έλεγχος Μικροσκοπία (Οπτική, Στερεοσκοπία) Τραχυμετρία (Προφίλομετρία)
2. Σύνθετα στρωματοειδή υλικά (Εποξειδική μήτρα ενισχυμένη με ίνες άνθρακα)	Παρασκευή αυτών Κοπή, Μικροσκοπία (Οπτική, Στερεοσκοπία)
Έλεγχος μηχανικών ιδιοτήτων 1. Κράμα Αλουμινίου 7075 - O	Μικροσκληρότητα
Έλεγχος αντοχής σε διάβρωση	
2. Σύνθετα στρωματοειδή υλικά	Αντοχή σε Εφελκυσμό

Μελετήθηκε η κοπή με λέιζερ μεταλλικών υλικών κράματος Al 7075-O (Bare και Alclad) σε φύλλα πάχους 2mm και 5mm και η κοπή σύνθετων θερμοσκληρυνόμενων υλικών με μήτρα από εποξειδική ρητίνη, ενισχυμένη με ίνες άνθρακα (carbon fiber reinforced epoxy resin matrix).

Τα παραπάνω υλικά είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα στην αεροναυπηγική για την κατασκευή των δομικών μερών αεροσκαφών, συνδυάζοντας υψηλή αντοχή και χαμηλό βάρος.

Κατ' αρχάς, κόπηκαν τα υλικά με συμβατικές μεθόδους κατεργασίας (ψαλίδι, τροχός, αδαμαντοκορδέλα). Αντίστοιχα δοκίμια κόπηκαν με λέιζερ συνεχούς λειτουργίας CO₂ και λέιζερ παλμικού τύπου Nd : YAG (μόνο για τα σύνθετα υλικά, ενδεικτικά).

Οι παράγοντες που εξετάστηκαν κατά την κοπή με λέιζερ ήταν η ταχύτητα κοπής, η ισχύς της δέσμης (πυκνότητα ισχύος), το είδος και η πίεση του βοηθητικού - προστατευτικού αερίου.

Τα δοκίμια κράματος αλουμινίου για την αξιολόγηση της ποιότητας κοπής μελετούνται και συγκρίνονται ως προς την ποιότητα κοπής (διαστασιακός έλεγχος, οπτική παρατήρηση, στερεοσκοπία, τραχυμετρία, σκληρομέτρηση, μεταλλογραφία, μικροσκληρότητα και αντοχή σε διάβρωση).

Τα δοκίμια συνθέτων στρωματοειδών υλικών παρασκευάζονται δια χειρός και μετά την κοπή εξετάζονται με μικροσκοπία, έλεγχο με υπερήχους (c-scan) και αντοχή σε εφελκυσμό.

Επίσης δοκιμάζεται και η κοπή με λέιζερ συνθέτου υλικού τύπου σάντουιτς.

6.1 Συνθήκες κοπής δοκιμίων

Στους παρακάτω πίνακες εμφανίζονται οι συνθήκες κοπής Al 7075 πάχους 2,1 mm (αρχικό υλικό 0,5 X 0,5 m) (πίνακας 6.2) και Alclad πάχους 2,3 mm (πίνακας 6.3), που έχουν κοπεί με laser CO₂ στην EBETAM (Laser CO₂ ισχύος 1,5kW με τραπέζι κατεργασίας 4 αξόνων) και στο LIC.)

Οι παράγοντες που μελετήθηκαν κατά την κοπή είναι η ταχύτητα κοπής από 0,8 έως 2,4 m/min (δοκίμια σειράς A1-A5), η πίεση του βοηθητικού - προστατευτικού (shielding, assisting gas) αερίου από 6 έως 9 bar (δοκίμια σειράς B6-B9) και η ισχύς της δέσμης από 1140 έως 1500 Watt (δοκίμια σειράς Γ1β-Γ1δ) για τα δοκίμια από EBETAM. Η διάμετρος της δέσμης στο σημείο εστίασης είναι 0,2 mm.

Τα κύρια φαινόμενα που επηρεάζουν την απομάκρυνση του υλικού κατά την κοπή με laser εικονίζονται στο σχήμα 6.1. Πρώτα μέρος της προσπίπτουσας ακτίνας απορροφάται μερικώς από την ύπαρξη πλάσματος πάνω από το μέτωπο κοπής. Επίσης, η επιφάνεια κοπής αντανακλά μέρος της ενέργειας της ακτίνας και το υπόλοιπο μέρος αυτής διαμοιράζεται στην απαγωγή θερμότητας διαμέσου του υλικού και στην αλλαγή φάσης (τήξη, εξάτμιση) στο μέτωπο κοπής. Αυτή η αλλαγή φάσης διαδίδει την εντομή (kerf) και καταλήγει στην απομάκρυνση του υλικού. Άλλοι παράγοντες περιλαμβάνουν τη διάδοση θερμότητας μέσα στο τηγμένο στρώμα, την απαγωγή θερμότητας από τη ροή του αερίου μέσα στην εντομή (kerf) και δευτερεύουσες ανακλάσεις από τα τοιχώματα της εντομής (kerf).

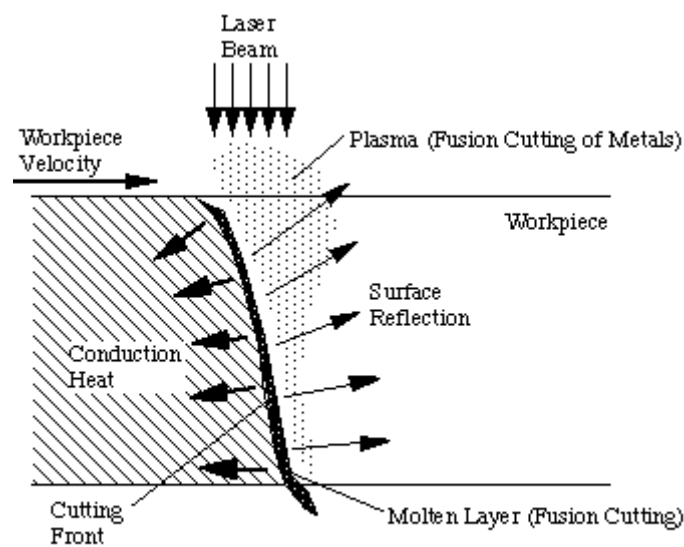


Figure 1: Main Effects During Laser Cutting

Σχήμα 6.1: Κύρια φαινόμενα κατά την κοπή με laser.

Η πυκνότητα ισχύος υπολογίζεται σε : Ισχύς εξόδου / επιφάνεια εστίασης, που θεωρείται κύκλος ακτίνας 0,1 mm. Οπότε 1290 Watt ισχύος δέσμης αντιστοιχούν σε πυκνότητα ισχύος 0,41 MW/mm².

Πίνακας 6.2 : Συνθήκες κοπής δοκιμίων Al 7075 στην EBETAM.

Δοκίμιο	Συνθήκες κοπής laser CO ₂ EBETAM				
	Ταχύτητα κοπής (m/min)	Είδος αερίου	Πίεση αερίου (bar)	Ισχύς δέσμης (Watt)	Πυκνότητα ισχύος (MW/mm ²)
A1	0,8	O ₂	8	1290	0,41
A2	1,2	O ₂	8	1290	0,41
A3	1,6	O ₂	8	1290	0,41
A4	2,0	O ₂	8	1290	0,41
A5	2,4	O ₂	8	1290	0,41
B6	1,6	O ₂	6	1290	0,41
B7	1,6	O ₂	7	1290	0,41
B8	1,6	O ₂	8	1290	0,41
B9	1,6	O ₂	9	1290	0,41
Γ1α	1,2	O ₂	8	1140	0,36
Γ1β	1,2	O ₂	8	1270	0,40
Γ1γ	1,2	O ₂	8	1360	0,43
Γ1δ	1,2	O ₂	8	1500	0,48

Πίνακας 6.3 : Συνθήκες κοπής δοκιμίων Al 7075 πάχους 2 mm στο LIC

Δοκίμιο	Ταχύτητα κοπής (m/min)	Είδος αερίου	Πίεση αερίου (bar)	Ισχύς δέσμης (Watt)
1	0,75	O ₂	5	1500
2	1,05	O ₂	5	2000
3(δεν κόπηκε)	0,45	O ₂	5	1000
4	0,45	N ₂	5	2000
5	0,45	Πεπ. Αέρας	5	1500
6	1,8	O ₂	5	2000

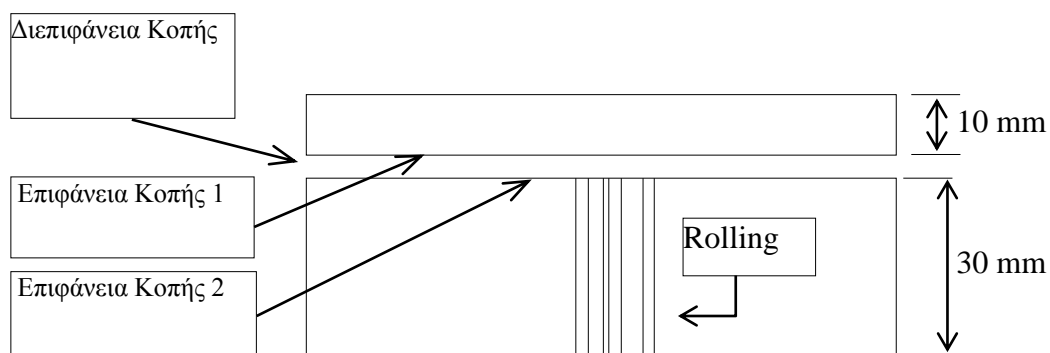
Πίνακας 6.4 : Συνθήκες κοπής δοκιμίων Al 7075 πάχους 5 mm στο LIC

Δοκίμιο	Ταχύτητα κοπής (m/min)	Είδος αερίου	Πίεση αερίου (bar)	Ισχύς δέσμης (Watt)
1	0,45	O ₂	5	1500
2	0,75	O ₂	5	2000
3(δεν κόπηκε)	1,05	O ₂	5	1000

Πίνακας 6.5 : Συνθήκες κοπής δοκιμίων Alclad 7075 πάχους 2 mm στο LIC

Δοκίμιο	Ταχύτητα κοπής (m/min)	Είδος αερίου	Πίεση αερίου (bar)	Ισχύς δέσμης (Watt)
C1	0,75	O ₂	5	2000
C2	1,20	O ₂	5	2000
C3	1,80	O ₂	5	2000
C4	1,20	N ₂	5	2000

Τα δοκίμια από φύλλο Al 7075 στην EBETAM κόπηκαν σε λωρίδες διαστάσεων 10 X 100 mm και 30 X 100 mm, κάθετα στο rolling (διεύθυνση έλασης) του υλικού σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα 6.2. Στο LIC κόπηκαν απλά σε λωρίδες.

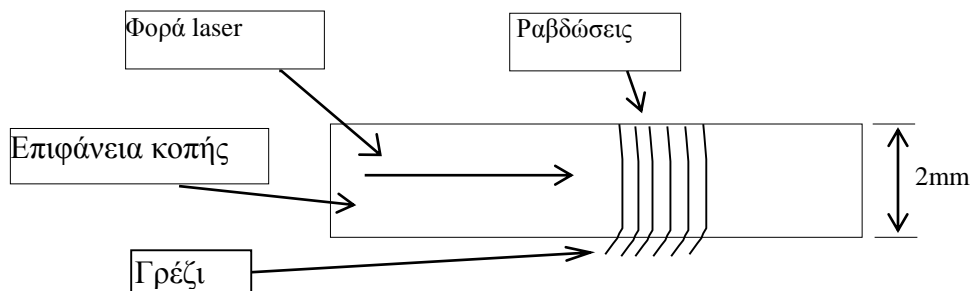


Σχήμα 6.2: Κοπή δοκιμίων Al 7075 στην EBETAM.

6.2 Μακροσκοπικός έλεγχος – Στερεοσκοπία

Τα δοκίμια Al 7075 πλάτους 1 cm παρατηρήθηκαν και φωτογραφήθηκαν σε στερεοσκόπιο, όπου μελετήθηκε η μορφολογία της επιφάνειας κοπής.

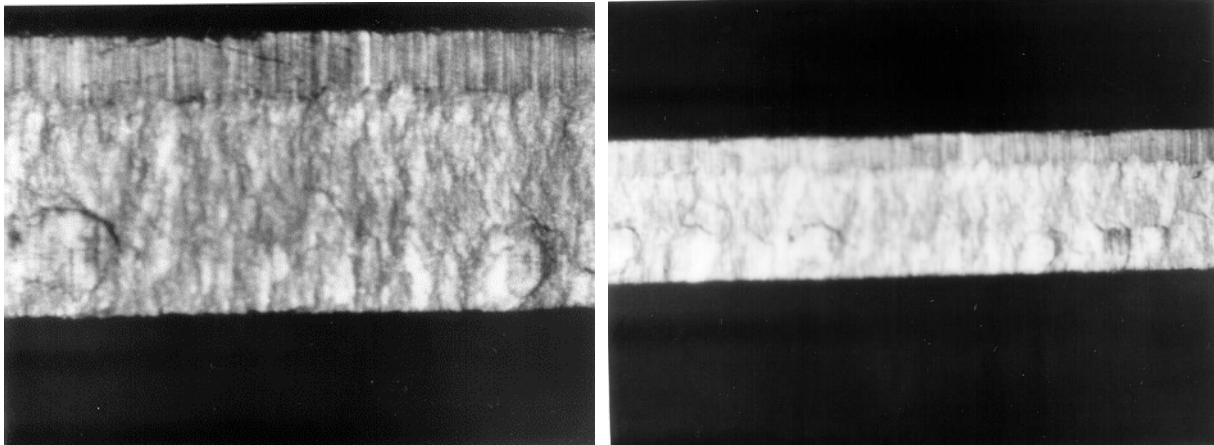
Στην επιφάνεια κοπής εμφανίζονται κατακόρυφες «ραβδώσεις, λωρίδες», που σχηματίζονται κατά την κοπή με λέιζερ λόγω της τοπικής τήξης, εξάτμισης και κατόπιν ταχείας στερεοποίησης του εναπομείναντος υλικού. Οι ραβδώσεις αυτές ξεκινούν από το σημείο εισόδου του λέιζερ στο πάνω μέρος του υλικού, διατρέχουν όλο το πάχος του και καταλήγουν στο κάτω μέρος του υλικού, στο σημείο εξόδου του λέιζερ όπου εμφανίζεται το τηγμένο και εκ νέου στερεοποιημένο υλικό (dross), που το αναφέρουμε ως «γρέζι» και έχει φορά αντίθετη ως προς τη φορά κοπής. Το γρέζι έχει μεγάλο μήκος, που φθάνει ως και 30 % του πάχους του υλικού. Τα παραπάνω εμφανίζονται στο σχήμα 6.3.



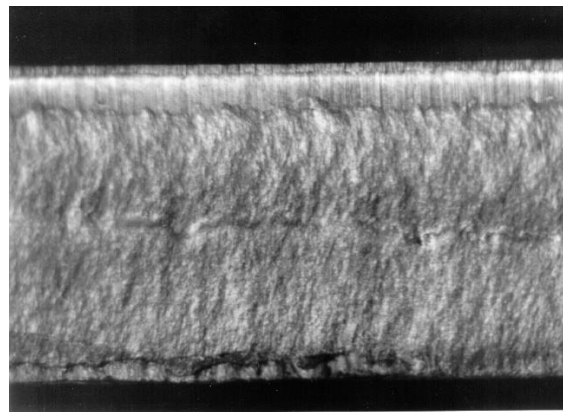
Σχήμα 6.3 : Μορφολογία της επιφάνειας κοπής με λέιζερ. Μέτρηση της τραχύτητας της επιφάνειας κοπής, παράλληλα στη φορά του λέιζερ και κάθετα στις δημιουργηθείσες «ραβδώσεις, λωρίδες» από την τήξη του υλικού.

Βέβαια, ο μηχανισμός δημιουργίας των ραβδώσεων αυτών είναι πολύπλοκος και μπορεί ακόμα και οι δυο αντικρινές επιφάνειες της εντομής να μην έχουν την ίδια μορφή, ως προς τις ραβδώσεις και την προκύπτουσα τραχύτητα.

Στις φωτογραφίες 1 έως 5 εμφανίζεται η προκύπτουσα επιφάνεια κατά την κοπή Al 7075 πάχους 2 και 5 mm με συμβατικές μεθόδους, δηλαδή με ηλεκτροϋδραυλικό ψαλίδι και τροχό αντίστοιχα.



Φωτό 1, 2 : Κοπή Al 7075 – Ο πάχους 2mm με ψαλίδι, μεγέθυνση X25 και X12

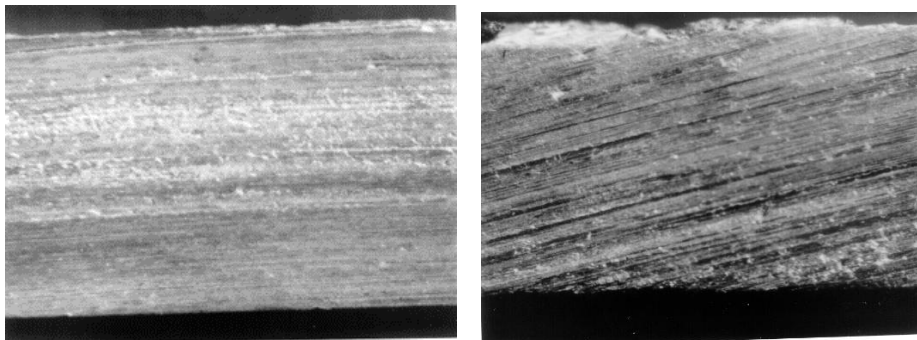


Ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης

Ζώνη θραύσης

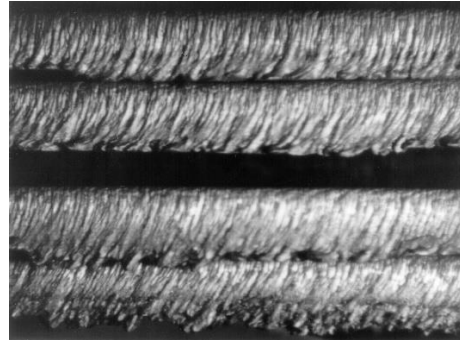
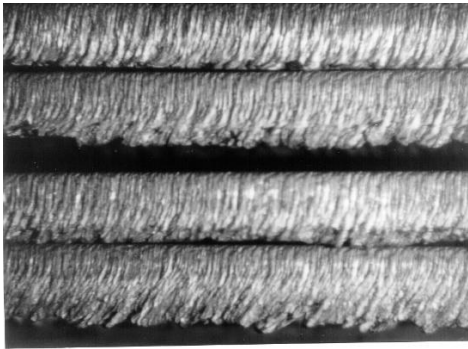
Φωτό 3 : Κοπή Al 7075 – Ο πάχους 5mm με ψαλίδι, μεγέθυνση X12

Στις παραπάνω φωτός διακρίνονται η ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης και η ζώνη θραύσης



Φωτό 4,5: Κοπή Al 7075 – Ο πάχους 5mm με τροχό, μεγέθυνση X12 και πάχους 2mm, X25
 Διακρίνονται οι χαρακτηριστικές γραμμές από τις διαδοχικές ζώνες αφαίρεσης του υλικού.

Στις φωτογραφίες 6 έως 15 εμφανίζεται η προκύπτουσα επιφάνεια κατά την κοπή Al 7075 πάχους 2 και 5 mm με λέιζερ CO₂ για διάφορες ταχύτητες κοπής, Ισχύς 1290W, αέριο O₂.



Φωτό 6, 7 : Κοπή με λέιζερ CO₂ Al 7075-O (Δοκίμια A1 – A4)
με ταχύτητα κοπής, 0,8 - 2m/min, μεγέθυνση X6, Ισχύς δέσμης 1290W

Διακρίνονται οι ραβδώσεις και το «γρέζι»,dross στην έξοδο του λέιζερ

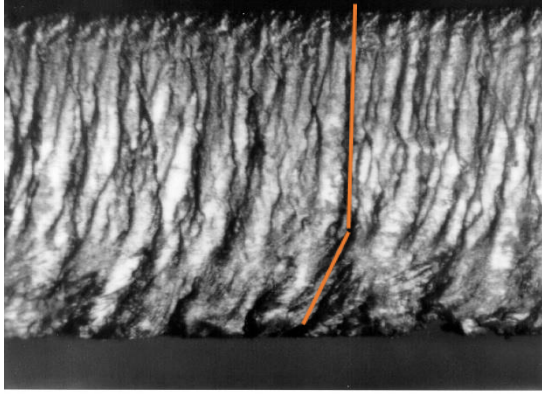
Οι ραβδώσεις διαμορφώνουν την τραχύτητα της επιφάνειας κοπής, η οποία μαζί με το γρέζι καθορίζουν την ποιότητα κοπής. Οι ραβδώσεις επηρεάζονται από τις συνθήκες κοπής (ταχύτητα, ισχύς δέσμης και είδος και πίεση προστατευτικού αερίου), όπως φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες.

