



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΨΥΧΡΗ
ΕΛΑΣΗ ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΗΤΡΑΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΝΑΝΟΔΟΜΩΝ
ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ



ΧΑΪΚΑΛΗΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2018



Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η εκπόνηση έγινε κατά το χρονικό διάστημα Οκτωμβρίου 2017 έως τον Ιούλιο του 2018, με σκοπό την απόκτηση του διπλώματος του Μηχανολόγου Μηχανικού. Πέραν της προσωπικής προσπάθειας, δεν θα ήταν δυνατή η εκπλήρωση χωρίς την βοήθεια ορισμένων προσώπων. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε προς το πρόσωπό μου, αναθέτοντας μου αυτή την εργασία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτωρα κ. Γεώργιο Σερέτη για τον χρόνο που αφιέρωσε καθώς και την υπομονή του να με βοηθήσει σε τεχνικά και επιστημονικά θέματα. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω το τεχνικό προσωπικό του τομέα κατεργασιών των υλικών, συγκεκριμένα του κ. Κωνσταντίνου Κερασιώτη και του κ. Νικόλαου Μελισσά, για τη βοήθεια και την τεχνική υποστήριξη στον χώρο του εργαστηρίου κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Ευχαριστώ τον υποψήφιο Διδάκτωρα κ. Ιωάννη Παπαντωνίου για τον χρόνο που αφιέρωσε για να με βοηθήσει. Ευχαριστώ πολύ τους φίλους μου για την υποστήριξη τους. Ευχαριστώ πολύ την μητέρα μου, η οποία ευθύνεται για οτιδήποτε μικρό και μεγάλο έχω καταφέρει και τον πατέρα μου, ο οποίος θα είναι για πάντα μαζί μου. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην γιαγιά μου την Νίκη.



Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της διαμορφωσιμότητας σε ψυχρή έλαση νανοσύνθετων υλικών (GNPs) μήτρας αλουμινίου με ενίσχυση νανοδομών γραφενίου.

Τα σύνθετα υλικά παρασκευάστηκαν με την μέθοδο της βαρυτικής χύτευσης, ενώ η ενσωμάτωση των νανοδομών έγινε με ανάδευση με το χέρι όταν το υλικό μήτρας βρισκόταν σε υγρή φάση.

Συνολικά κατασκευάστηκαν τέσσερις σειρές δοκιμίων, στις οποίες διέφερε η σύσταση σε νανοδομές. Η περιεκτικότητα σε νανοδομές γραφενίου των δοκιμίων ήταν 0,1%, 0,2% και 0,3% κ.β.. Η τέταρτη σειρά δοκιμίων αφορά το καθαρό αλουμίνιο, το οποίο χρησιμοποιείται ως σειρά δοκιμίων αναφοράς.

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές έλασης. Κατά τις δοκιμές μετρούνταν δεδομένα που αφορούν τις διαστάσεις των δοκιμίων, την σκληρότητά τους και τα φορτία της έλασης.

Τέλος πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφικός έλεγχος των δοκιμίων με οπτικό μικροσκόπιο, ώστε να ελεγχθεί η επίδραση του ποσοστού γραφενίου σε σειρά πασών έλασης ίδιων χαρακτηριστικών με αυτό του αλουμινίου αναφοράς.

Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών βελτιώνονται με την προσθήκη γραφενίου. Τόσο η σκληρότητα, όσο και το φορτίο ακολουθούν την ίδια τάση, με τις καλύτερες ιδιότητες να εμφανίζονται στα δοκίμια 0,1% GNPs, μετά στα δοκίμια 0,2% GNPs και τέλος στα δοκίμια 0,3% GNPs.

Όσον αφορά τη μεταβολή των διαστάσεων, η συμπεριφορά του υλικού είναι σταθερή για όλες τις σειρές δοκιμίων.



Abstract

This diploma thesis was held at the Laboratory of Process Technology of the Department of Process Technology of the School of Mechanical Engineering of the National Technical University of Athens.

The purpose of this diploma thesis is to study the formability, in cold rolling, of nanocomposite aluminium matrix materials enhanced with graphene nanoplatelets (GNPs).

The composites were made by the gravity casting process, and the nanostructure incorporation was done by hand stirring when the matrix material was in a liquid state.