Στα δοκίμια που κόπηκαν στην EBETAM παρατηρούμε τα εξής:

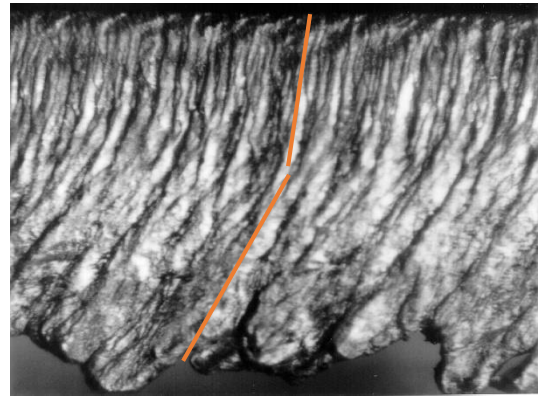
Η ταχύτητα κοπής φαίνεται να επηρεάζει το σχηματισμό ραβδώσεων κατά τον ακόλουθο τρόπο:

Όσο η ταχύτητα κοπής αυξάνει, ο θερμικός κύκλος κάθε σημείου και η θερμική κατανομή μειώνονται.

Στη μικρότερη ταχύτητα κοπής A1 (φωτογραφία 8) εμφανίζονται λίγες, σχεδόν ίσιες και μεγάλου πλάτους ραβδώσεις, που αυξάνουν την τραχύτητα της επιφάνειας κοπής.



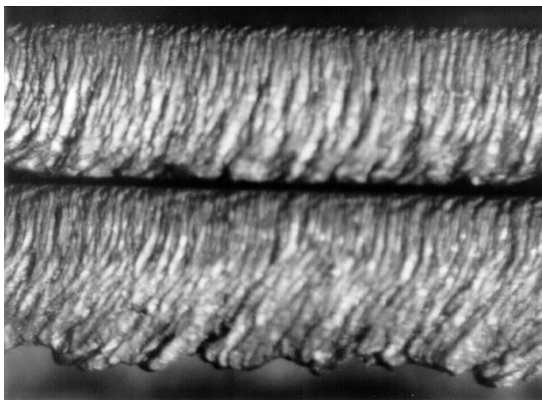
Φωτό 8: (Δοκίμιο A1) Al 7075-O
Κοπή με laser CO₂, ταχύτητα, 0,8 m/min, X25



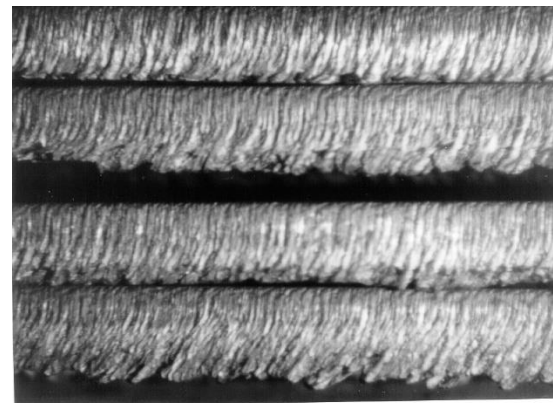
Φωτό 9: (Δοκίμιο A4) Al 7075-O,
Κοπή με laser CO₂, ταχύτητα, 2m/min, X25

Οι ραβδώσεις είναι ίσιες, γιατί στη μικρή ταχύτητα το αέριο διώχνει αποτελεσματικά τα προϊόντα από το μέτωπο κοπής. Στη μικρή ταχύτητα κοπής λόγω του μεγάλου θερμικού κύκλου η στερεοποίηση του εναπομείναντος υλικού γίνεται βραδύτερα και οι ραβδώσεις έχουν μεγαλύτερο χρόνο να αναπτυχθούν. Οπότε είναι λίγες σε αριθμό και με μεγάλο πλάτος.

Στη μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής A4 (φωτογραφία 9) ισχύει το αντίθετο. Εμφανίζονται πιο πολλές ραβδώσεις, καμπυλωτές και μικρότερου πλάτους που ελαττώνουν την τραχύτητα της επιφάνειας κοπής. Επίσης εμφανίζεται και γρέζι (dross). Συγκριτικά αυτό εμφανίζεται στις φωτογραφίες 10 (A1, A4) και 6 (A1, A2, A3, A4).



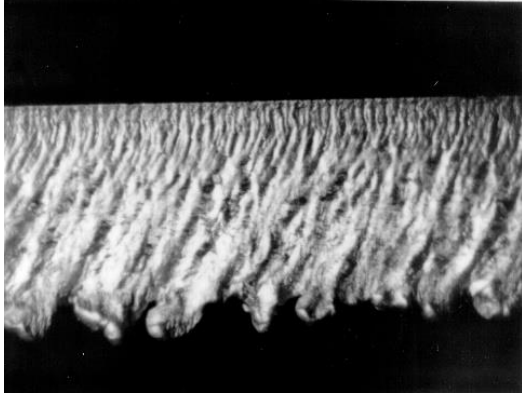
Φωτό 10 Κοπή με λέιζερ CO₂ Al 7075-O
(Δοκίμια A1 & A4), X12, ταχύτητα κοπής
0,8 & 2 m/min, μεγέθυνση X12



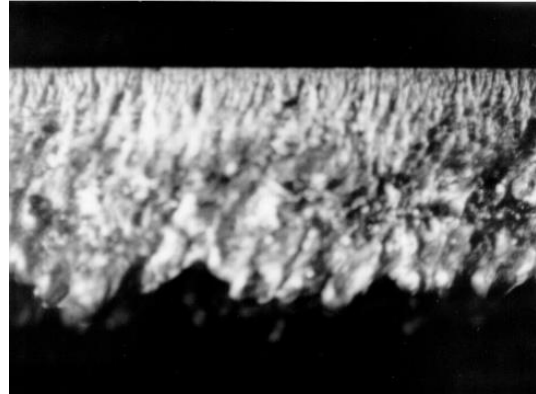
Φωτό 6. Αντίστοιχα Δοκίμια A1, A2, A3, A4
ταχύτητα κοπής, 0,8 - 2m/min, μεγέθυνση X6

Επίσης, το γρέζι στο κάτω μέρος του δοκιμίου εμφανίζεται μεγαλύτερο σε μέγεθος, καθώς αυξάνει η ταχύτητα κοπής για τις συγκεκριμένες συνθήκες κοπής.

Τα παραπάνω διακρίνονται και στις φωτογραφίες 11-12, όπου εμφανίζονται τα δοκίμια Al 7075 πάχους 5 mm που κόπηκαν με μικρή και μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής.



Φωτό 11 Κοπή με λέιζερ CO₂ Al 7075-O πάχους 5mm , ταχύτητα κοπής 0.45m/min Ισχύς δέσμης 1500W, μεγέθυνση X6

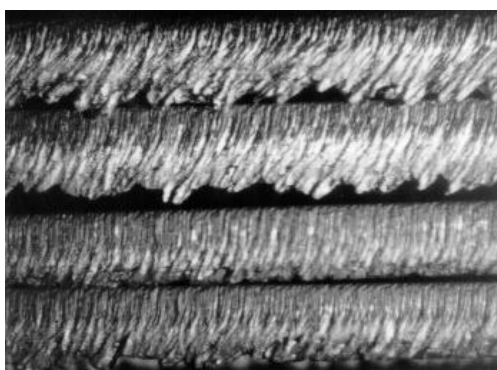


Φωτό 12. Αντίστοιχο Δοκίμιο 2, πάχους 5mm ταχύτητα κοπής, 0,75m/min, μεγέθυνση X6 Ισχύς δέσμης 2000W

Στις παραπάνω φωτογραφίες εμφανίζεται ότι για δοκίμια πάχους 5mm οι συνθήκες κοπής είναι οριακές. Το υλικό κόβεται μεν με ταχύτητα 0,75m/min και μεγαλύτερη ισχύ δέσμης, αλλά με απαράδεκτη ποιότητα επιφάνειας κοπής. Περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής δεν επιτεύχθη.

Το βοηθητικό - προστατευτικό αέριο χρησιμεύει για την απομάκρυνση των ατμών και του τηγμένου μετάλλου από το μέτωπο κοπής. Πρέπει η πίεση του αερίου να είναι μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη τιμή ώστε να κοπεί το υλικό.

Χαμηλή πίεση αερίου δεν απομακρύνει επαρκώς τα προϊόντα κοπής και το υλικό κόβεται δύσκολα (B4-B5, O₂ 4-5 bar) ως καθόλου (B1-B3 , O₂ 1-3 bar). Στη φωτογραφία 13 εικονίζονται τα δοκίμια B6,B7,B8,B9 που κόπηκαν με οξυγόνο πίεσης 6,7,8,9 bar αντίστοιχα.



Δοκίμιο B6

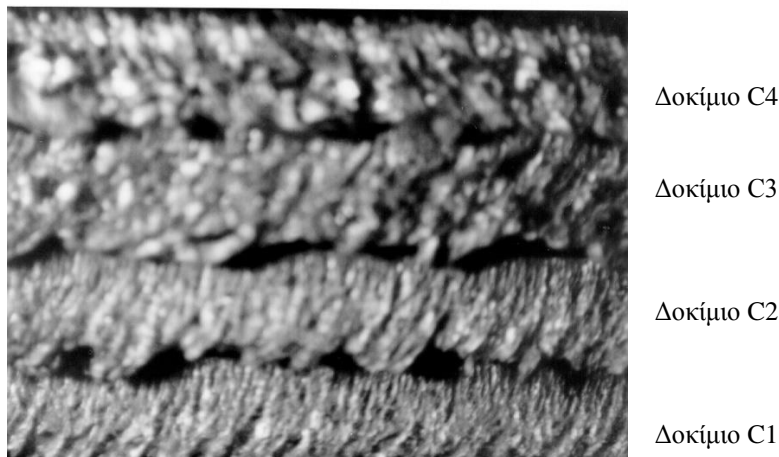
Δοκίμιο B7

Δοκίμιο B8

Δοκίμιο B9

Φωτό 13. Κοπή με λέιζερ CO₂ Al 7075-O (Δοκίμια B6,B7,B8,B9) πάχους 2mm, ταχύτητα κοπής 1,6m/min, Ισχύς δέσμης 1290 W, Αέριο O₂ πίεσης 6 έως 9bar, μεγέθυνση X6

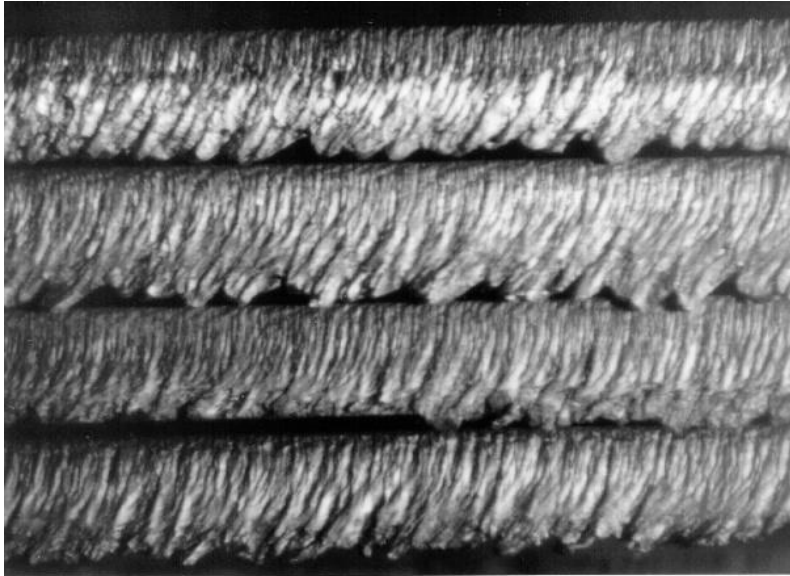
Στο B6 εμφανίζονται ραβδώσεις μεγάλου πλάτους, ενώ προοδευτικά ως το B9 εξομαλύνονται. Επιπρόσθετα η χρήση οξυγόνου αντί αζώτου αυξάνει την ικανότητα κοπής λόγω της εξώθερμης αντίδρασης που δημιουργείται. Αυτό φαίνεται και στη φωτογραφία 14, όπου η κοπή των C2 και C4 διαφέρει ως προς τη χρήση O₂ έναντι N₂. Η τραχύτητα του δοκιμίου C4 είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του C2 με απαράδεκτη επιφάνεια κοπής.



Φωτό 14. Κοπή με λέιζερ CO₂ Al 7075-O (Δοκίμια C1,C2,C3,C4) πάχους 2mm, μεγέθυνση X12
ταχύτητα κοπής (C1-C3) 0,75 έως 1,8m/min, Ισχύς δέσμης 2000W, Αέριο O₂ πίεσης 5bar,
Δοκίμιο C4 ταχύτητα κοπής 1,2m/min, Ισχύς δέσμης 2000W, Αέριο N₂ πίεσης 5bar,

Η ισχύς της δέσμης εξόδου του λέιζερ επηρεάζει την κοπή ως εξής : Η ισχύς πρέπει να είναι τέτοια ώστε να κοπεί ικανοποιητικά το υλικό. Μεγαλύτερη ισχύς πρέπει να συνδυαστεί με μεγάλη ταχύτητα κοπής, για να έχει το αποτέλεσμα οικονομική σημασία.

Η ισχύς της δέσμης και ο θερμικός κύκλος είναι μεγέθη ανάλογα. Όσο η ισχύς αυξάνεται, ο θερμικός κύκλος αυξάνεται, η στερεοποίηση γίνεται βραδύτερα και οι ραβδώσεις αυξάνουν σε πλάτος και το αντίθετο. Στη φωτογραφία 15 εικονίζονται τα δοκίμια Γ1α, Γ1β, Γ1γ, Γ1δ.



Δοκίμιο Γ1α

Δοκίμιο Γ1β

Δοκίμιο Γ1γ

Δοκίμιο Γ1δ

Φωτό 15. Κοπή με λέιζερ CO₂ Al 7075-O (δοκίμια Γ1α, Γ1β, Γ1γ, Γ1δ) πάχους 2mm, μεγέθυνση X6 ταχύτητα κοπής 1,2m/min, Ισχύς δέσμης 1140 – 1270 – 1360 - 1500W, Αέριο O₂ πίεσης 8bar.

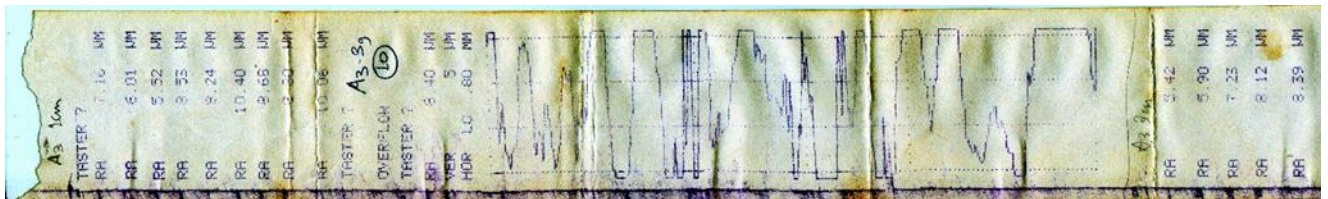
6.3 Αποτελέσματα Τραχύτητας

Για τον προσδιορισμό της τραχύτητας της επιφάνειας, που προέκυψε κατά την κοπή του κράματος αλουμινίου 7075 (bare και Alclad) με laser, μηχανικό ψαλίδι και κοπτικό τροχό χρησιμοποιήθηκε το τραχύμετρο, προφιλόμετρο Perthometer M4P της Perthen.

Μετρήθηκε η ολική μέση τραχύτητα Ra σύμφωνα με την κατά τα πρότυπα DIN δοκιμή 4768. Το Ra είναι ο ολικός μέσος όρος της επιφάνειας, που περιγράφεται από τις αποκλίσεις της ακίδας ως προς μία γραμμή αναφοράς, κατά τη μέτρηση του συνολικού διανυομένου μήκους (lt) της ακίδας του ανιχνευτή τραχύτητας πάνω στην εξεταζόμενη μεταλλική επιφάνεια.

$$Ra = \left(\frac{1}{lt} \right) \int_0^{lt} |y| dx$$

Για κάθε δοκίμιο πάρθηκαν τουλάχιστον 7 μετρήσεις. Το προφιλόμετρο μετράει Ra ως 12 μm. Μία τυπική μορφή μέτρησης εμφανίζεται στο σχήμα 6.4.



Σχήμα 6.4: Μέτρηση Τραχύτητας δοκιμίου A3 Al 7075-O πάχους 2mm, ταχύτητα κοπής 1,6m/min, Ισχύς δέσμης 1290W, Αέριο O2 πίεσης 8bar.

Η τραχύτητα μετρήθηκε στην επιφάνεια κοπής παράλληλα ως προς τη φορά του laser και κάθετα ως προς τις ραβδώσεις του υλικού. Οι μετρήσεις τραχύτητας της επιφάνειας κοπής εμφανίζεται στους πίνακες 6.6 και 6.7.

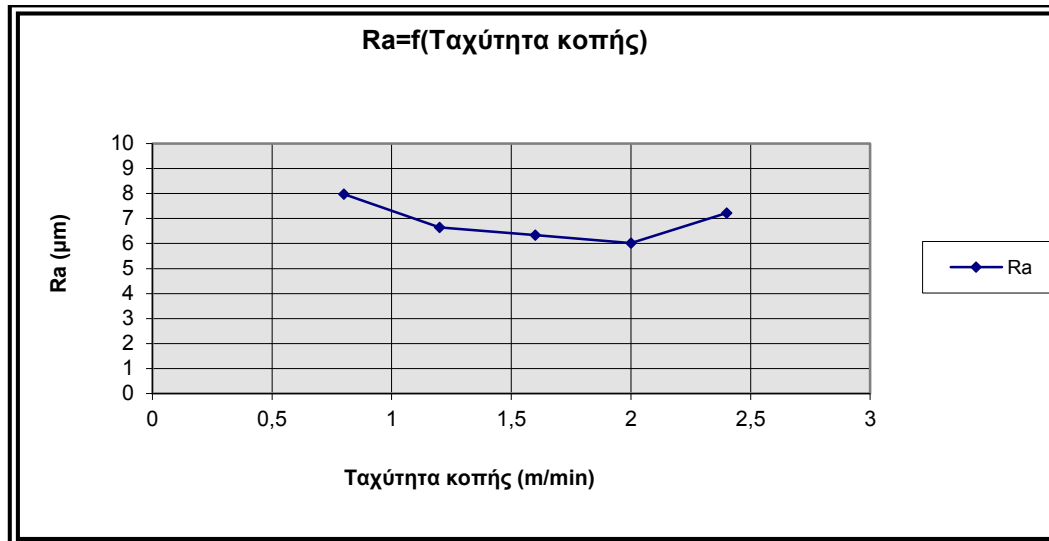
Πίνακας 6.6 : Τραχύτητα δοκιμίων Al 7075-O κομμένων με laser CO₂ στην EBETAM με διαφορετικές ταχύτητες κοπής.

δοκίμια	Ταχύτητα κοπής m/min	Ra (μm)	SRa (μm)
A1	0,8	7,97	0,77
A2	1,2	6,65	0,96
A3	1,6	6,34	1,01
A4	2,0	6,02	1,35
A5	2,4	7,22	2,01

Πίνακας 6.7 : Τραχύτητα δοκιμίων Al 7075-O κομμένων με laser CO₂ στην EBETAM με διαφορετικές πιέσεις προστατευτικού αερίου και ισχύες δέσμης εξόδου.

δοκίμια	Ra (μm)	SRa (μm)
B7	7,49	1,46
B8	6,34	1,01
B9	6,92	1,46
Γ1Α	6,23	1,51
Γ1Β	6,46	1,85
Γ1Γ	6,74	2,34
Γ1Δ	9,59	1,08

Ακολουθούν διαγράμματα τραχύτητας συναρτήσει της ταχύτητας κοπής, πίεσης προστατευτικού αερίου και ισχύος εξόδου

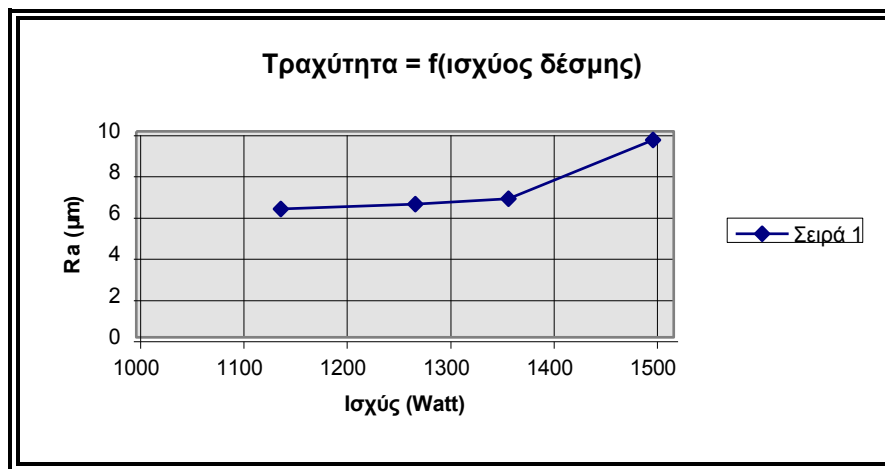


Διάγραμμα 6.1 : Τραχύτητα της επιφάνειας κοπής συναρτήσει της ταχύτητας κοπής.

Η τραχύτητα της επιφάνειας εξαρτάται από τις ραβδώσεις που δημιουργούνται. Στη μικρή ταχύτητα κοπής οι ραβδώσεις είναι λίγες σε αριθμό και με μεγάλο πλάτος.

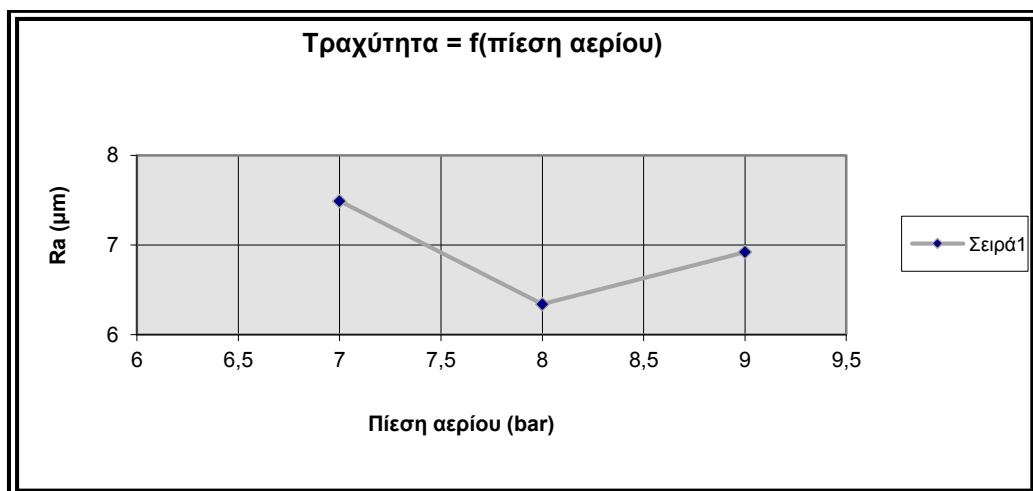
Όσο μεγαλώνει η ταχύτητα κοπής γίνονται περισσότερες με μικρότερο πλάτος, με σχετική μείωση της τραχύτητα της επιφάνειας. Στη μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής το υλικό δεν

κόβεται ικανοποιητικά, η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνεται κι εμφανίζεται μεγαλύτερο γρέζι.



Διάγραμμα 6.2 : Τραχύτητα επιφάνειας κοπής συναρτήσει της ισχύος της δέσμης του laser.

Η ισχύς της δέσμης εξόδου του λέιζερ επηρεάζει την τραχύτητα διότι όσο ο θερμικός κύκλος αυξάνεται οι ραβδώσεις αυξάνουν σε πλάτος. Μεγαλύτερη ισχύς πρέπει να συνδυαστεί με μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής.



Διάγραμμα 6.3 : Τραχύτητα της επιφάνειας κοπής συναρτήσει της πίεσης του βοηθητικού αερίου.

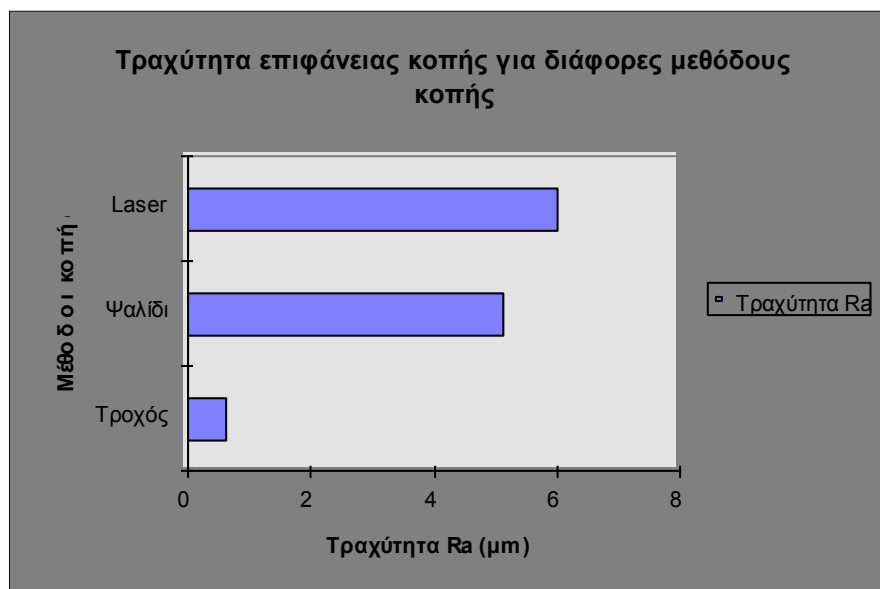
Πρέπει η πίεση του αερίου να είναι μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη τιμή ώστε το προστατευτικό αέριο να απομακρύνει επαρκώς τα προϊόντα κοπής (ατμός και τηγμένο μέταλλο) από το μέτωπο κοπής που συνεπάγεται μικρότερη τραχύτητα.

Επίσης, μετρήθηκε η τραχύτητα σε επιφάνεια κομμένη με συμβατικές μεθόδους τροχό και ψαλίδι.

Στον παρακάτω πίνακα 6.8 εμφανίζονται οι καλύτερες μετρήσεις τραχύτητας δοκιμίων που κόπηκαν με συμβατικές μεθόδους (ψαλίδι, τροχό) και laser CO₂.

Πίνακας 6.8 : Οι καλύτερες μετρήσεις τραχύτητας δοκιμίων Al 7075- O που κόπηκαν με συμβατικές μεθόδους (ψαλίδι, τροχό) και laser CO₂.

Δοκίμια κομμένα με	Τραχύτητα (Ra) (μm)	SRa (μm)	Παρατηρήσεις
Ψαλίδι	5,13	0,19	Χωρίς γρέζι
Τροχό	0,67	0,54	Χωρίς γρέζι
Laser	6,02	1,35	Με γρέζι



Διάγραμμα 6.4 : Οι καλύτερες μετρήσεις τραχύτητας δοκιμίων Al 7075- O που κόπηκαν με συμβατικές μεθόδους (ψαλίδι, τροχό) και laser CO₂.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η κατεργασμένη με λέιζερ επιφάνεια κοπής AL7075 – O δεν παρουσιάζει ποιότητα τελικής κοπής. Δεν είναι καλύτερη από αυτή των συμβατικών μεθόδων. Είναι συγκρίσιμη με το ψαλίδι και υποδεέστερη από τον κοπτικό τροχό.

Πίνακας 6.9 : Αποτελέσματα τραχύτητας δοκιμίων Al 7075 από EBETAM.

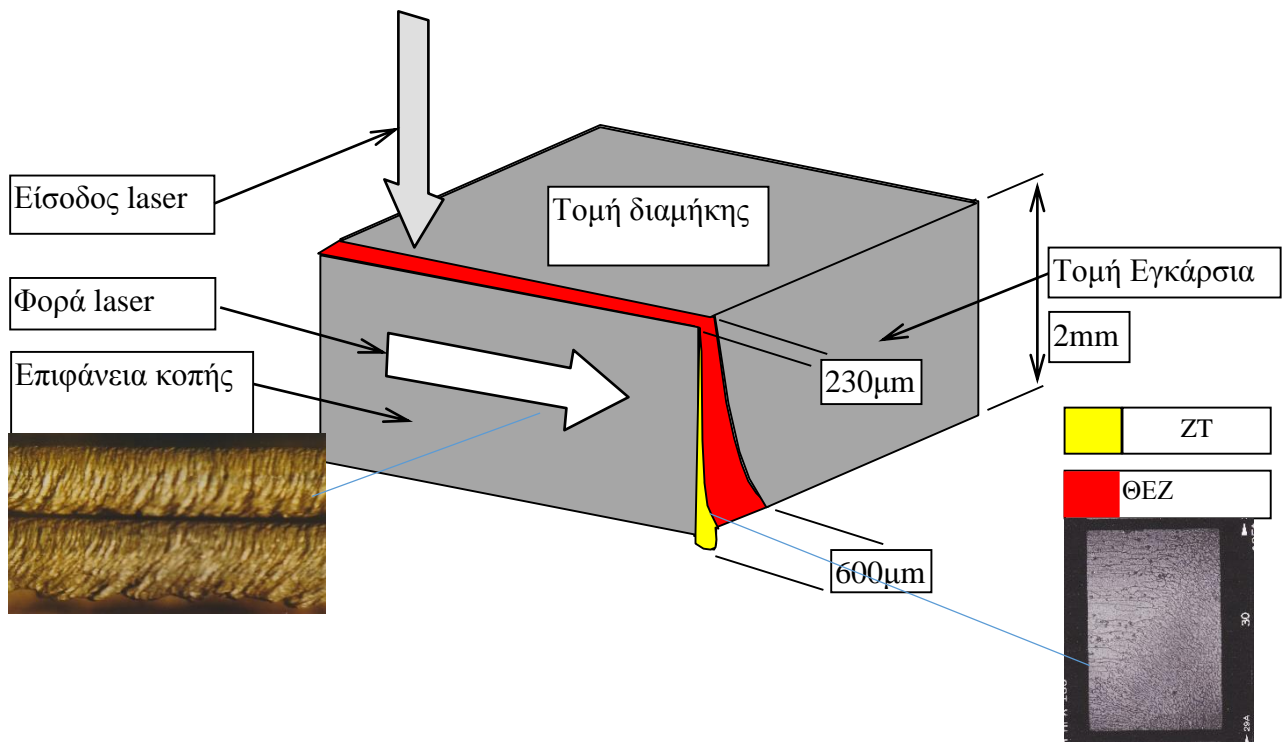
Δοκίμια EBETAM	Τραχύτητα Ra Μέση τιμή (μm)	Τυπική απόκλιση δRa (μm)
A11	9,31	1,41
A12	7,94	1,89
A21	8,62	1,31
A22	8,20	2,05
A31	9,20	0,99
A32	7,40	1,45
A41	8,21	1,02
A42	7,08	1,26
B81	9,20	0,99
B82	7,40	1,45
B91	8,06	1,08
B92	7,67	1,38
Γ1β1	7,43	1,56
Γ1β2	5,54	1,51
Γ1γ1	10,37	1,41
Γ1γ2	10,27	0,70
Γ1δ1	9,11	1,48
Γ1δ2	9,30	0,90

Πίνακας 6.10 : Αποτελέσματα τραχύτητας δοκιμίων Al 7075 και Alclad από LIC.

Δοκίμια LIC	Τραχύτητα Ra Μέση τιμή(μm)	Τυπική απόκλιση δRa (μm)
1	8,67	1,23
2	8,35	1,87
3	ΔΕΝ ΚΟΠΗΚΕ	
4	6,39	0,90
5	5,68	1,45
6	Ra>12	
C1	6,97	0,88
C2	7,33	1,59
C3	Απαράδεκτο Ra>12	
C4	Απαράδεκτο Ra>12	

6.4 Μικροσκοπικός Έλεγχος – Εξέταση και μέτρηση θερμικά επηρεασμένης ζώνης

Για την εξέταση και μέτρηση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης έγιναν δυο τομές κάθετες ως προς την επιφάνεια κοπής με λέιζερ: Εγκάρσια, και διαμήκης στην περιοχή εισόδου του λέιζερ, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5: Απεικόνιση των καθέτων τομών (διαμήκους και εγκαρσίας), ως προς την επιφάνεια κοπής, που πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφική εξέταση. Σημειώνεται η μορφή της ζώνης τήξης (ΖΤ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (ΘΕΖ) αντίστοιχα.

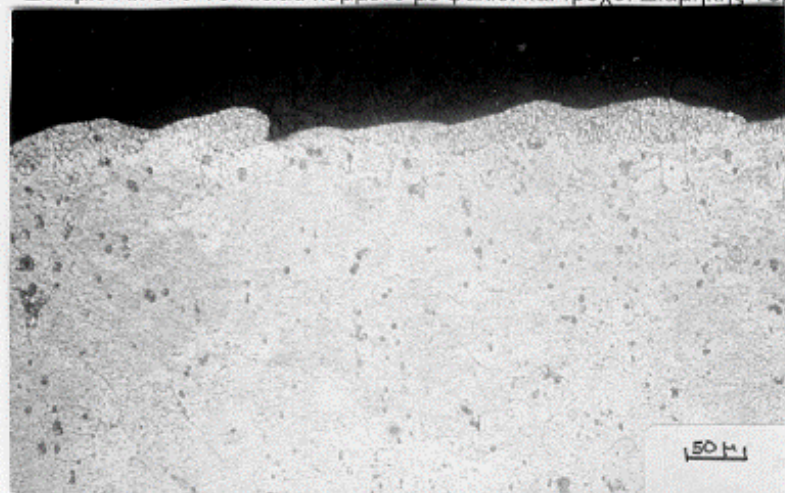
Παράλληλα έγιναν και τομές σε δοκίμια Al 7075 - O που κόπηκαν με συμβατικές μεθόδους, για να υπάρχουν συγκριτικά δοκίμια αναφοράς.

Η παρατήρηση έγινε σε μεταλλογραφικό (οπτικό) μικροσκόπιο Zeiss, ύστερα από λείανση (λειαντικά χαρτιά 150-1200 grit), στίλβωση (Al_2O_3 5µm και διαμαντόπαστα 1 µm) (ή λειαντικά χαρτιά 240-320-400-600-800-1000), διαμαντόπαστα 3 µm, Gamma Alumina 0,05 µm) και κατόπιν προσβολή (10 δευτερόλεπτων) με αντιδραστήριο Keller (2ml HF, 3ml HCl, 5ml HNO_3 , 190 ml H_2O) και ξέπλυμα σε νερό για 20 δευτερόλεπτα.

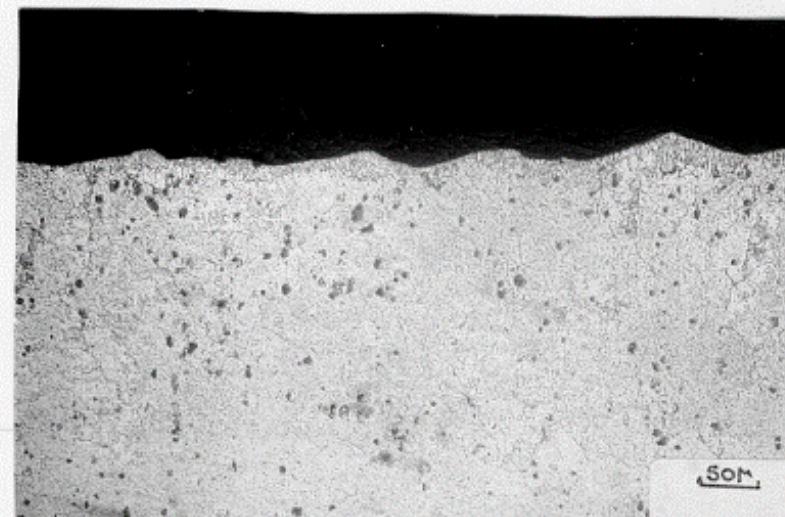
Εμφανίζονται οι παρακάτω μορφές:



ΦΩΤΟ 1: Δοκίμιο Al7075-T0 Alclad κομμένο με ψαλίδι και τροχό. Διαμήκης Τομή.

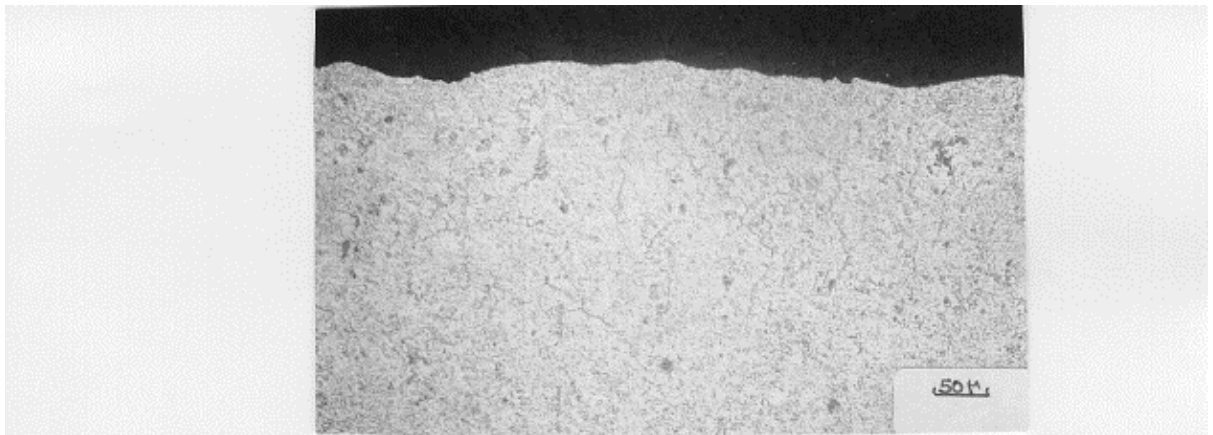


ΦΩΤΟ 2: Δοκίμιο Al7075-T0 (A1) κομμένο με laser CO₂ στην EBETAM. Διαμήκης Τομή.
Συνθήκες κοπής: P= 1290W, v=0.8 m/min, βοηθητικό αέριο O₂ 8 bar.

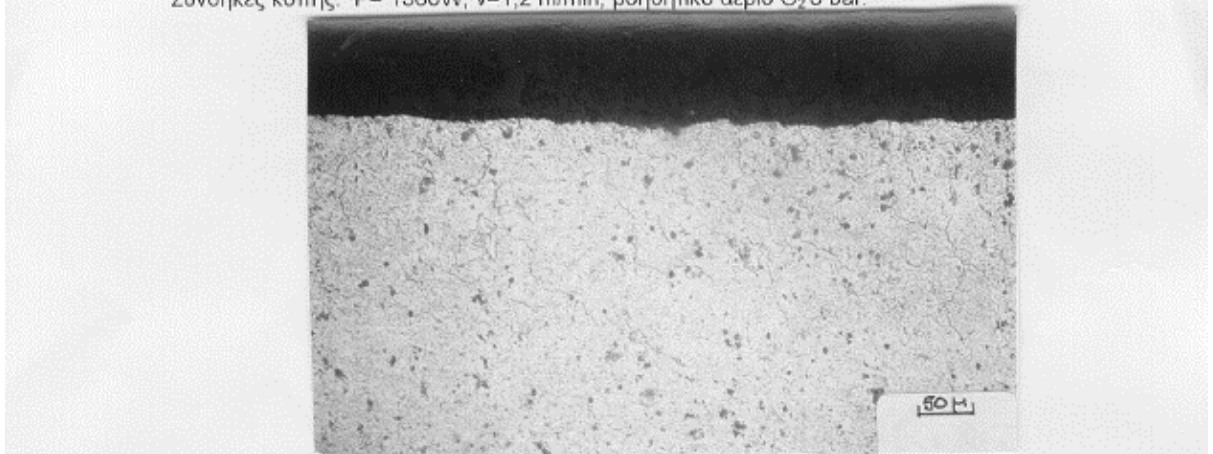


ΦΩΤΟ 3: Δοκίμιο Al7075-T0 (A3) κομμένο με laser CO₂ στην EBETAM. Διαμήκης Τομή.
Συνθήκες κοπής: P= 1290W, v=0.1.6 m/min, βοηθητικό αέριο O₂ 8 bar.