In total, four series of specimens were produced, in which the nanostructure composition differed. The graphene nanostructure content of the samples was 0.1%, 0.2% and 0.3% by weight. The fourth series of specimens concerned pure aluminium, and were used as reference specimens.

The specimens were subjected to rolling tests. During the tests, data on the dimensions of the specimens, their hardness and their loads were measured.

Finally, metallographic examination of the specimens by optical microscopy was carried out to check the effect of the graphene content on a series of passes of the same characteristics as with the reference aluminium.

The mechanical properties of the materials improve with the GNPs addition. Toughness, as well as rolling loads follow the same trend, with the 0,1% GNPs specimens having the best properties, then the 0,2% GNPs and finally the 0,3% GNPs.

As far as the dimensional progression, the behavior is the same for all the specimens.



Περιεχόμενα

1. Θεωρητικό μέρος

1.1. Το αλουμίνιο.....	15
1.1.1. Η ιστορία του αλουμινίου.....	15
1.1.2. Το Υλικό του 21ου αιώνα.....	16
1.1.3. Αλουμίνιο και βιομηχανία.....	17
1.1.4. Ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου και των κραμάτων του.....	18
1.1.5. Οι κατηγορίες των κραμάτων.....	21
1.1.6. Κράματα θερμοσκληρυνόμενα.....	21
1.1.7. Κράματα εργοσκληρυνόμενα.....	22
1.1.8. Τα κράματα του αλουμινίου και τα χαρακτηριστικά τους.....	23
1.1.9. Κράματα αλουμινίου για χυτήρια.....	24
1.1.10. Τομείς εφαρμογών-κράματα που χρησιμοποιούνται.....	25
1.1.11. Εφαρμογές προϊόντων αλουμινίου και κράματα.....	25
1.1.12. Πρωτογενές και δευτερόγενές αλουμίνιο.....	29
1.1.13. Αλουμίνιο και βιώσιμη ανάπτυξη	30
1.1.14. Πρακτική ανακύκλωσης.....	31
1.1.15. Παραγωγή Αλουμινίου και βιωσιμότητα.....	32
1.1.16. Λεξικό όρων αλουμινίου.....	33
1.1.17. Βιβλιογραφία κεφαλαίου.....	34
1.2. Νανοϋλικά.....	35
1.2.1. Τι είναι.....	35
1.2.2. Σύνθεση.....	35
1.2.3. Βιβλιογραφία κεφαλαίου.....	36
1.3. Το γραφένιο.....	37
1.3.1. Εισαγωγή.....	37
1.3.2. Αλλοτροπικές μορφές άνθρακα.....	37
1.3.3. Γραφένιο - τι είναι.....	39
1.3.4. Πρώτη εμφάνιση γραφενίου	39
1.3.5. Μονοστρωματικό και πολυστρωματικό γραφένιο.....	40
1.3.6. Ιδιότητες.....	40
1.3.7. Ηλεκτρονικές ιδιότητες.....	41
1.3.8. Οπτικές ιδιότητες.....	41
1.3.9. Θερμικές ιδιότητες.....	41
1.3.10. Μηχανικές ιδιότητες.....	42
1.3.11. Πυκνότητα.....	42
1.3.12. Εμφάνιση και παραγωγή.....	43
1.3.13. Μέθοδος κολλητικής ταινίας.....	43
1.3.14. Ανάπτυξη σε καρβίδιο πυριτίου.....	44
1.3.15. Ανάπτυξη πάνω σε υποστρώματα μετάλλου.....	44
1.3.16. Πυρόλυση του αιθοξειδίου του νατρίου (sodium ethoxide).....	45
1.3.17. Μείωση του οξειδίου του γραφίτη.....	45



1.3.18.	Από νανοσωλήνες.....	46
1.3.19.	Εφαρμογές.....	46
1.3.20.	Πολυμερή σύνθετα με ενίσχυση γραφενίου.....	46
1.3.21.	Το γραφένιο στην κατασκευή εύκαμπτων οθονών και κυκλωμάτων.....	48
1.3.22.	Γραφένιο και μπαταρίες.....	48
1.3.23.	Ύφανση.....	49
1.3.24.	Το λεπτότερο μπαλόνι του κόσμου.....	50
1.3.25.	Εξέλιξη ανθρακικών προϊόντων.....	51
1.3.26.	Βιβλιογραφία κεφαλαίου.....	52
1.4.	Σύνθετα υλικά.....	53
1.4.1.	Εισαγωγή και ορισμός.....	53
1.4.2.	Ιστορική εξέλιξη.....	54
1.4.3.	Ταξινόμηση.....	55
1.4.4.	Κοκκώδη σύνθετα.....	58
1.4.5.	Μήτρα.....	59
1.4.6.	Οργανικές μήτρες.....	60
1.4.7.	Μεταλλικές μήτρες.....	61
1.4.8.	Κεραμικές μήτρες.....	61
1.4.9.	Τελική επιλογή υλικών.....	62
1.4.10.	Επίδραση του γραφενίου στο αλουμίνιο.....	63
1.4.11.	Μεθόδοι δημιουργίας συνθέτων αλουμινίου-γραφενίου.....	64
1.4.12.	Βιβλιογραφία κεφαλαίου.....	67
1.5.	Χύτευση.....	69
1.5.1.	Εισαγωγικά στοιχεία.....	69
1.5.2.	Ταξινόμηση των μεθόδων χύτευσης.....	70
1.5.3.	Βασική ορολογία χύτευσης.....	71
1.5.4.	Ικανότητα των υλικών προς χύτευση ή εύροια (fluidity).....	73
1.5.5.	Κύριες μέθοδοι χύτευσης.....	75
1.5.6.	Μηχανισμός στερεοποίησης χυτών.....	79
1.5.7.	Μηχανισμός στερεοποίησης: Παρατηρούμενα φαινόμενα.....	80
1.5.8.	Ελαττώματα χυτών αντικειμένων.....	86
1.5.9.	Βιβλιογραφία κεφαλαίου.....	86
1.6.	Διαμορφωσιμότητα.....	88
1.6.1.	Εισαγωγή.....	88
1.6.2.	FLD (forming limit diagram-διάγραμμα επιτρεπόμενης διαμόρφωσης).....	88
1.6.3.	Δοκιμές μορφοποίησης.....	90
1.6.4.	Ανιστροπρία.....	92
1.6.5.	Εργοσκλήρυνση.....	93
1.6.6.	Σηματισμός ρωγμής.....	94
1.6.7.	Βιβλιογραφία κεφαλαίου.....	94
1.7.	Ψυχρές κατεργασίες.....	96



1.7.1.	Γενικά για τις ψυχρές κατεργασίες.....	96
1.7.2.	Βιβλιογραφία κεφαλαίου.....	98
1.8.	Έλαση.....	99
1.8.1.	Εισαγωγή.....	99
1.8.2.	Διαδικασία παραγωγής προϊόντων έλασης αλουμινίου.....	100
1.8.3.	Θερμή έλαση αλουμινίου.....	100
1.8.4.	Ψυχρή έλαση αλουμινίου.....	101
1.8.5.	Προϊόντα έλασης αλουμινίου.....	101
1.8.6.	Τυποποίηση.....	103
1.8.7.	Διαμόρφωση ελασμάτων με έλαση.....	105
1.8.8.	Εργαλειομηχανές έλασης.....	108
1.8.9.	Αρχές της έλασης.....	112
1.8.10.	Πλάτυνση τεμαχίου.....	114
1.8.11.	Δομή κόκκων.....	116
1.8.12.	Ράουλα των εργαλειομηχανών έλασης.....	117
1.8.13.	Εκτροπή ράουλου.....	118
1.8.14.	Ελαττώματα.....	119
1.8.15.	Μηχανική της έλασης.....	121
1.8.16.	Μήκος τόξου επαφής.....	122
1.8.17.	Δυνάμεις.....	122
1.8.18.	Κατανομή της πίεσης ράουλων.....	122
1.8.19.	Συνθήκη έναρξης της έλασης.....	123
1.8.20.	Μέγιστη μείωση πάχους ανά πάσο.....	124
1.8.21.	Φορτίο έλασης.....	124
1.8.22.	Ροπή στρέψης και ισχύς.....	125
1.8.23.	Βιβλιογραφία κεφαλαίου.....	125
2.	Πειραματικό μέρος.....	126
2.1.	Στοιχειομετρική ανάλυση του αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε.....	126
2.2.	Υπολογισμός αριθμού πασών.....	127
2.3.	Έλαση καθαρού αλουμινίου έως σταθερό τελικό πάχος.....	130
2.3.1.	Χύτευση.....	130
2.3.2.	Κοπή των χυτών τεμαχίων.....	135
2.3.3.	Προετοιμασία τεμαχίων για έλαση.....	136
2.3.4.	Έλαση.....	139
2.3.5.	Σκληρομέτρηση.....	141
2.3.6.	Αποτελέσματα.....	143
2.4.	Έλαση σε διαφορετικό αριθμό πασών για καθαρό αλουμίνιο.....	144
2.4.1.	Χύτευση.....	144
2.4.2.	Κοπή χυτευμένων τεμαχίων.....	145
2.4.3.	Προετοιμασία τεμαχίων για έλαση.....	146