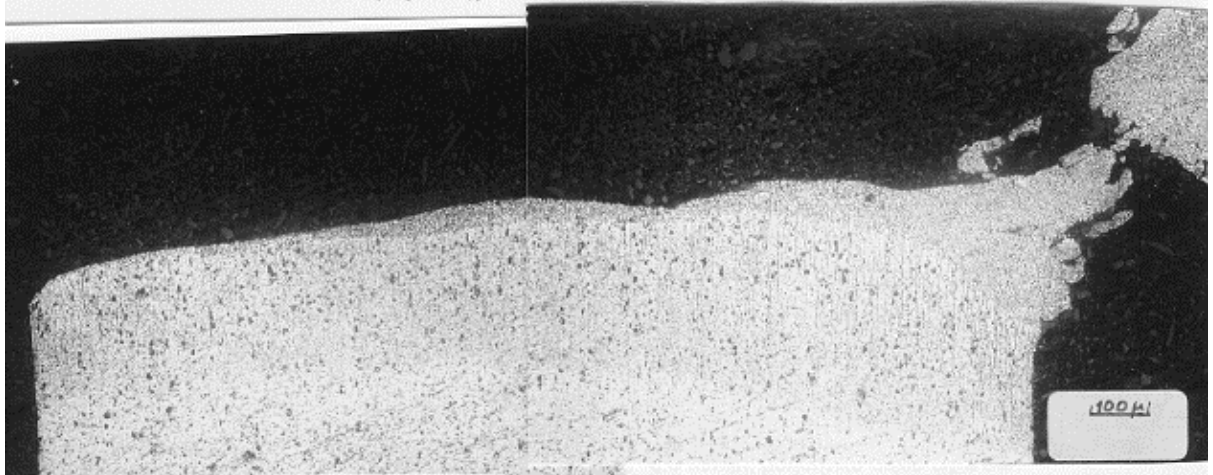
Επίσης :



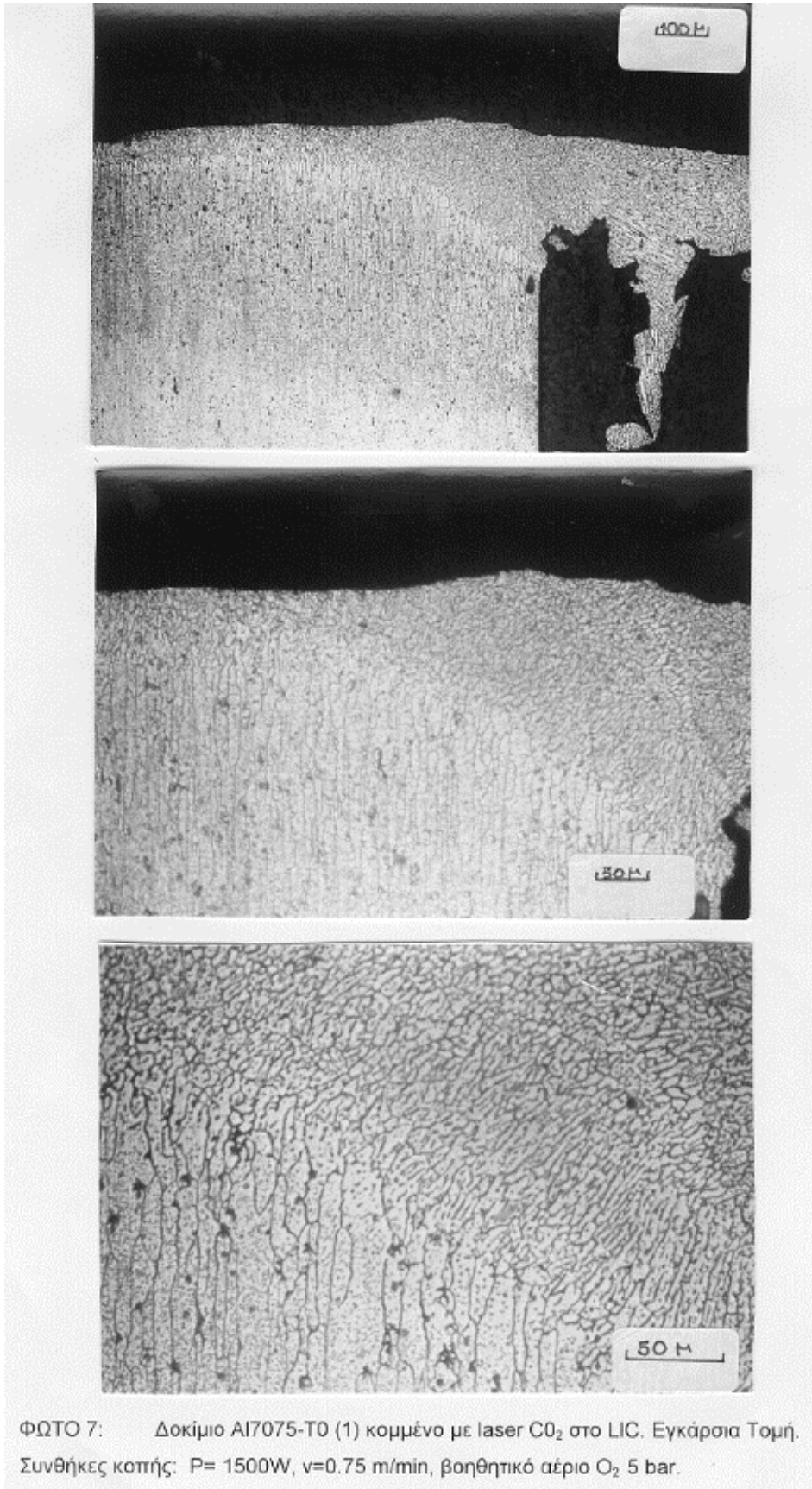
ΦΩΤΟ 4: Δοκίμιο Al7075-T0 (Γ1γ) κομμένο με laser CO₂ στην EBETAM. Διαμήκης Τομή.
Συνθήκες κοπής: P= 1360W, v=1,2 m/min, βοηθητικό αέριο O₂ 8 bar.



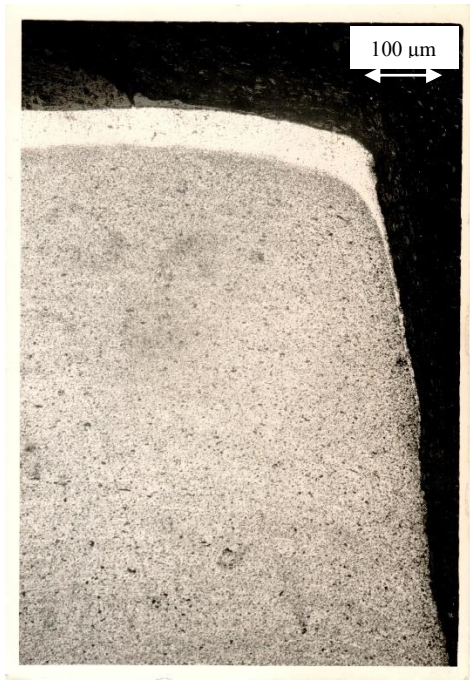
ΦΩΤΟ 5: Δοκίμιο Al7075-T0 (Γ1δ) κομμένο με laser CO₂ στην EBETAM. Διαμήκης Τομή.
Συνθήκες κοπής: P= 1500W, v=0.1,2 m/min, βοηθητικό αέριο O₂ 8 bar.



ΦΩΤΟ 6: Δοκίμιο Al7075-T0 (A1) κομμένο με laser CO₂ στην EBETAM. Εγκάρσια Τομή.
Συνθήκες κοπής: P= 1290W, v=0.8 m/min, βοηθητικό αέριο O₂ 8 bar
.Διακρίνονται η ζώνη τήξης και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη.



ΦΩΤΟ 7: Δοκίμιο Al7075-T0 (1) κομμένο με laser CO₂ στο LIC. Εγκάρσια Τομή. Συνθήκες κοπής: P= 1500W, v=0.75 m/min, βοηθητικό αέριο O₂ 5 bar.



Φωτό 8, Κοπή με ψαλίδι, 7075 Alclad.

Στα δοκίμια που κόπηκαν με συμβατικές μεθόδους (φωτογραφίες) παρατηρούμε μια ανοιχτόχρωμη μήτρα αλουμινίου με διάσπαρτα κατακρημνίσματα, όπως $MgZn_2$. Επισημαίνουμε ότι στην ανοπτημένη κατάσταση O δεν εμφανίζονται οι κόκκοι του υλικού.

Αντιθέτως στα δοκίμια Al 7075 O που κόπηκαν με λέιζερ και έγινε η ίδια διεργασία λείανσης, στίλβωσης και προσβολής, εμφανίζεται πάλι η ανοιχτόχρωμη μήτρα με τα κατακρημνίσματα, αλλά κοντά στην επιφάνεια κοπής διακρίνονται καθαρά η ζώνη τήξης και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη, όπως φαίνεται στις παραπάνω φωτογραφίες

Οι παραπάνω ζώνες ξεχωρίζουν οπτικά από το υπόλοιπο υλικό, γιατί είναι σκοτεινότερες, αλλά και γιατί στις ζώνες αυτές εμφανίζονται οι κόκκοι του υλικού.

Η εμφάνιση των κόκκων εξηγείται ως εξής :

Το υλικό που κόπηκε ήταν Al 7075-O (ανοπτημένο). Τα διάφορα κατακρημνίσματα (π.χ $MgZn_2$) έχουν ευρεία διασπορά μέσα στη μήτρα. Κατά την κοπή με λέιζερ η θερμότητα που διαχέεται στο υλικό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας των γειτονικών περιοχών. Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη η θερμοκρασία είναι τέτοια που δημιουργείται στερεό διάλυμα, το οποίο λόγω της ταχείας στερεοποίησης εισέρχεται υπέρκορο στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος (βαφή). Κατόπιν το πλεόνασμα σε Mg, Zn, Cu αποβάλλεται.

Έχουμε εκ νέου κατακρήμνιση στα όρια και στο εσωτερικό των κόκκων, με επακόλουθο την εμφάνιση των κόκκων του υλικού και την τοπική αύξηση της σκληρότητάς του.

Οι κόκκοι εμφανίζονται αποκλειστικά εξαιτίας της κοπής με λέιζερ, γιατί στην περίπτωση δοκιμίου κομμένου με λέιζερ που υποβλήθηκε σε ολική ανόπτηση (θέρμανση στους 415 °C για 3 ώρες, ψύξη ως τους 200 °C και επαναθέρμανση στους 230 °C για 4 ώρες) και κατόπιν προετοιμάστηκε με τις ίδιες συνθήκες όπως και τα προηγούμενα δοκίμια, δεν εμφανίστηκαν κόκκοι, παρά μόνο η ανοιχτόχρωμη μήτρα με τα διάσπαρτα κατακρημνίσματα.

Ως προς τη ζώνη τήξης και τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη παρατηρούμε τα εξής :

Στη διαμήκη τομή η ζώνη τήξης (ZT) είναι πάρα πολύ μικρή, της τάξης μερικών μm και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘEZ) είναι ευθύγραμμη της τάξης των 200 μm (φωτογραφία 2, 3, 4, 5). Στην εγκάρσια τομή η ZT και η ΘEZ αυξάνονται σταδιακά από το σημείο εισόδου του λέιζερ (φωτογραφία 6,7) προς την έξοδο αυτού από το δοκίμιο όπου παρατηρείται και μακροσκοπικά το γρέζι.

Η μέτρηση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης έγινε προσεγγιστικά από τη βαθμονομημένη κλίμακα στον προσοφθάλμιο φακό του μικροσκοπίου. Κατά τη μέτρηση της ΘEZ συμπεριλήφθη σε αυτήν και η ZT.

Επειδή η ΘEZ κατά την εγκάρσια τομή δεν είναι ευθύγραμμη, μετρήθηκε σε 2 σημεία: Στο σημείου εισόδου του λέιζερ και στο σημείο εξόδου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα 6.11 για τα δοκίμια της EBETAM και στον πίνακα 6.12 για τα δοκίμια που κόπηκαν στο LIC.

Παράλληλα οι ίδιες μετρήσεις έγιναν μέσω ειδικής διάταξης image analysis με ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου η εικόνα του μικροσκοπίου εμφανίζεται σε ειδική οθόνη και τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα 6.13.

Πίνακας 6.11: Έκταση ΘΕΖ των δοκιμών που κόπηκαν στην EBETAM μετρημένη στο οπτικό μικροσκόπιο.

Δοκίμια	Εγκάρσια τομή		Εγκάρσια Τομή		Διαμήκης τομή
	Μεγέθυνση X 50		Μεγέθυνση X 100		Μεγέθυνση X 50
EBETAM	Μήκος ΖΤ + ΘΕΖ (μm)		Μήκος ΖΤ + ΘΕΖ (μm)		Μήκος ΖΤ + ΘΕΖ (μm)
	Είσοδος	Έξοδος	Είσοδος	Έξοδος	Είσοδος
A1	250	531	234	500	219
A2	281	563	234	625	219
A3	188	469	234	547	219
B9	188	625	234	656	219
Γ1β	156	531	188	547	156
Γ1γ	281	625	313	563	188
Γ1δ	188	500	250	500	188

Πίνακας 6.12: Έκταση ΘΕΖ των δοκιμών που κόπηκαν στο LIC μετρημένη στο οπτικό μικροσκόπιο.

Δοκίμια	Εγκάρσια τομή		Εγκάρσια τομή	
	Μεγέθυνση X 50		Μεγέθυνση X 100	
LIC	Μήκος ΖΤ + ΘΕΖ (μm)		Μήκος ΖΤ + ΘΕΖ (μm)	
	Είσοδος	Έξοδος	Είσοδος	Έξοδος
1	313	500	313	609
2	313	563	297	656
3	ΔΕΝ ΚΟΠΗΚΕ		ΔΕΝ ΚΟΠΗΚΕ	
4	313	563	313	578
5	375	688	406	781
6	344	563	344	547
C1	219	438	313	563
C2	219	469	266	547
C3	344	469	391	734
C4	313	469	313	547

Πίνακας 6.13 : Έκταση ΘΕΖ μετρημένη με image analysis.

Δοκίμια	Εγκάρσια Τομή	
	Μεγέθυνση X 50	
EBETAM	Μήκος ZT + ΘΕΖ (μm)	
	Είσοδος	Εξοδος
A1	285	578
A2	278	581
A3	266	561
B9	273	569
Γ1β	261	569
Γ1γ	278	593
Γ1δ	266	600

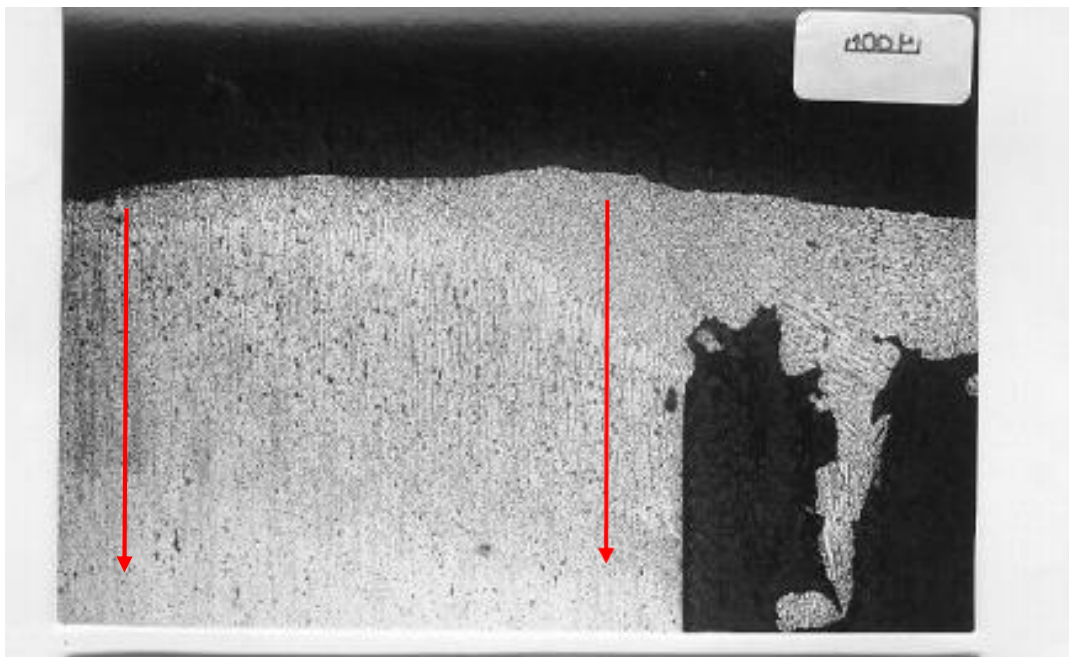
Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω μετρήσεις δεν δίνουν ακριβή, αλλά ενδεικτική εικόνα της έκτασης της ΘΕΖ. Η ακριβέστερη μέτρηση της ΘΕΖ προκύπτει από τη μέτρηση της μικροσκληρότητας σε επιφάνεια κάθετη προς την επιφάνεια κοπής ανά τακτά διαστήματα όπως περιγράφεται παρακάτω.

6.5 Μέτρηση σκληρότητας

Η μακροσκληρότητα του υλικού μετρήθηκε και παραμένει η ίδια ανεξάρτητα από τους τρόπους κοπής. Είναι ίση με 58 και 50 Vickers για το Al 7075 (bare και Alclad) αντίστοιχα. Η σκληρότητα αυτή αντιστοιχεί στην κατάσταση O (ολική ανόπτηση) που είχε το υλικό πριν την κοπή.

6.6 Αποτελέσματα μετρήσεων μικροσκληρότητας

Για τον έλεγχο της ΘΕΖ πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροσκληρότητας σε μικροσκληρόμετρο Reichert και στις δυο τομές κάθετα προς την επιφάνεια κοπής, ξεκινώντας από αυτήν και τελειώνοντας στο ανεπηρέαστο υλικό (προφίλ σκληρότητας κατά μήκος του υλικού, κατά την ανάλογη διεύθυνση, για να καθοριστεί το μήκος και βάθος και το εύρος της ΘΕΖ). Το υλικό για το σκοπό αυτό θεωρείται ομογενές.



Φωτό 7 : Μετρήσεις μικροσκληρότητας κοντά στα σημεία εισόδου και εξόδου του λέιζερ. Τομή Εγκάρσια.

Για τη μέτρηση της μικροσκληρότητας ακολουθήθηκε η ίδια λογική, όπως και για τη μέτρηση της ΘΕΖ σε σχέση με το σημείο εισόδου και εξόδου του λέιζερ. Το φορτίο κατά τη μέτρηση ήταν 23,8 g. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες 6.14.

Πίνακας 6.14: Μικροσκληρότητα συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια κοπής στα σημεία εισόδου και εξόδου του λέιζερ για όλα τα δοκίμια.

A1 0.8 m/min 1290 Watt	
Είσοδος του laser	
Απόσταση (μm)	Μικροσκληρότητα HV (23,8 g)
24	100,1
80	103,2
132	95,8
188	95,8
246	85,6
305	78,0
360	70,4
424	68,7
498	67,0
565	58,9
636	60,3
703	61,0
750	60,3
845	57,6
906	58,9

A1 0.8 m/min 1290 Watt	
Έξοδος του laser	
Απόσταση (μm)	Μικροσκληρότητα HV (23,8 g)
21	95,8
73	95,8
141	90,5
207	100,1
258	95,8
323	103,2
390	101,6
454	108,0
523	97,2
576	97,2
634	84,4
694	76,0
765	68,7
847	63,9
912	65,4
978	59,6
1044	59,6
1129	61,0
1206	59,6

A2 1.2 m/min 1290 Watt	
Είσοδος του laser	
Απόσταση (μm)	Μικροσκληρότητα HV (23,8 g)
26	109,7
78	109,7
140	108,0
196	98,7
256	81,1
308	76,0
373	71,3
457	67,0
517	67,0
593	60,3
660	61,0
733	60,3
838	59,6
920	59,6

A2 1.2 m/min 1290 Watt	
Έξοδος του laser	
Απόσταση (μm)	Μικροσκληρότητα HV (23,8 g)
16	108,0
68	104,7
121	103,2
178	106,3
231	106,3
285	108,0
344	109,7
379	111,4
430	108,0
493	104,7
551	104,7
625	93,1
702	76,0
788	67,0
879	65,4
950	62,4
1040	59,6
1104	59,6
1168	60,3
1420	60,3

A3 1.6 m/min 1290 Watt	
Είσοδος laser	
Απόσταση (μm)	Μικροσκληρότητα HV (23,8 g)
28	103,2
79	100,1
132	90,5
191	81,1
215	71,3
270	65,4
350	64,7
423	59,6
495	60,3
569	58,9
658	58,9

A3 1.6 m/min 1290 Watt	
Εξοδος laser	
Απόσταση (μm)	Μικροσκληρότητα HV (23,8 g)
35	100,1
85	100,1
142	97,2
203	93,1
264	97,2
329	100,1
393	95,8
454	95,8
516	86,8
584	80,0
658	68,7
748	61,7
830	60,3
907	58,9
977	59,6

Γ1β 1,2 m/min 1140 Watt	
Είσοδος laser	
Απόσταση (μm)	Μικροσκληρότητα HV (23,8 g)
23	90,5
76	89,2
129	90,5
179	90,5
238	81,1
318	76,0
391	61,7
464	55,1
551	57,0
626	57,0
704	56,3

Γ1β 1,2 m/min 1140 Watt	
Έξοδος laser	
Απόσταση (μm)	Μικροσκληρότητα HV (23,8 g)
36	103,2
104	103,2
130	104,7
217	106,3
270	104,7
325	103,2
376	100,1
442	84,4
498	76,0
565	67,0
629	63,1
704	59,6
785	57,6
872	58,2
964	57,0

Γ1γ 1,2 m/min 1270 Watt	
Είσοδος laser	
Απόσταση (μm)	Μικροσκληρότητα HV (23,8 g)
31	97,2
83	100,1
136	94,4
198	98,7
272	89,2
340	75,0
407	68,7
474	61,7
565	62,4
637	62,4
709	61,0
769	59,6
849	59,6
935	59,6

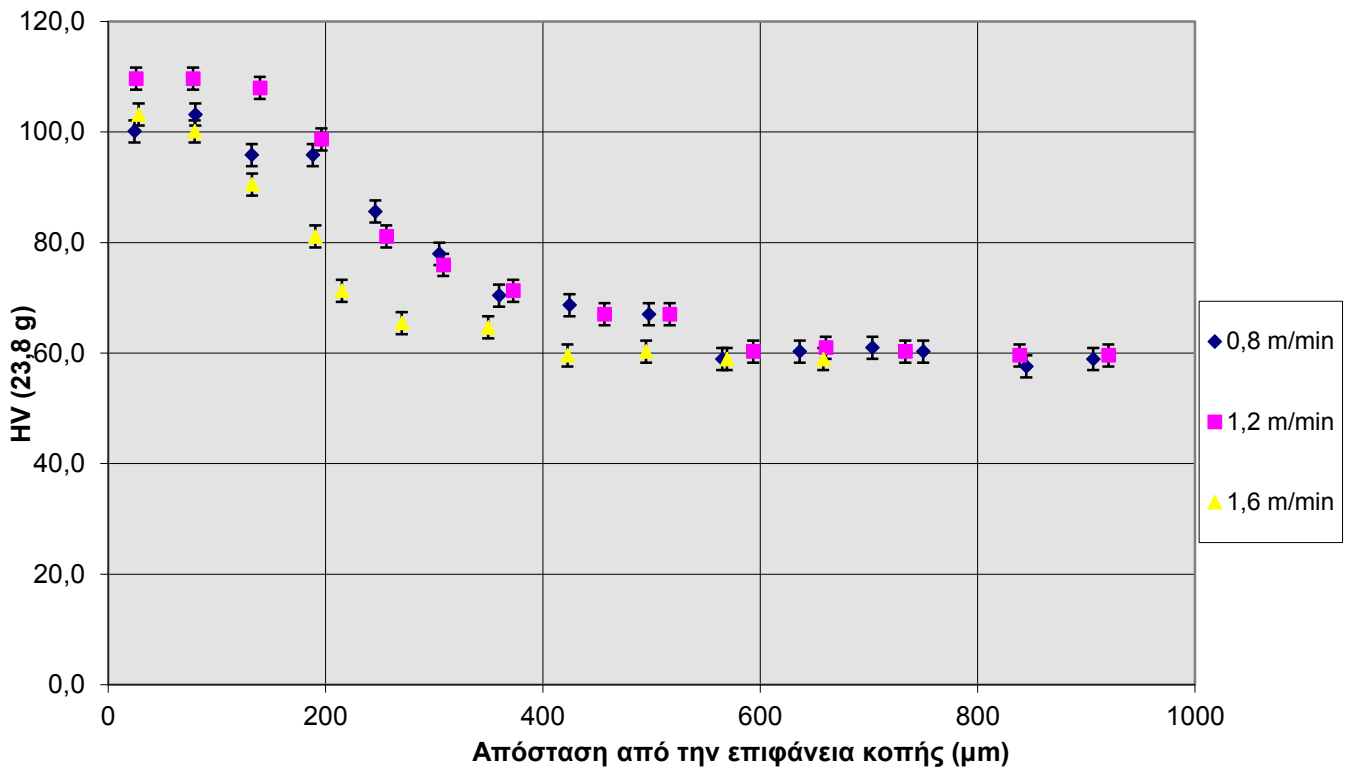
Γ1γ 1,2 m/min 1270 Watt	
Έξοδος laser	
Απόσταση (μm)	Μικροσκληρότητα HV (23,8 g)
27	95,8
89	95,8
150	98,7
209	98,7
282	97,2
352	103,2
410	101,6
492	100,1
556	94,4
623	91,8
698	85,6
790	74,0
867	64,7
934	62,4
1021	58,9
1088	60,3
1164	58,9

Γ1δ 1,2 m/min 1360 Watt	
Είσοδος laser	
Απόσταση (μm)	Μικροσκληρότητα HV (23,8 g)
19	94,4
70	94,4
121	91,8
171	86,8
231	75,0
294	67,8
355	66,2
419	61,7
487	57,6
558	58,2
626	57,6
696	58,2

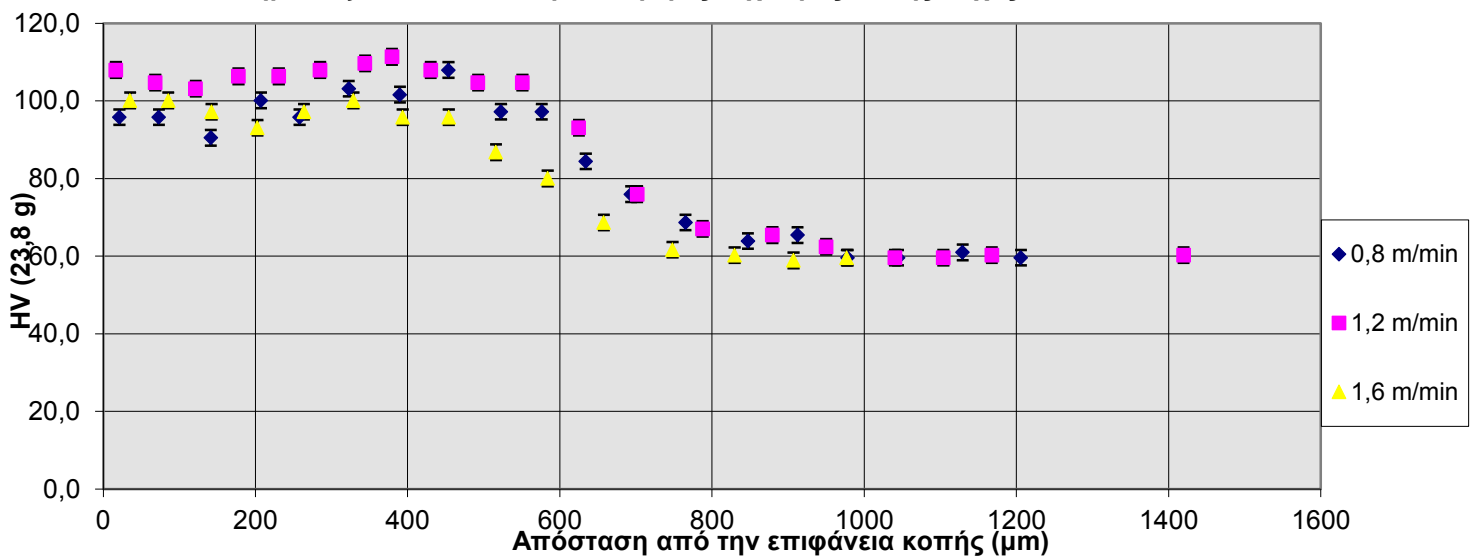
Γ1δ 1,2 m/min 1360 Watt	
Έξοδος laser	
Απόσταση (μm)	Μικροσκληρότητα HV (23,8 g)
31	95,8
83	100,1
135	97,2
189	90,5
245	90,5
305	91,8
360	93,1
415	97,2
471	97,2
537	93,1
597	81,1
658	74,0
724	66,2
786	61,0
844	58,2
911	58,2
977	57,6
1047	57,0

Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα

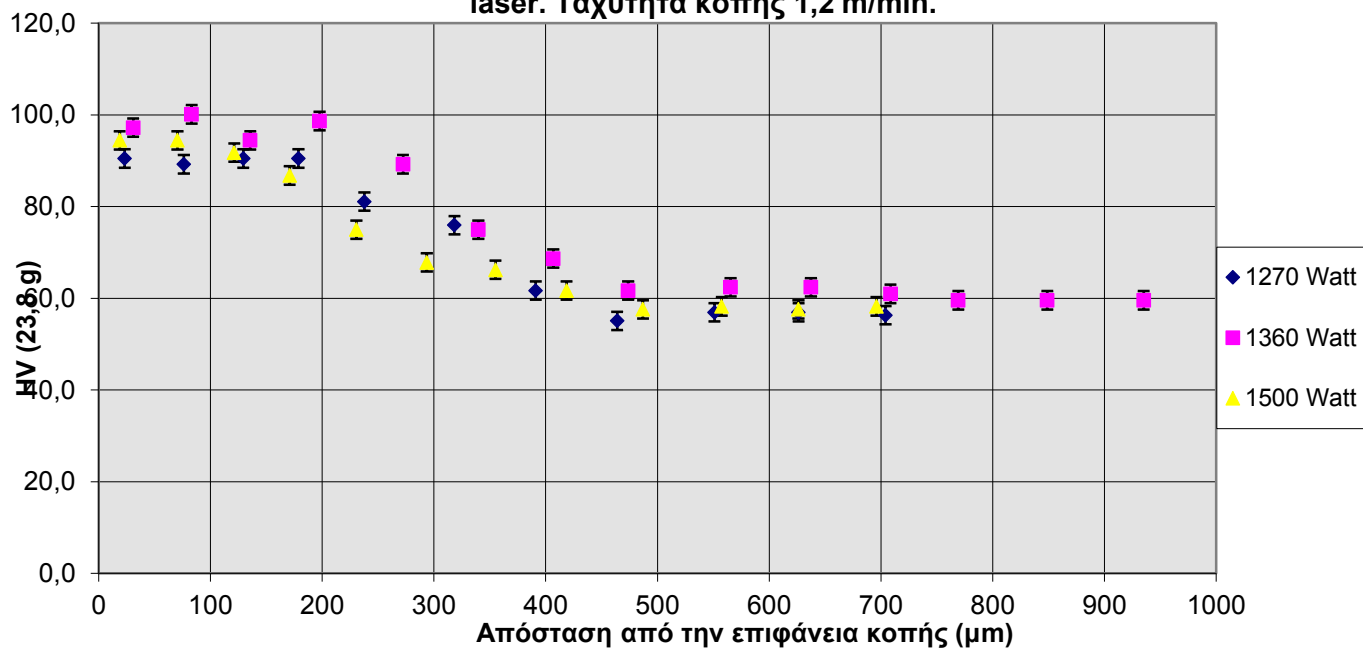
Μικροσκληρότητα Al 7075 - Ο συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια κοπής στο σημείο εισόδου του laser για διάφορες ταχύτητες κοπής. Ισχύς 1290 Watt.



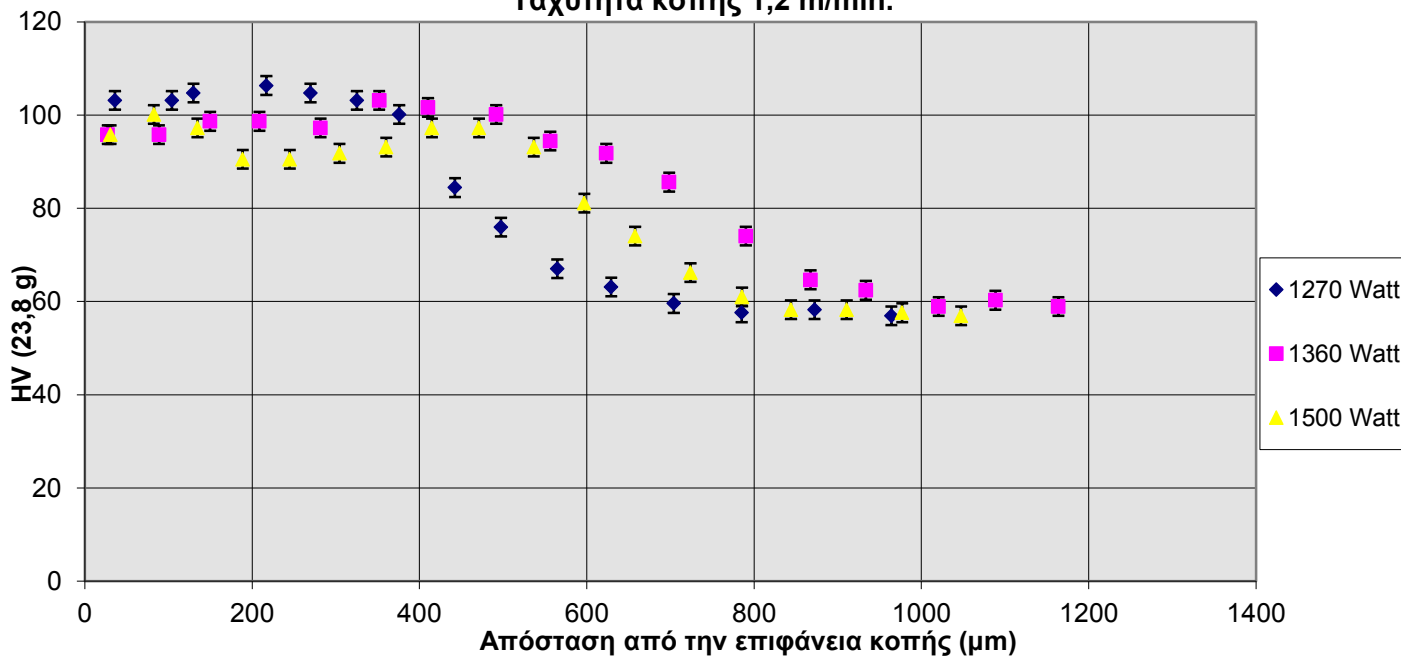
Μικροσκληρότητα Al 7075-Ο συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια κοπής στο σημείο εξόδου του laser για διάφορες ταχύτητες κοπής. Ισχύς 1290 Watt.



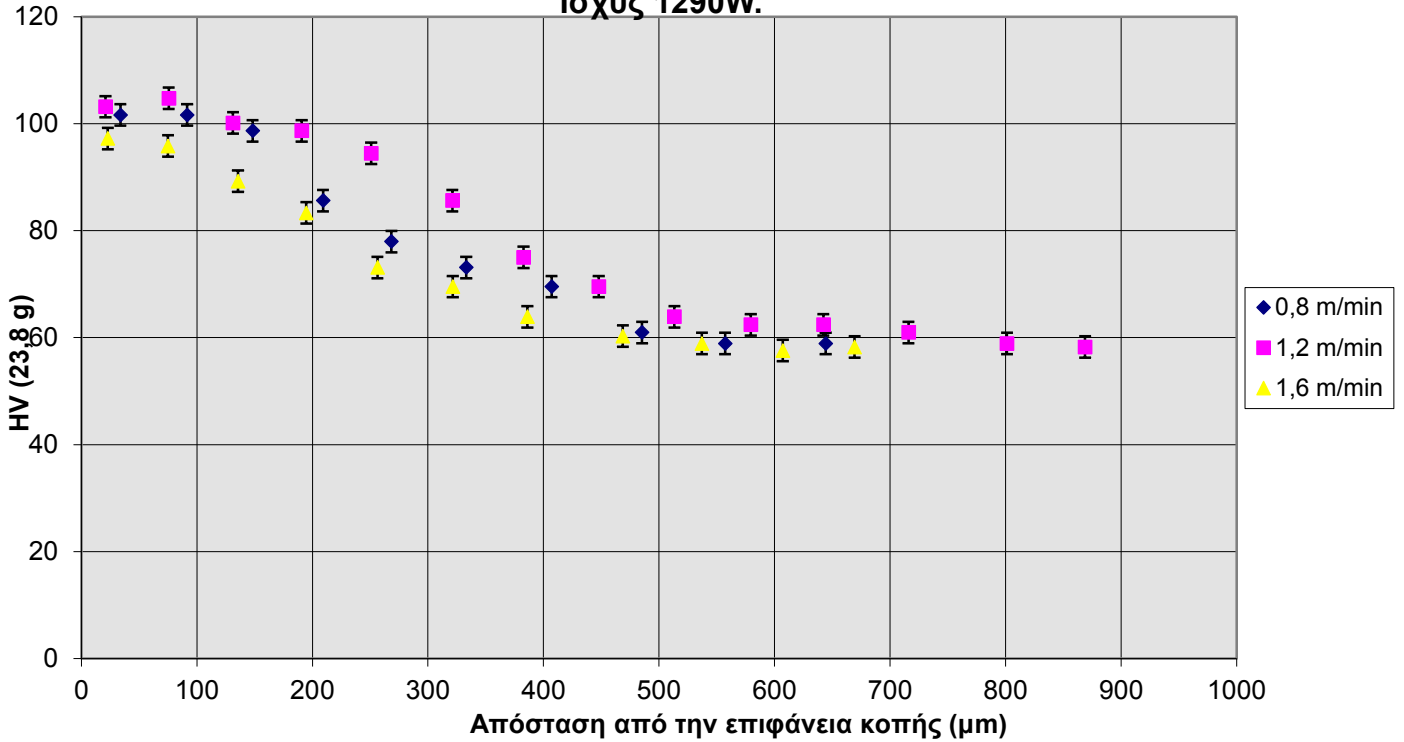
Μικροσκληρότητα Al 7075-O, συναρτήσεως της απόστασης από την επιφάνεια κοπής στο σημείο εισόδου του laser για διαφορετική ισχύ του laser. Ταχύτητα κοπής 1,2 m/min.



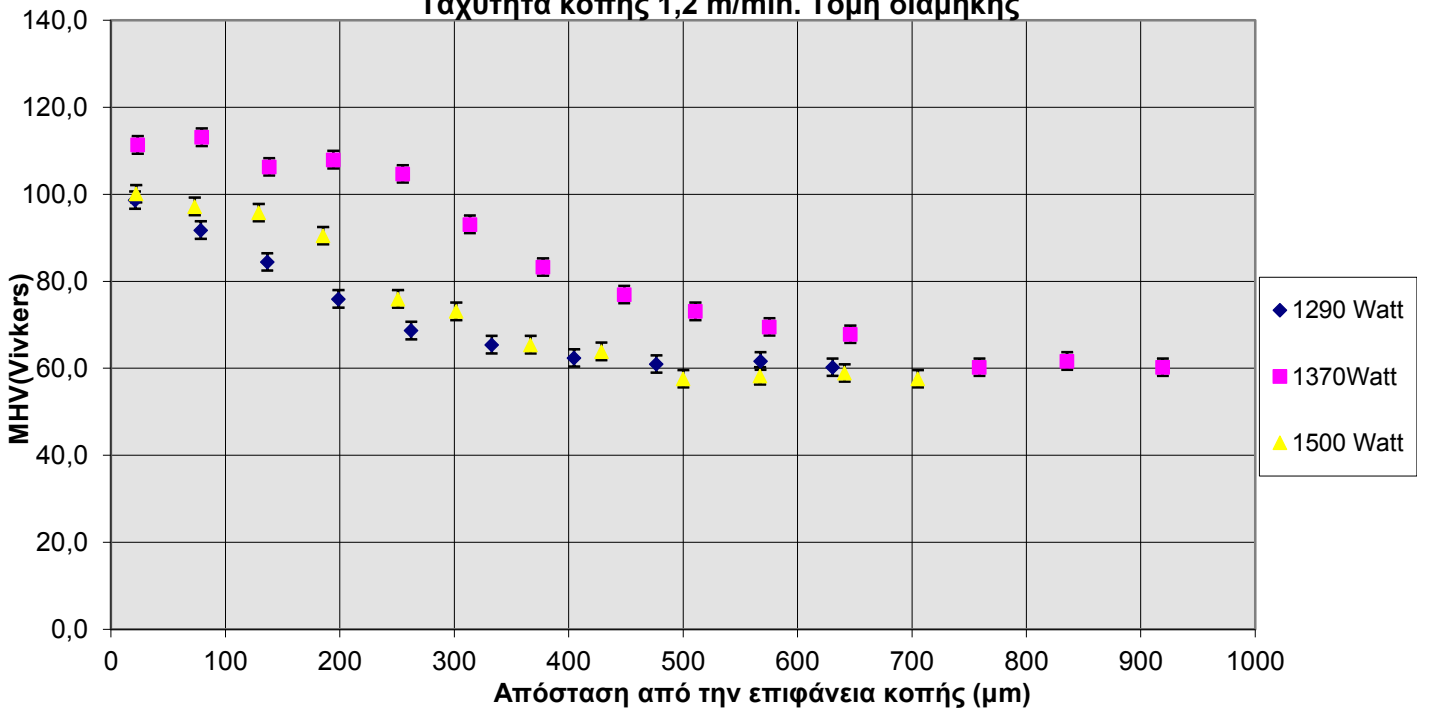
Μικροσκληρότητα Al 7075-O συναρτήσεως της απόστασης από την επιφάνεια κοπής στο σημείο εξόδου του laser για διαφορετική ισχύ του laser. Ταχύτητα κοπής 1,2 m/min.