2.4.4.	Έλαση.....	147
2.4.5.	Αποτελέσματα.....	148
2.5.	Έλαση σε διαφορετικό αριθμό πασών για τα δοκίμια 0,1%, 0,2% και 0,3% σε GNPs.....	151
2.5.1.	Πειραματική διαδικασία.....	151
2.5.2.	Μέτρα ασφαλείας και οι νανοδομές.....	152
2.5.3.	Προετοιμασία για χύτευση.....	153
2.5.4.	Χύτευση.....	155
2.5.5.	Κοπή χυτευμένων τεμαχίων.....	156
2.5.6.	Προετοιμασία των τεμαχίων για έλαση.....	158
2.5.7.	Έλαση.....	163
2.5.8.	Σκληρομέτρηση.....	166
2.5.9.	Αποτελέσματα.....	167
2.5.10.	Μεταλλογραφική ανάλυση.....	178
2.6.	Συμπεράσματα.....	189
2.7.	Βιβλιογραφία πειραματικού μέρους.....	190



Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1 : Κρυσταλλική δομή αλουμινίου.....	18
Εικόνα 2 : τήγμα αλουμινίου σε ένα στάδιο παραγωγής.....	29
Εικόνα 3 : διαδικασία παραγωγής πρωτόχυτου αλουμινίου.....	30
Εικόνα 4 : Βωξίτης.....	32
Εικόνα 5 : Επίπεδα διατεταγμένων ατόμων άνθρακα.....	37
Εικόνα 6 : Αλλότροπα άνθρακα.....	38
Εικόνα 7 : Πυκνότητα διαφόρων υλικών.....	42
Εικόνα 8 : Μηχανική αποφλοΐωση.....	44
Εικόνα 9 : Γραφένιο πάνω σε ρουθένιο.....	45
Εικόνα 10 : Φίλμ οξειδίου του γραφενίου.....	50
Εικόνα 11 : Εξέλιξη ανθρακικών προϊόντων.....	51
Εικόνα 12 : Βασικές οικογένειες υλικών για ομάδες συνθέτων.....	53
Εικόνα 13 : Πλέξη ινών.....	56
Εικόνα 14 : Σύνθετα υλικά.....	57
Εικόνα 15 : Υλικό μήτρας και θερμοκρασία.....	60
Εικόνα 16 : Βήματα κατασκευής σύνθετου αλουμινίου-γραφενίου με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας.....	64
Εικόνα 17 : Μικρογράφημα επιφάνειας 35% σε γραφένιο κατά όγκο, κατασκευασμένου με μεταλλουργία.....	64
Εικόνα 18 : Βήματα κατασκευής σύνθετου αλουμινίου-γραφενίου με τη μέθοδο συγκόλλησης διάχυσης.....	65
Εικόνα 19 : Βήματα κατασκευής σύνθετου αλουμινίου-γραφενίου με τη μέθοδο ανάδευσης τήγματος.....	66
Εικόνα 20 : Βήματα κατασκευής σύνθετου αλουμινίου-γραφενίου με τη μέθοδο χύτευσης υπό πίεση.....	66
Εικόνα 21 : Βήματα κατασκευής σύνθετου αλουμινίου-γραφενίου με μέθοδο εναπόθεσης. Οι ίνες ψεκάζονται με το υλικό μήτρας αφού τυλιχθούν σε κύλινδρο.....	67
Εικόνα 22 : Ταξινόμηση μεθόδων χύτευσης των μετάλλων.....	71
Εικόνα 23 : Ορολογία χύτευσης με αναφορά σε τομή καλουπιού για χύτευση σε άμμο.....	73
Εικόνα 24 : Χύτευση σε άμμο.....	75
Εικόνα 25 : Χύτευση κελύφους ή χύτευση με «μάσκα».....	76
Εικόνα 26 : Χύτευση με επένδυση ή με «λιωμένο κερί» (investment casting).....	77
Εικόνα 27 : Χύτευση (με βαρύτητα) σε μόνιμο τύπο.....	77
Εικόνα 28 : Χύτευση υπό χαμηλή πίεση.....	78
Εικόνα 29 : Χαρακτηριστικές φάσεις κατά τη στερεοποίηση τήγματος.....	80
Εικόνα 30 : (α) Σχηματισμός διακένωσης, (β) Επίδραση της γεωμετρίας του τύπου στο σχηματισμό διακένωσης.....	81
Εικόνα 31 : Εφαρμογή και λειτουργία ψευδοκεφαλής.....	82
Εικόνα 32 : Εφαρμογή προσεπιχωνεύματος.....	82