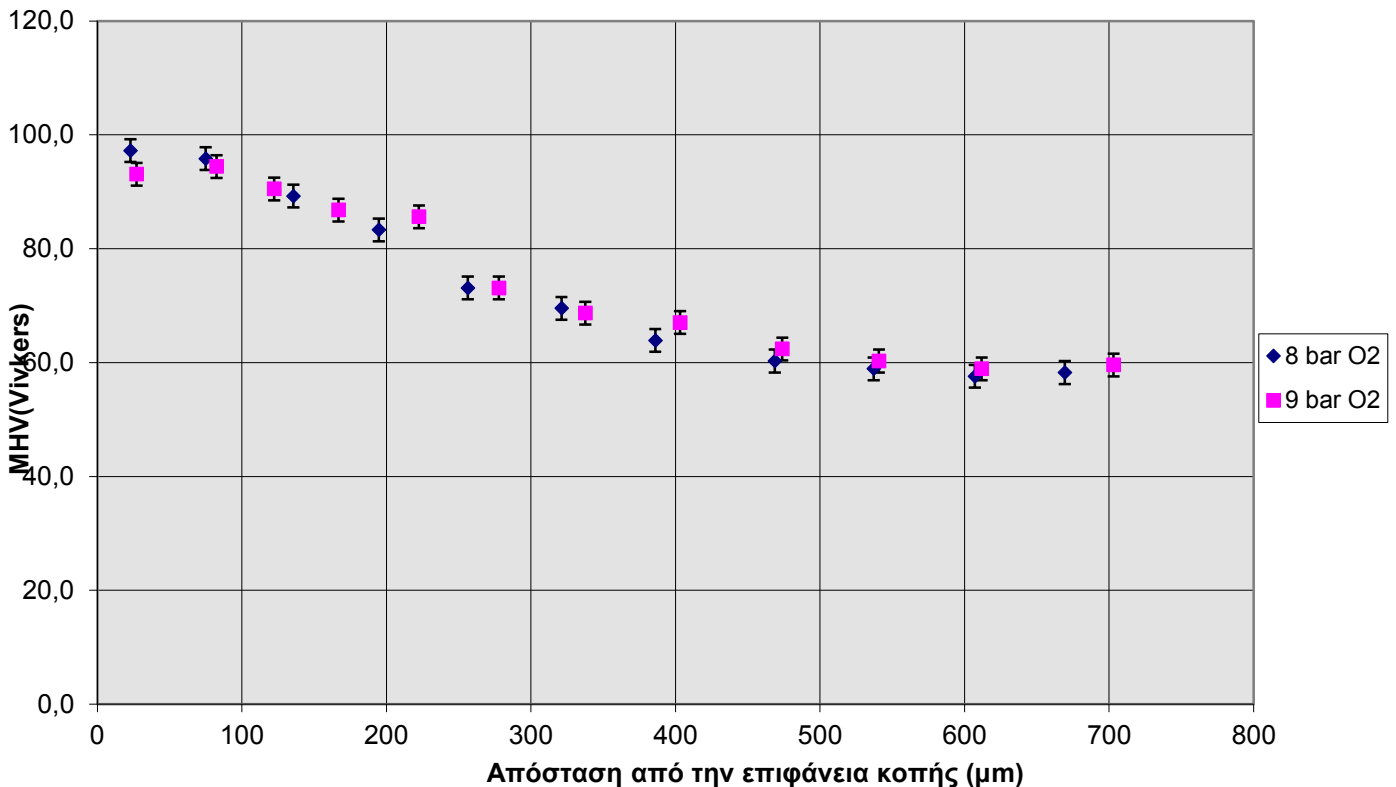
Μικροσκληρότητα Al 7075-O συναρτήσεσι της απόστασης από την επιφάνεια κοπής για διάφορες ταχύτητες κοπής. Τομή διαμήκης. Ισχύς 1290W.



Μικροσκληρότητα Al 7075-O συναρτήσεσι της απόστασης από την επιφάνεια κοπής στο σημείο εισόδου του laser για διαφορετική ισχύ του laser. Ταχύτητα κοπής 1,2 m/min. Τομή διαμήκης



Μικροσκληρότητα Al 7075-O συναρτήσεσι της απόστασης από την επιφάνεια κοπής για διάφορες πιέσεις βοηθητικού αερίου. Τομή διαμήκης.



Παρατηρούμε ότι σε όλα τα δοκίμια η μικροσκληρότητα μεταβάλλεται από περίπου 100 Vickers στην ζώνη τήξης και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη σταδιακά ως 60 Vickers στο ανεπηρέαστο υλικό. Αντίστοιχα στα δοκίμιο κομμένο με ψαλίδι εμφανίζεται 70 Vickers στην είσοδο κι έξοδο του ψαλιδιού και στην κοπή με τροχό 61 Vickers.

Η αύξηση της σκληρότητας οφείλεται στα εξής: : Το υλικό που κόπηκε ήταν Al 7075 - O (ανοπτημένο). Τα διάφορα κατακρημνίσματα (π.χ MgZn₂) έχουν ευρεία διασπορά μέσα στη μήτρα. Κατά την κοπή με laser η θερμότητα που διαχέεται στο υλικό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας των γειτονικών περιοχών. Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη η θερμοκρασία είναι τέτοια που δημιουργείται στερεό διάλυμα, το οποίο λόγω της ταχείας στερεοποίησης εισέρχεται υπέρκορο στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Κατόπιν το πλεόνασμα σε Mg, Zn, Cu αποβάλλεται. Έχουμε εκ νέου κατακρήμνιση στα όρια και στο εσωτερικό των κόκκων με επακόλουθο την αύξηση της σκληρότητας του υλικού.

Έτσι συνοπτικά αναφέρουμε: διαλυτοποίηση, βαφή, γήρανση. Η γήρανση αυτή εκδηλώνεται με την πάροδο του χρόνου, στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κι αναφέρεται στην κατακρήμνιση ενδομεταλλικών ενώσεων στα όρια και στο εσωτερικό των κόκκων του

υλικού, που προκαλούν αύξηση της σκληρότητάς του. Συνήθως ολοκληρώνεται και σταθεροποιείται σε κάποιο σύντομο χρονικό διάστημα. Στα κράματα αλουμινίου η παραπάνω διεργασία αναφέρεται ως φυσική γήρανση T4. Όμως τα κράματα της σειράς 6XXX και πολύ περισσότερο αυτά της σειράς 7XXX διαφέρουν, γιατί γηράσκουν στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος συνεχώς.

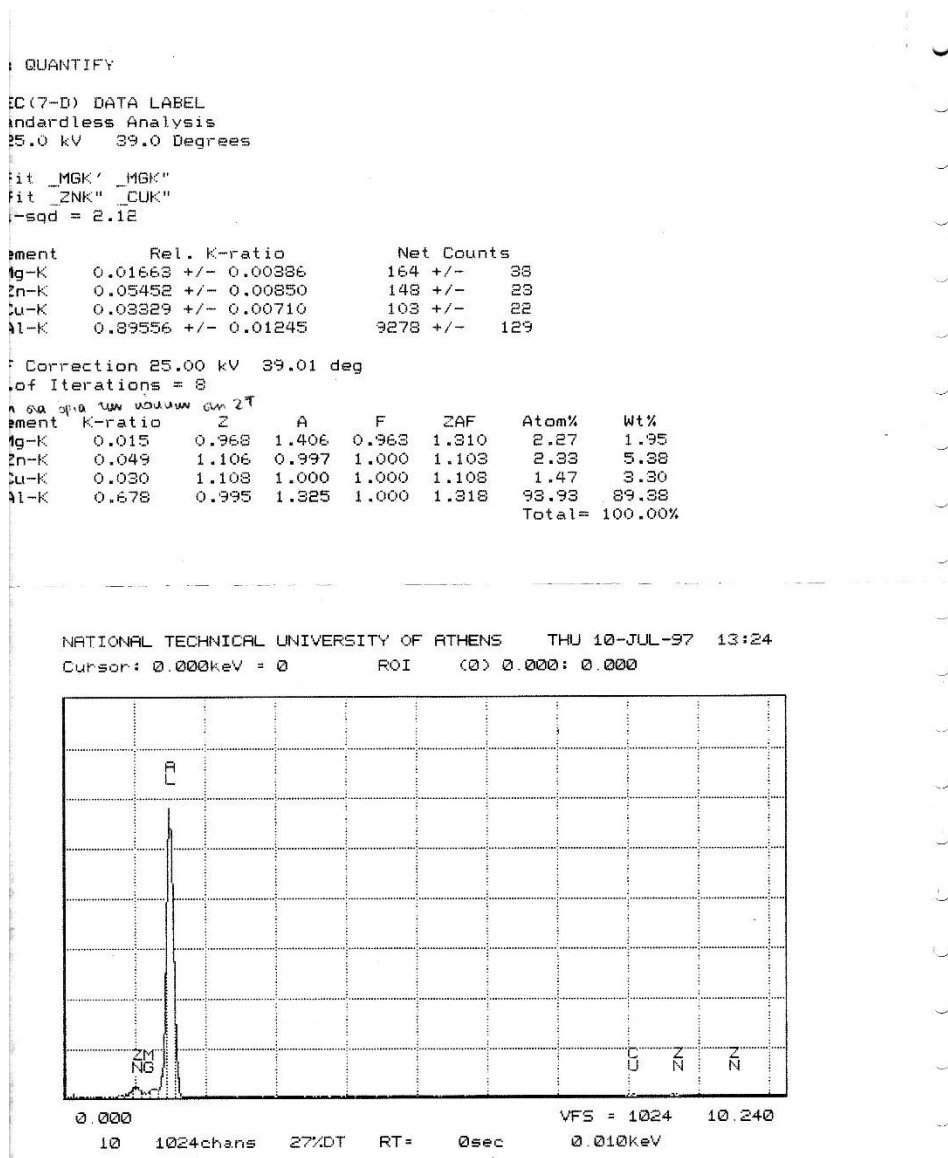
Για παράδειγμα Al 7075 γηράσκει ακόμα μετά από 25 χρόνια και φθάνει το 95 % της αντοχής του T6. Για τα κράματα αυτά ο όρος «φυσική γήρανση» είναι αδόκιμος και η κατάστασή τους συμβολίζεται με το γράμμα W και έναν αριθμό που δηλώνει το χρονικό διάστημα γήρανσης του υλικού. Έτσι με το W εννοούμε διαλυτοποίηση -ομογενοποίηση βαφή (απόψυξη στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος) ασταθές στερεό διάλυμα. Στην περίπτωση της κοπής Al 7075 O με λέιζερ η προκύπτουσα κατάσταση του υλικού, γύρω από την επιφάνεια κοπής μπορεί να χαρακτηριστεί ως W, αφού δεν ακολουθεί άλλη διεργασία. Προφανώς το ανεπηρέαστο υλικό παραμένει στην κατάσταση ανόπτησης O.

Βάσει των αποτελεσμάτων της μικροσκληρότητας και της τραχύτητας εμφανίζεται ότι οι καλύτερες συνθήκες κοπής σε laser CO₂ των δοκιμών Al7075-O και Al7075-Alclad είναι ισχύς 1300 W, ταχύτητα 1,2 m/min και πίεση αερίου 5-8 bar.

6.7 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

Στα δοκίμια που κοπήκανε με λέιζερ, λόγω της μικρής έκτασης και της θέσης της θερμικά επηρεασμένης ζώνης δεν κατέστη δυνατό η εξέταση των δοκιμίων με περίθλαση ακτίνων X για τον εντοπισμό διαφόρων αλλαγών φάσεων του υλικού κατά την κοπή. Έγινε, όμως, εξέταση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) και μικροανάλυση στοιχείων (EDS) για την κατανομή των διαφόρων στοιχείων στις διάφορες ζώνες του υλικού.

Η μικροανάλυση Al 7075- O στη ζώνη τήξης έχει την παρακάτω μορφή.



Η σύσταση είναι Al 89,58 %, Cu 3,3 %, Zn 5,38 % και Mg 1,95 %. Η σύσταση αυτή συγκρίνεται με την αρχική του κράματος και διακρίνονται οι αυξομειώσεις στη συγκέντρωση των στοιχείων στις διάφορες ζώνες του υλικού.

Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη είναι : Al 89,6 %, Cu 2,19 %, Zn 5,86 % και Mg 2,11 %.

Στο ανεπηρέαστο υλικό είναι: Al 90,58 %, Cu 2,10 %, Zn 5,01 % και Mg 1,89 %.

6.8 Δοκιμές διάβρωσης

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια που κόπηκαν με λείζερ και κατόπιν υποβλήθηκαν σε χρωμική ανοδίωση και τοποθετήθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης μέγιστο χρονικό διάστημα 750 ώρες (δοκιμή ASTM-B117). Από την οπτική παρατήρηση που ακολούθησε τη δοκιμή αλατονέφωσης προέκυψε μη ύπαρξη αποχρωματισμών και βελονοειδούς διάβρωσης. Προφανώς και δεν επηρεάζεται η αγωγιμότητα και η κρυσταλλική δομή του Al 7075-O.

6.9 Κοπή συνθέτων υλικών

Παρασκευή του υλικού.

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από μήτρα εποξειδικής ρητίνης ενισχυμένη με ίνες άνθρακα. Στην αρχική του μορφή το υλικό είναι σε μορφή φιλμ prepreg (pre-impregnated) σχήμα 6.6, όπου οι ίνες άνθρακα είναι προεμποτισμένες με την εποξειδική ρητίνη και φυλάσσεται σε θερμοκρασίες $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

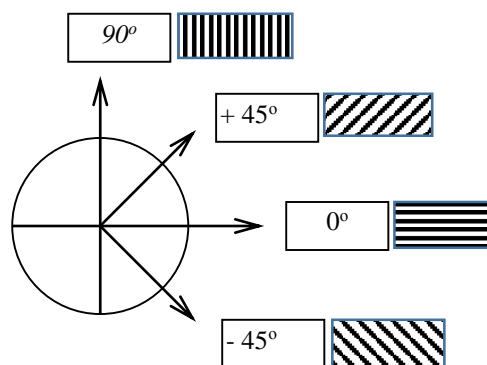


Σχήμα 6.6 : Prepreg tape. Ίνες άνθρακα προεμποτισμένες σε εποξειδική ρητίνη

Ακολουθώς το υλικό κόβεται σε διαστάσεις $35 \times 35\text{ cm}$ και ακολουθεί χειροκίνητη διαστρωμάτωση (manual lay up). Κάθε στρώμα έχει πάχος $0,125\text{mm}$.

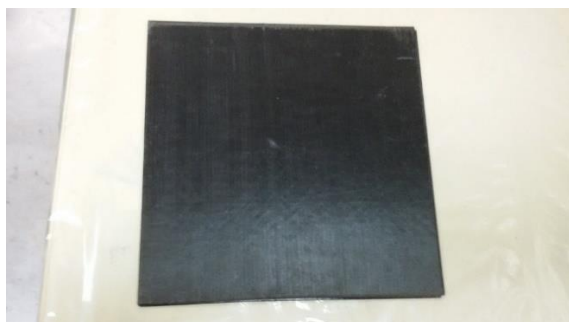
Το στρωματικό σύνθετο υλικό που θα προκύψει αποτελείται από 8 ή 16 στρώματα prepreg ($1\text{ ή }2\text{mm}$ πάχος) με την εξής διάταξη: $[0]_8$, $[0]_{16}$ και $[02 / +45 / 02 / -45 / 0 / 90]_{8s}$.

Οι αριθμοί μέσα στις αγκύλες αναφέρονται στη διεύθυνση (σε μοίρες) των ινών κάθε στρώματος σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα 7. Οι δείκτες εκτός των αγκυλών αναφέρονται στον αριθμό των στρωμάτων που απαρτίζουν το υλικό. Το s δηλώνει ότι η διάταξη είναι συμμετρική κι ακολουθούν άλλα 8 στρώματα με αντίστροφη διάταξη δηλ. $(90 / 0 / -45 / 02 / +45 / 02)$.



Σχήμα 6.7: Διεύθυνση των ινών στο στρώμα (Παραδοχή)

Μετά τη διαστρωμάτωση ακολουθεί θέρμανση υπό πίεση σε αυτόκλειστο (autoclave) της εταιρείας Scholz με vacuum bugging για το τελικό σύνθετο υλικό (Συνθήκες θέρμανση 175 °C, Πίεση 6 atm, Κενό 21% , χρόνος παραμονής 3 ώρες κα 50 λεπτά). Το υλικό που θα προκύψει έχει την παρακάτω μορφή.



Σχήμα 6.8 Πλάκα συνθέτου υλικού εποξειδικής ρητίνης με ίνες άνθρακα.

Οι ιδιότητές του όπως δίνονται από τον κατασκευαστή είναι:

Fibredux 6376 6376C-T400-(HTA-12K) prepreg system Ciba – Geicy [0]₈ με αντοχή σε εφελκυσμό 2090 [0]₈ Μρα, Όριο διαρροής 229 [-45+45] Μρα και μέτρο ελαστικότητας 137 [0]₈ Gra.

Τα σύνθετα υλικά που μελετήθηκαν κόπηκαν στο LIC με laser CO₂ με τις συνθήκες που αναφέρονται στους πίνακες 6.15 και 6.16. Ως βοηθητικό αέριο χρησιμοποιήθηκε πεπιεσμένος αέρας με πίεση 5 bar.

Πίνακας 6.15 : Συνθήκες κοπής δοκιμίων [0]₈ στο LIC.

Σύνθετα υλικά [0] ₈				
Δοκίμιο	Ισχύς laser (Watt)	Ταχύτητα (m/min)	Φορά κοπής (ως προς ίνες)	Σχόλια
1	600	0,90	Κάθετα	
2	600	1,50	Κάθετα	
3	600	2,25	Κάθετα	Δεν κόπηκε ένα στρώμα στη βάση
4	600	3,00	Κάθετα	Δεν κόπηκε
5	1200	4,50	Κάθετα	
6	1200	3,75	Κάθετα	
7	600	0,90	Παράλληλα	
8	600	1,50	Παράλληλα	
9	600	2,25	Παράλληλα	
10	600	3,00	Παράλληλα	
11	600	3,75	Παράλληλα	Οριακή κοπή

Πίνακας 6.16 : Συνθήκες κοπής δοκιμίων [0]₁₆ στο LIC.

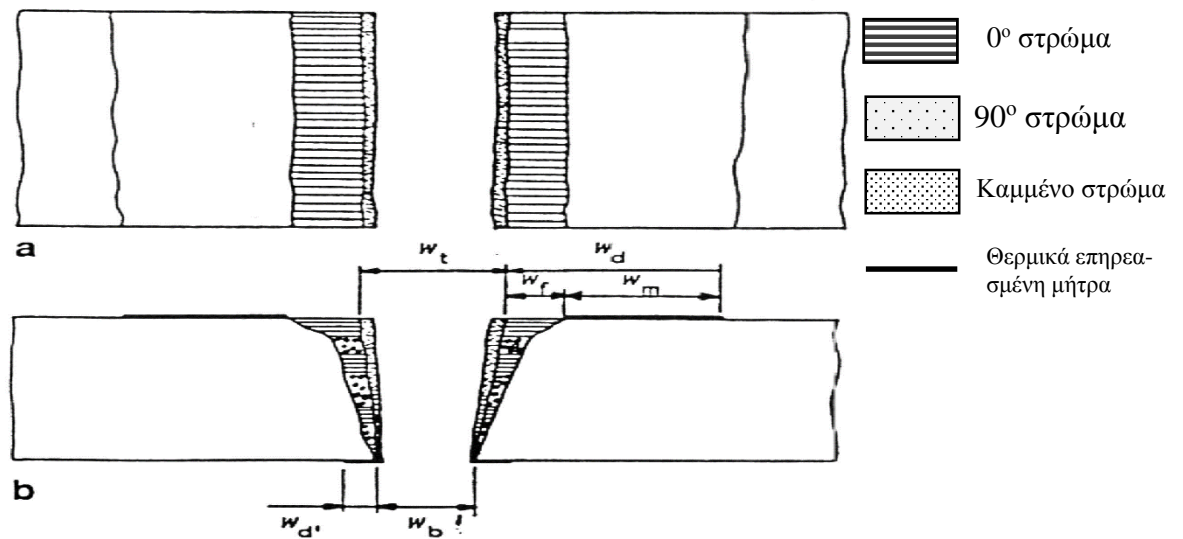
Σύνθετα υλικά [0] ₁₆				
Δοκίμιο	Ισχύς laser (Watt)	Ταχύτητα (m/min)	Φορά κοπής (ως προς ίνες)	Σχόλια
1	600	1,50	Κάθετα	Δεν κόπηκε
2	600	0,90	Κάθετα	Δεν κόπηκε
3	600	0,45	Κάθετα	
4	1200	2,25	Κάθετα	Δεν κόπηκε
5	1200	1,50	Κάθετα	Οριακή κοπή
6	600	0,45	Παράλληλα	
7	600	0,90	Παράλληλα	
8	600	1,50	Παράλληλα	
9	600	2,25	Παράλληλα	

Επίσης στο LIC έγιναν και δοκιμές κοπής στα παραπάνω υλικά με λέιζερ Nd:YAG, χωρίς όμως ποιοτικότερα αποτελέσματα από την κοπή με λέιζερ CO₂.

Οι συνθήκες κοπής ήταν ισχύς 160W, ενέργεια 1,56J, sector width 0.5, repeat rate 100Hz, ταχύτητες 0,3-0,7m/min.

Ειδικά, η κοπή συνθέτου υλικού κάθετα στις ίνες ήταν πολύ δύσκολη μέσω του λέιζερ Nd:YAG.

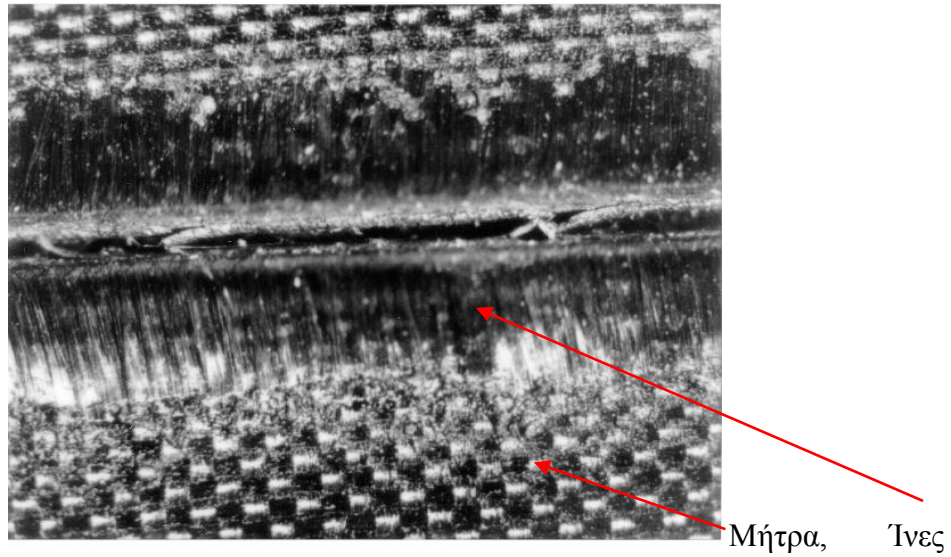
6.10 Εξέταση και μορφολογία της επιφάνειας κοπής



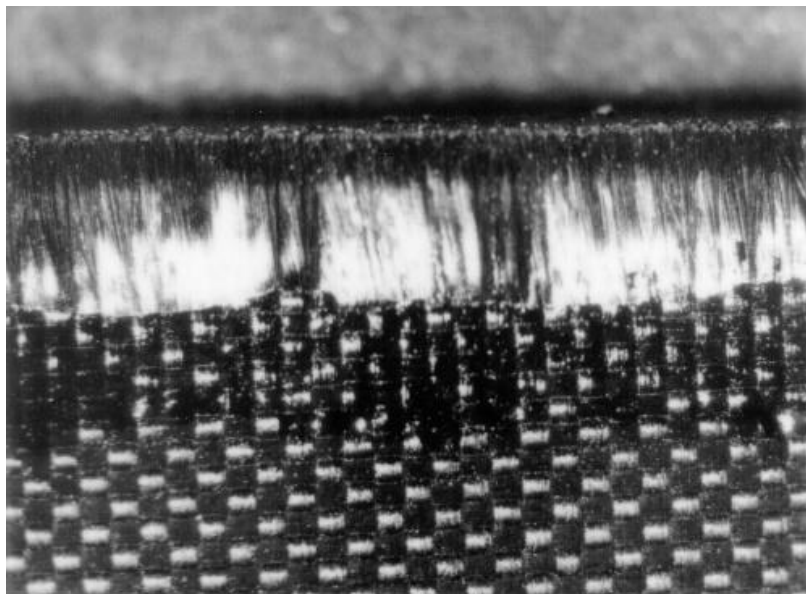
Σχήμα 6.9 : Τυπικές επιφάνειες κατά την κοπή συνθέτου με laser.
a κάτοψη, b τομή.

Τα δοκίμια παρατηρήθηκαν και φωτογραφήθηκαν σε στερεοσκόπιο απ' όπου εμφανίζονται τα εξής :

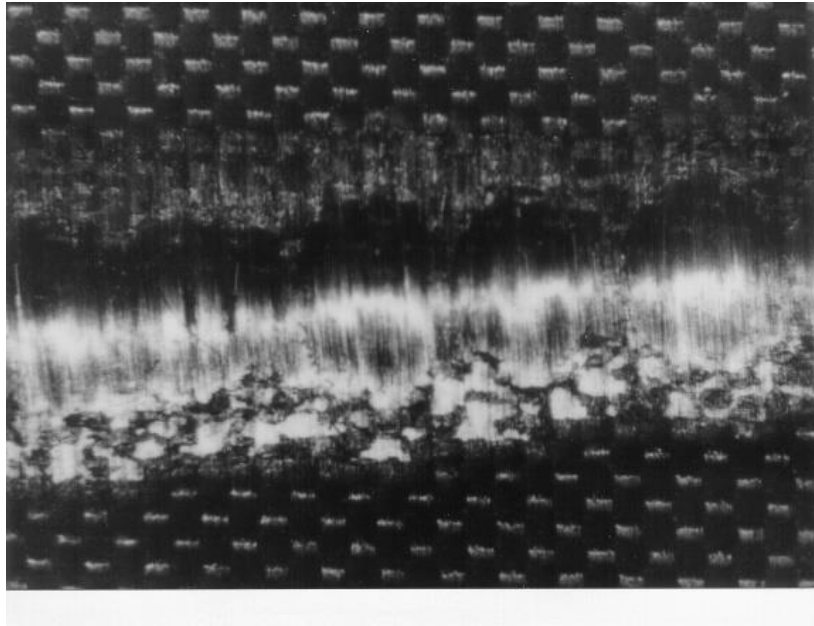
Στην επιφάνεια κοπής παρατηρείται ένα charred (καυλισμένο) στρώμα και ακολουθεί μια ζώνη, όπου οι ίνες προεξέχουν από τη μήτρα. Στην επάνω επιφάνεια του δοκιμίου υπάρχει μια πλατύτερη, σκουρότερη ζώνη όπου η μήτρα έχει υποστεί κάποια αποσύνθεση εξαιτίας των θερμών αερίων και προϊόντων που απομακρύνονται από την επιφάνεια κοπής. Φωτογραφίες 6.1 έως 6.9.



Φωτό 6.1: Κοπή συνθέτου $[0]_{16}$ κάθετα στις ίνες. Λείζερ CO_2 600W, 0,9m/min. Ένα στρώμα στη βάση δεν κόπηκε. X12



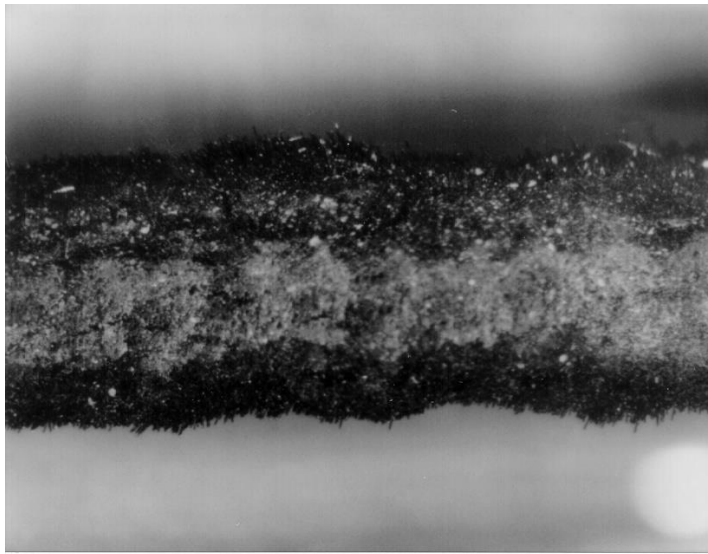
Φωτό 6.2 : Κοπή συνθέτου $[0]_{16}$ κάθετα στις ίνες, Λείζερ CO_2 600W, 0,45m/min. X12



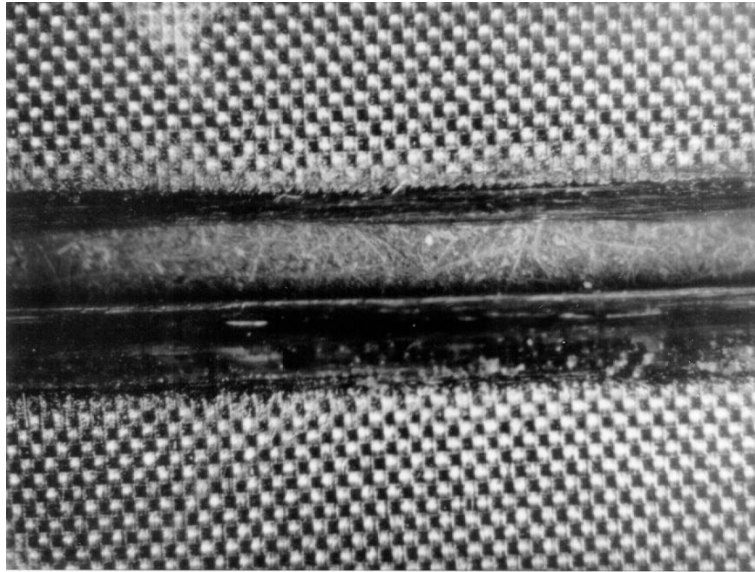
Ινες

Μήτρα

Φωτό 6.3, Κοπή συνθέτου $[0]_{16}$ κάθετα στις ίνες, ίδιου δοκιμίου με φωτό 1.
Φωτογραφία τραβηγμένη από την κάτω όψη του μη κομμένου στρώματος. X12



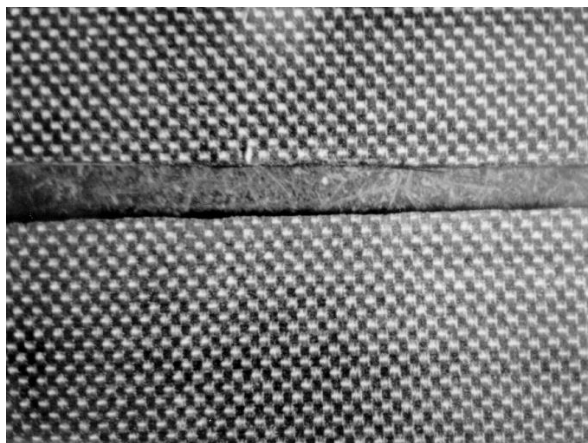
Φωτό 6.5 : Κοπή συνθέτου $[0]_8$ κάθετα στις ίνες, Λείζερ CO_2 600W, 1,5m/min, αέριο
πεπιεσμένος αέρας 5bar, X25



Ταχύτητα κοπής 2,25 m/min

Ταχύτητα κοπής 0,45 m/min

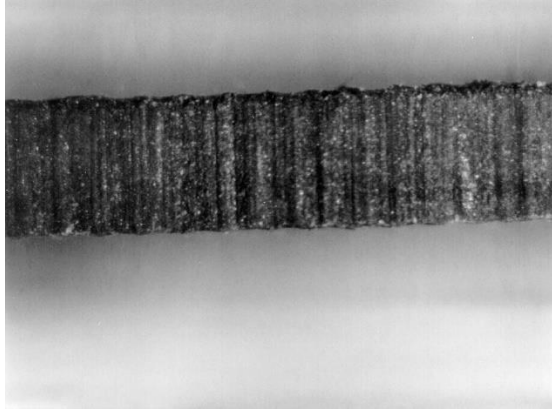
Φωτό 6.6 : Κοπή συνθέτου $[0]_{16}$ παράλληλα στις ίνες, Λείζερ CO2 600W, 0,45m/min και 2,25m/min, αέριο πεπιεσμένος αέρας 5bar, X6



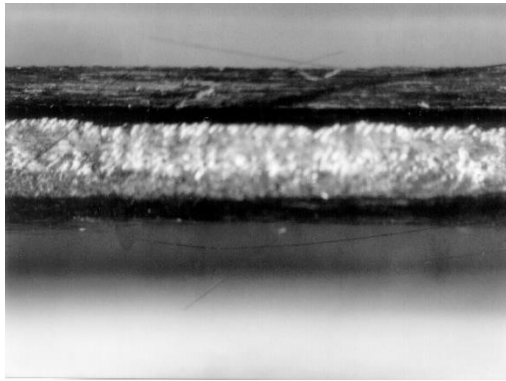
Κομένο με router

Κομμένο με αδαμαντοκορδέλα

Φωτό 6.7 : Κοπή συνθέτου $[0]_8$ παράλληλα στις ίνες, με συμβατικές μεθόδους (router, αδαμαντοκορδέλα) X6



Φωτό 6.8 : Κοπή συνθέτου [0]8 κάθετα στις ίνες, εγκάρσια τομή, Λείζερ CO₂ X25

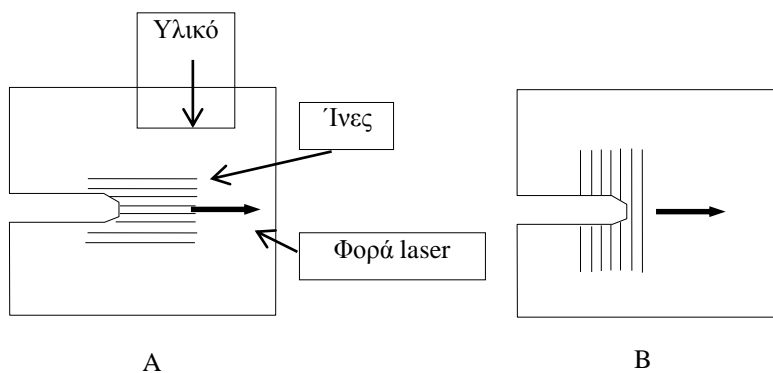


Φωτό 6.9 : Κοπή συνθέτου [0]16 παράλληλα στις ίνες, εγκάρσια τομή, Λείζερ CO₂ 600W, 2,25m/min, αέριο πεπιεσμένος αέρας 5bar, X12

Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) ορίζεται ως η περιοχή εκείνη στην οποία η θερμοκρασία υπερέβη τη θερμοκρασία εξατμίσεως της μήτρας. Η έκταση της ΘΕΖ αποτελεί μέτρο εκτίμησης της ποιότητας της κοπής.

Στα σύνθετα υλικά η κοπή με λέιζερ περιπλέκεται λόγω του ότι τα συνιστώσα μέρη (μήτρα και ίνες) συνήθως έχουν μεγάλη διαφορά θερμικής αγωγιμότητας, θερμοχωρητικότητας και θερμοκρασίας εξατμίσεως, όπως συμβαίνει για εποξειδική μήτρα και ίνες άνθρακα.

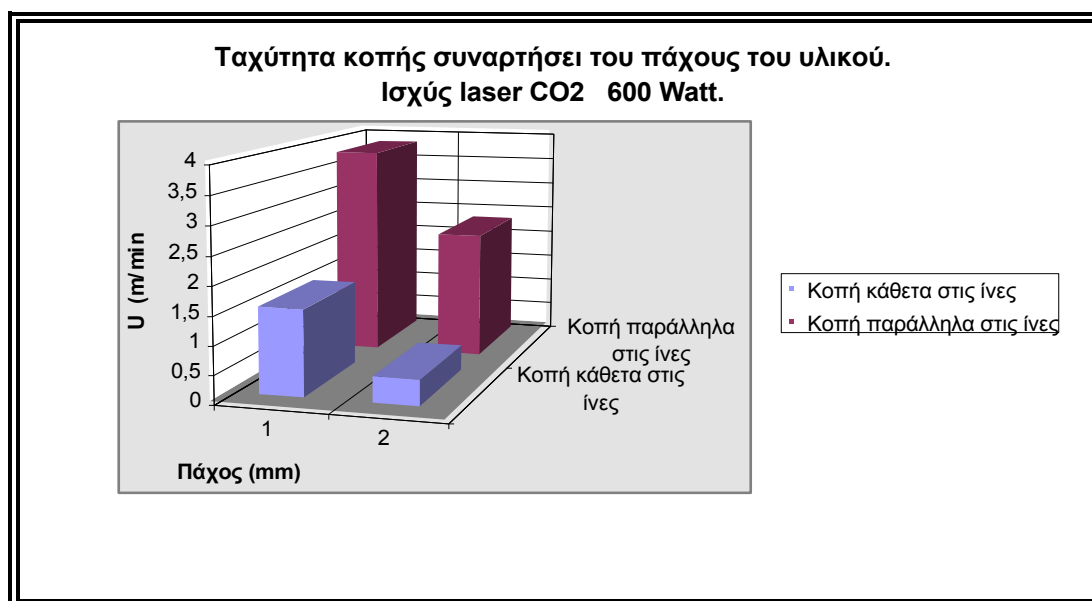
Έτσι, η κοπή διαφέρει για ένα unidirectional στρωματοειδές π.χ [0]₈, και [0]₁₆ ανάλογα με τη φορά κοπής σε σχέση με τη διεύθυνση των ινών, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 6.10.



Σχήμα 6.10 . Κοπή με laser unidirectional συνθέτου υλικού .
 (A) παράλληλα προς τη διεύθυνση των ινών και (B) κάθετα προς αυτήν.

Κατά την κοπή παράλληλα προς τη διεύθυνση των ινών (A), φωτογραφία 6.6 η θερμότητα από την ακτίνα λέιζερ, απάγεται διαμέσου των ινών και προθερμαίνει το υλικό μπροστά από την ακτίνα. Επομένως η θερμότητα αυτή δε θεωρείται απώλεια για την κοπή. Η θερμότητα κάθετα προς τη φορά κοπής απάγεται δύσκολα εξαιτίας της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του συνθέτου προς αυτήν τη διεύθυνση.

Κατά την κοπή κάθετα προς τη διεύθυνση των ινών η απαγόμενη θερμότητα από τις ίνες είναι απώλεια κι έτσι η δυναμικότητα της διεργασίας μειώνεται. Στην περίπτωση αυτή έχουμε και μεγαλύτερη ΘΕΖ. Τα παραπάνω φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



6.11 Μέτρηση θερμικά επηρεασμένης ζώνης στα σύνθετα υλικά

Η ΘΕΖ μετρήθηκε σε οπτικό μικροσκόπιο και τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 6.17. Κυμαίνεται στα 2 με 3 mm, ενώ δεν παρατηρείται στην κοπή με συμβατικές μεθόδους.

Πίνακας 6.17 : Μέτρηση θερμικά επηρεασμένης ζώνης στα σύνθετα υλικά.

ΔΟΚΙΜΙΑ LIC	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ			ΑΛΛΟΙΩΜΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΙΝΩΝ		ΑΛΛΟΙΩΜΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΗΤΡΑΣ		ΘΕΖ	
	Ισχύς W	Πίεση Bar	Ταχύτητα m/min	mm		mm		mm	
[0]8 κάθετα στις ίνες									
1	600	5	0.9	1.25		1.17		2.42	
2	600	5	1.5	1.09		0.78		1.87	
3	600	5	2.25	0.72		0.42		1.14	
[0]8 παράλληλα στις ίνες				Είσοδος	Εξόδος	Είσοδος	Εξόδος	Είσοδος	Εξόδος
1	600	5	0.9	0.68	0.70	1.23	1.23	1.91	1.93
2	600	5	1.5	1.19	0.94	0.56	0.11	1.75	1.05
3	600	5	2.25	1.43	0.84	0.63	0.11	2.06	0.95
4	600	5	3	1.56	0.34	0.84	0.11	2.40	0.44
5	600	5	3.75	1.88	0.64	1.56	0.13	3.44	0.77
[0]16 κάθετα στις ίνες									
3	600	5	0.45	1.72		1.72		3.44	
5	600	5	0.9	1.72		1.56		3.28	
[0]16 παράλληλα στις ίνες									
6	600	5	0.45	1.72		1.4		3.12	
7	600	5	0.9	1.56		1.25		2.81	
9	600	5	2.25	0.63		0.16		0.79	

6.12 Δοκιμές εφελκυσμού

Τα δοκίμια που κόπηκαν με συμβατικές μεθόδους και λέιζερ υποβλήθηκαν σε δοκιμές εφελκυσμού. Η μέγιστη αντοχή που δίνει ο κατασκευαστής (FIBERDUX) είναι 2090 Μpa.

Πίνακας 6.18: Δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια [0]₈

Μέθοδος κοπής	Διαστάσεις δοκιμίου (mm)	Επιφάνεια δοκιμίου (mm ²)	Φορτίο KN	UTS MPa
Router	19 x 1.16	22,04	38,66	1754
Δίσκος	18.89 x 1.16	21,91	39,92	1822
Κορδέλα	19.38 x 1.15	22,29	38,92	1746
Laser 1	20.05 x 1.09	21,85	37,24	1705
Laser 2	20.01 x 1.10	22,01	38,68	1757

Παρατηρήσεις : Η υδραυλική πίεση των δαγκανών ήταν 130 Bar. Ο ρυθμός επιμήκυνσης 2 mm/min. Τα tabs έγιναν από Redux 312 ενισχυμένο με υαλόνημα.

Πίνακας 6.19: Δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια [0]₁₆

Μέθοδος κοπής	Διαστάσεις δοκιμίου (mm)	Επιφάνεια δοκιμίου (mm ²)	Φορτίο KN	UTS MPa
Router	19,38 x 2,22	43,02	74,15	1724
Δίσκος	19,11 x 1,98	37,84	68,55	1812
Κορδέλα	19,50 x 2,24	43,68	73,95	1693
Laser 1	19,85 x 2,24	44,46	74,30	1671
Laser 2	19,85 x 2,18	43,27	77,10	1782

Παρατηρήσεις :Τα δοκίμια είχαν υποβληθεί πρώτα σε C-SCAN πριν από τον εφελκυσμό. Τα tabs έγιναν από PCB 1,5 mm πάχους. Η υδραυλική πίεση των δαγκανών ήταν 100 bar στο κομμένο με router δοκίμιο, ενώ στα άλλα 200 bar.

Πίνακας 6.20: Δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια [0...90]8s

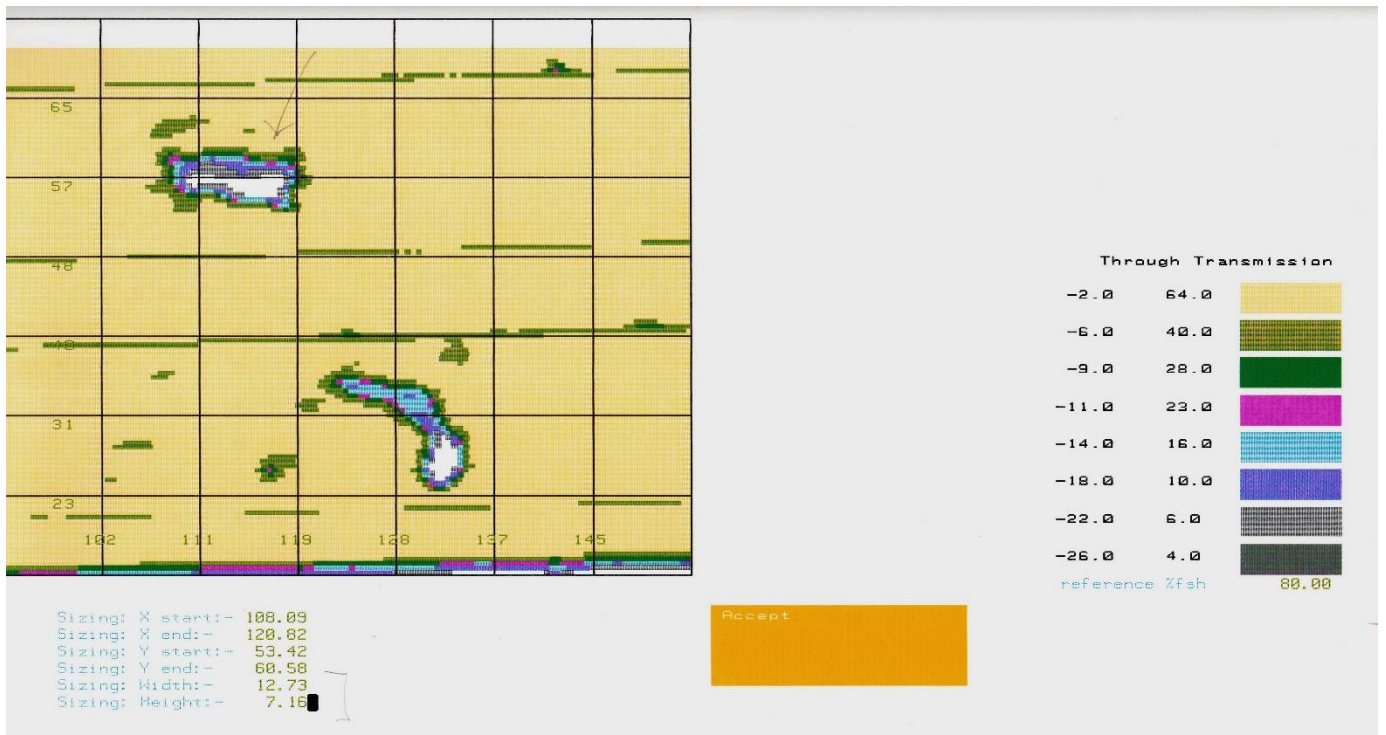
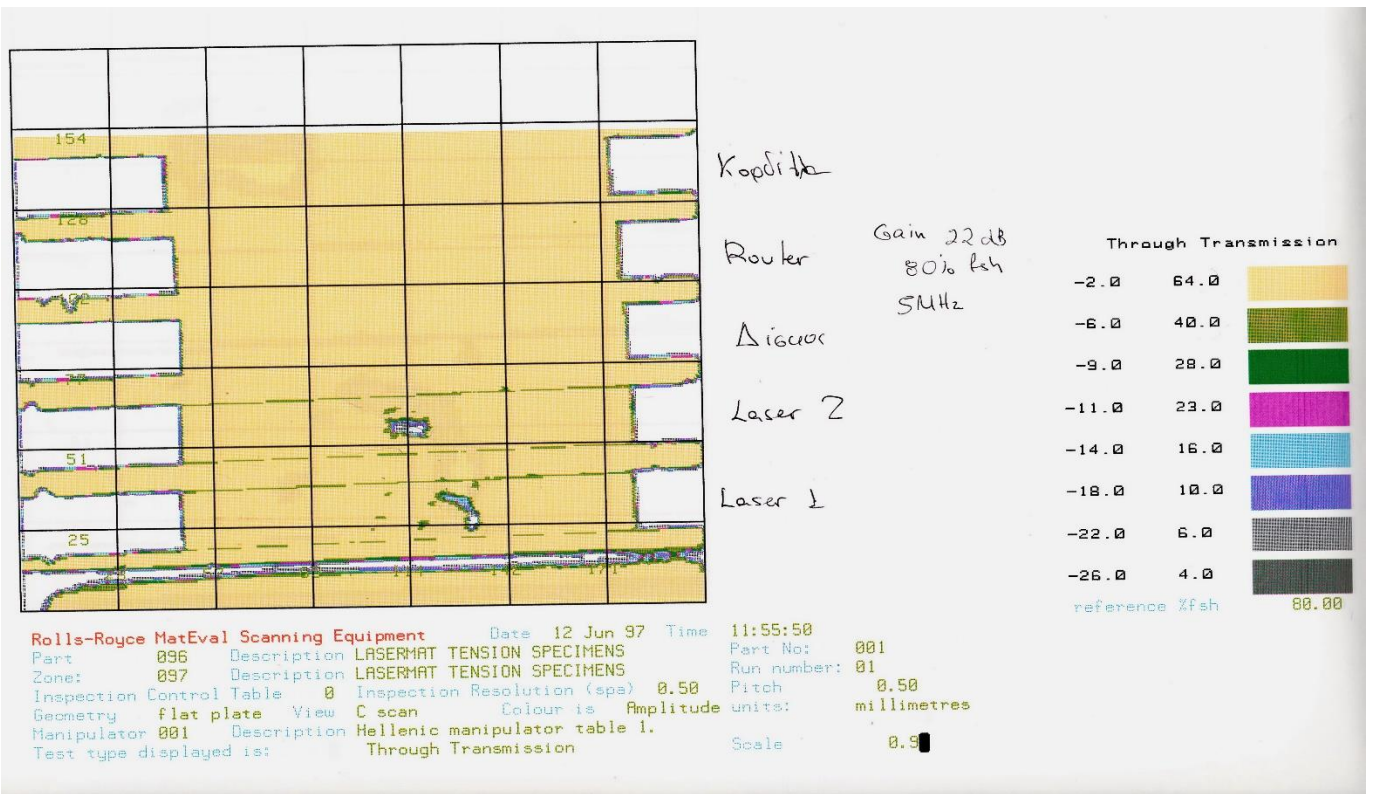
Μέθοδος κοπής	Διαστάσεις δοκιμίου (mm)	Επιφάνεια δοκιμίου (mm ²)	Φορτίο KN	UTS MPα
Router	19,54 x 2,14	41,82	48.18	1152
Δίσκος	18.92 x 2.09	39,54	50.00	1266
Κορδέλα	19,27 x 2,17	41,82	51.42	1230
Laser 1	20,00 x 2.01	40,20	35.66	887
Laser 2	20,15 x 2,04	41,11	35.24	857

Παρατηρήσεις: Όλα τα δοκίμια έσπασαν σε δυο θέσεις κοντά στα tabs. Η υδραυλική πίεση στις δαγκάνες ήταν 150 bar. Οι ίνες είχαν σπάσει πριν το φορτίο θραύσης

6.13 Έλεγχος C-SCAN

Το c-scan είναι μια μη καταστροφική μέθοδος ελέγχου που χρησιμοποιεί υπερήχους για τον εντοπισμό ατελειών και ελαττωμάτων στο υλικό. Έλεγχος με το c-scan στα σύνθετα που κόπηκαν με laser δεν έδειξε ελάττωμα σε αυτά παρά μόνο μια φυσιολογική αλλοίωση – διαφοροποίηση στις άκρες της κοπής εκεί που βρίσκεται η θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Η σοβαρότητα της ζημιάς που εμφανίζεται αντιστοιχεί σε εξασθένηση του σήματος της τάξης των 6-9db και χαρακτηρίζεται ως ελαφριά βλάβη.

Ακολουθεί εικόνα από το C-SCAN της εταιρίας Rolls Royce Mateval



Οι συνθήκες της δοκιμής ήταν : Ενίσχυση 20db, Αισθητήρες : 5 MHz, 80 % Full Screen Height, resolution : 1X1 mm. Εφαρμόστηκε η τεχνική Through Transmission σε δεξαμενή εμβάπτισης.

6.14 Αποτελέσματα διαστασιακού ελέγχου

Για να εξεταστεί η ακρίβεια και η ποιότητα της κοπής με laser τα παρακάτω δοκίμια κόπηκαν σε πλακίδια επιζητώντας συγκεκριμένες ονομαστικές διαστάσεις (π.χ 10 X 10 mm). Κατόπιν με ψηφιακό παχύμετρο μετρήθηκαν και καταγράφηκαν οι πραγματικές διαστάσεις.

Τα δοκίμια ανάλογα με το είδος τους και τις συνθήκες κοπής κατατάσσονται σε 4 σειρές ως ακολούθως. Οι σειρές 1,2 και 3 κόπηκαν στο LIC, ενώ η 4 στην EBETAM.

Πίνακας 6.21: Συνθήκες κοπής με laser CO₂ δοκιμίων Al και συνθέτων υλικών.

Σειρά	Υλικό	Ισχύς laser (Watt)	Ταχύτητα κοπής (m/min)	Αέριο	Πίεση αερίου (bar)
1	Al 7075 πάχους 2 mm	2000	0.45	N2	6
2	Al 7075 πάχους 5 mm	3000	0.45	O2	5
3	Alclad 7075 πάχους 2,3mm	2000	1.20	N2	5
4	Σύνθετα				

Στον παρακάτω πίνακα 6.22 εμφανίζονται τα αποτελέσματα του διαστασιακού ελέγχου. Οι ζητούμενες ονομαστικές διαστάσεις και οι μετρηθείσες πραγματικές ως μέση τιμή και τυπική απόκλιση.

Πίνακας 6.22: Ονομαστικές και πραγματικές διαστάσεις δοκιμίων μεταλλικών υλικών, σειρών 1,2,3.

Δοκίμια σειράς 1	Ονομαστικές διαστάσεις (mm)		Πραγματικές διαστάσεις Μέση τιμή (mm)			
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	Sx (mm)	Sy (mm)
1	10,00	10,00	9,72	10,63	0,02	0,06
2	10,00	10,00	10,21	10,65	0,04	0,05
3	10,00	20,00	10,66	19,86	0,08	0,04
4	30,00	40,00	29,19	39,83	0,07	0,07
5	30,00	50,00	29,16	49,71	0,04	0,05

Δοκίμια σειράς 2	Ονομαστικές διαστάσεις (mm)		Πραγματικές διαστάσεις Μέση τιμή (mm)			
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	Sx (mm)	Sy (mm)
1	10,00	10,00	10,67	10,49	0,12	0,10
2	10,00	20,00	11,02	19,51	0,04	0,09
3	10,00	20,00	11,00	19,48	0,04	0,05
4	30,00	40,00	31,35	39,41	0,07	0,07
5	30,00	50,00	31,25	49,62	0,10	0,12

Δοκίμια σειράς 3	Ονομαστικές διαστάσεις (mm)		Πραγματικές διαστάσεις Μέση τιμή (mm)			
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	Sx (mm)	Sy (mm)
1	10,00	10,00	9,02	9,75	0,03	0,05
2	10,00	20,00	9,35	19,68	0,03	0,03
3	30,00	40,00	29,30	39,68	0,04	0,05
4	30,00	50,00	29,83	49,76	0,01	0,07

Τα παρακάτω δοκίμια 1,2,3,4 έχουν κοπεί αντίστοιχα με κοπτικό τροχό (Buehler), αδαμαντοκορδέλα, «rooter (φρεζάκι)» και laser.

Πίνακας 6.23: Ονομαστικές και πραγματικές διαστάσεις δοκιμίων συνθέτων υλικών.

Δοκίμια σειράς 4	Ονομαστική διάσταση	Πραγματική διάσταση Μέση τιμή	
		X (mm)	Sx (mm)
[0] ₈	X (mm)	X (mm)	Sx (mm)
1	20,00	18,88	0,03
2	20,00	19,36	0,03
3	20,00	19,50	0,02
4	20,00	20,01	0,02

Δοκίμια σειράς 4	Ονομαστική διάσταση	Πραγματική διάσταση Μέση τιμή	
		X (mm)	Sx (mm)
[0] ₁₆	X (mm)	X (mm)	Sx (mm)
1	20,00	18,97	0,07
2	20,00	19,43	0,07
3	20,00	19,37	0,02
4	20,00	19,98	0,03

Δοκίμια σειράς 4	Ονομαστική διάσταση	Πραγματική διάσταση Μέση Τιμή	
		X (mm)	Sx (mm)
[0/45/90] _{8S}	X (mm)	X (mm)	Sx (mm)
1	20,00	18,89	0,09
2	20,00	19,30	0,05
3	20,00	19,41	0,05
4	20,00	20,03	0,02

Για τις συνθήκες κοπής που εφαρμόστηκαν, η ακρίβεια της κοπής με τροχό και ψαλίδι είναι συγκρίσιμη με την ακρίβεια της κοπής με laser, για δοκίμια Αλουμινίου πάχους 2-2.3 mm, ενώ για μεγαλύτερο πάχος αλουμινίου, 5mm, οι συμβατικές μέθοδοι δίνουν καλύτερα αποτελέσματα..

Στην κοπή των συνθέτων υλικών το laser φαίνεται να δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια, ίσως γιατί ελέγχεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή.

6.15 Κοπή σύνθετου υλικού τύπου σάντουιτς

Το υλικό αυτό πάχους 2cm με κυψελοειδή δομή (honeycomb) εσωτερικά και κράμα Al πάνω και κάτω, δεν κόπηκε επιτυχώς με το λέιζερ CO₂, παρά μόνο με συμβατικές μεθόδους (αδαμαντοκορδέλα, τροχός).



Σχήμα 6.11: Σύνθετο υλικό με κυψελοειδή δομή τύπου Σάντουιτς.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εξαιτίας της μεγάλης ανακλαστικότητας και θερμικής αγωγιμότητας του αλουμινίου, η κοπή του υλικού με λέιζερ παρουσιάζεται αρκετά δύσκολη. Παρατηρούμε γρέζι στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου, μεγαλύτερη τραχύτητα και σχεδόν ίδια ακρίβεια με την κοπή με συμβατικές μεθόδους.

Στη διαμήκη τομή η ζώνη τήξης (ZT) είναι πάρα πολύ μικρή, της τάξης μερικών μm και η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ) είναι ευθύγραμμη της τάξης των 200 μm. Στην εγκάρσια τομή η ZT και η ΘΕΖ αυξάνονται σταδιακά από το σημείο εισόδου του λέιζερ προς την έξοδο αυτού (600μm) από το δοκίμιο, όπου παρατηρείται και μακροσκοπικά το τηγμένο και εκ νέου στερεοποιημένο υλικό, «γρέζι».

Με αύξηση της ταχύτητας μειώνεται η ΘΕΖ και η τραχύτητα. Υπάρχει ένα άνω και ένα κάτω όριο ταχυτήτων που δίνουν για συγκεκριμένο πάχος δοκιμίου αποδεκτά αποτελέσματα.

Βάσει των αποτελεσμάτων της μικροσκοπρότητας και της τραχύτητας οι καλύτερες συνθήκες κοπής με λέιζερ CO₂ των δοκιμίων Al7075-O και Al7075-Alclad εμφανίζονται να είναι ισχύς 1300 W, ταχύτητα 1,2 m/min και πίεση αερίου 5-8 bar. Οι συνθήκες αυτές έχουν προσδιοριστεί για πάχος δοκιμίου 2-2,5 mm. Για πάχος 5 mm δεν έχουν βρεθεί οι συνθήκες κοπής με λέιζερ που να δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Η κοπή με λέιζερ δεν επηρεάζει την αντοχή του αλουμινίου σε διάβρωση.

Η κοπή των συνθέτων υλικών με λέιζερ εξαρτάται έντονα από τον προσανατολισμό των ινών. Η αντίστοιχη μετρηθείσα ΘΕΖ δεν έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Διαστασιακά τα σύνθετα κόβονται ελαφρώς ακριβέστερα με λέιζερ σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κοπής (router, δίσκος, κορδέλα).

Η μηχανική συμπεριφορά των συνθέτων δεν φαίνεται να επηρεάζεται κατά την κοπή με λέιζερ.

Σημειώνεται τελικά ότι με τις συγκεκριμένες συνθήκες τα μεταλλικά Al 7075-O και σύνθετα υλικά (ενισχυμένα πολυμερή με ίνες άνθρακα) δεν κατέστη δυνατό να κατεργαστούν αποδοτικά και να προκύψει επιφάνεια με ποιότητα τελικής κοπής.

Δεν προτείνεται επί του παρόντος η κοπή με λέιζερ ότι μπορεί να αντικαταστήσει τις συμβατικές μεθόδους κοπής για τα υλικά αυτά.

Συνίσταται περαιτέρω διερεύνηση των συνθηκών κοπής είτε με μεγαλύτερης ισχύος λέιζερ ή άλλου τύπου λέιζερ. Επίσης εναλλακτικά μπορεί να διερευνηθεί η κατεργασία αυτών με έτερες μη συμβατικές μεθόδους κατεργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abrate S.-Walton D.A., “Machining of composite materials. Part I: Traditional methods” στο *Composites Manufacturing, Volume 3, Issue 2*, 1992, σσ. 75-83
- Abrate S.-Walton D.A., “Machining of composite materials. Part II: Non-Traditional methods” στο *Composites Manufacturing, Volume 3, Issue 2*, 1992, σσ. 85-94
- American Society for Metals, *Metals Handbook* (21 volumes), Metals Park, Ohio 1980
- Caristan Ch., *Laser Cutting Guide for Manufacturing*, Michigan 2004
- Chawla K.K., *Composite Materials*, New York-Berlin-Heidelberg 1987
- Frisch David and Susan, *Metal Design and Fabrication*, New York 1998
- Injeyan H.-Goodno G. (edd.), *High Power Laser Handbook*, New York 2011
- Καρούζος Στ., *Κατασκευαστικές Τεχνολογίες*, Ηράκλειο 2003
- Μανσούρ Γκ., *Μηχανουργική Τεχνολογία – Εργαλειομηχανές, Εργαλειομηχανές Αριθμητικού Ελέγχου NC-CNC*, Θεσσαλονίκη 2010
- Μπαντέκα Ε., *Βιομηχανικά Κράματα*, Αθήνα 1995
- Παναγόπουλος Χρ.Ν., *Πολυμερή και Σύνθετα Υλικά*, Αθήνα 1990
- Παντελής Δ., *Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά*, Αθήνα 2008
- Παπαδημητρίου Γ., *Γενική Μεταλλογνωσία Ι*, Αθήνα 1989
- Παπαδημητρίου Γ., *Εισαγωγή στην Πλαστική Διαμόρφωση των Μετάλλων*, Αθήνα 1990
- Παπαμιχαήλ Δ.Ε.- Σφατζικόπουλου Ν.Μ., *Μηχανουργική Τεχνολογία*, Εργαστήριο ΙΙ, τόμος β΄, Αθήνα 1994
- Παραδεισιάδης Γ., *Διαμορφώσεις χωρίς Αφαίρεση Υλικού*, Θεσσαλονίκη 2012
- Παρίκος Γ., *Μηχανουργική Τεχνολογία*, Αθήνα 2004
- Ready J., *Industrial applications of lasers*, New York 1997
- Schaeffer R., *Fundamentals of Laser Micromachining*, Florida 2012
- Schuler, *Metal Forming Handbook*, Berlin-Heidelberg 1998
- Svelto O., *Αρχές των lasers*, μεταφρ. Κουρούκλη Γ.Α., Σεραφετινίδη Α.Α., Αθήνα 1986
- Thompson A., “CO₂ Laser Cutting of Highly Reflective Materials” στο *Industrial Laser Handbook* 1989, σσ. 149-153
- Τσαλαπάτης Π., *Στοιχεία Μηχανουργικών Κατεργασιών*, Αθήνα 1998
- Φούρλαρης Γ., *Μετασχηματισμοί φάσεων*, Αθήνα 2005
- Χρυσουλάκης Γ.Δ.-Παντελής Δ.Ι., *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, Αθήνα 2008