Εικόνα 33 : Εφαρμογή «ψύχοντος σώματος».....	83
Εικόνα 34 : Τυπικές μορφές διακρυστάλλωσης χυτού – (α) ανάπτυξη δύο ζωνών, (β) ανάπτυξη τριών ζωνών δ) Διαφορισμός.....	85
Εικόνα 35 : Μέτρηση παραμορφώσεων.....	89
Εικόνα 36 : FLD διάγραμμα.....	89
Εικόνα 37 : Δοκιμή μορφοποίησης.....	91
Εικόνα 38 : Βαθεία κοίλανση.....	91
Εικόνα 39 : Γραφικά παράσταση ανισοτροπίας.....	93
Εικόνα 40 : Σχηματισμός ρωγμής.....	94
Εικόνα 41 : Συμπεριφορά όλκιμων μετάλλων σε εφελκυσμό.....	97
Εικόνα 42 : Φορτίο παραμόρφωσης μετά από κατεργασία.....	98
Εικόνα 43 : Σχηματική αναπαράσταση της έλασης.....	99
Εικόνα 44 : Θερμή έλαση αλουμινίου.....	100
Εικόνα 45 : Έλαση φύλλων.....	101
Εικόνα 46 : Έλαση βαμμένων φύλλων.....	102
Εικόνα 47 : Προϊόντα έλασης.....	104
Εικόνα 48 : Κάμψεις ελασμάτων.....	105
Εικόνα 49 : Διαδοχικά στάδια σχηματισμού σωλήνα.....	106
Εικόνα 50 : Μορφή προϊόντων με έλαση και εξώθηση.....	107
Εικόνα 51 : Έλαση διαμορφώσεως ελασμάτων κι διατομών.....	108
Εικόνα 52: Αριστερά : δομικά μέρη ελάστρου. Δεξιά : Τύποι ράουλων: (α) Κοινό ράουλο, (β) ράουλο μορφής 1: Άξονας έδρασης, 2: Κύριο σώμα ραούλου, 3: Άκρο σύνδεσης.....	109
Εικόνα 53 : Αξονικό σύστημα ελάστρου.....	110
Εικόνα 54 : Τύποι ελάστρων: (α) 2-ραούλων, (β) 2-ράουλων με αναστρεφόμενη κίνηση, (γ) 3-ράουλων, (δ) 4-ράουλων, (ε) τύπου Cluster ή Sendzimir.....	110
Εικόνα 55 : Εγκατάσταση ελάστρου Sendzimir.....	111
Εικόνα 56 : Διάταξη έλασης σε σειρά.....	111
Εικόνα 57 : Έλαστρο με πλανητικά ράουλα.....	112
Εικόνα 58 : Έλαση.....	113
Εικόνα 59 : Ουδέτερο σημείο έλασης.....	114
Εικόνα 60 : πλάτυνση τεμαχίων κατά την έλαση.....	115
Εικόνα 61 : Μείωση πλάτυνσης κατά την έλαση.....	115
Εικόνα 62 : Δομή κόκκων στην έλαση.....	116
Εικόνα 63 : Σύγκριση δομής κόκκων κοχλία προερχόμενου από έλαση και κοπή.....	117
Εικόνα 64 : Παραμόρφωση ραούλων στην έλαση.....	118
Εικόνα 65 : Ράουλα με αντιστάθμιση camber.....	119
Εικόνα 66 : Ελαττώματα κατά την έλαση.....	120
Εικόνα 67 : Διαχωρισμός του ελάσματος.....	121
Εικόνα 68 : Κατανομή της πίεσης στην πλαστική ζώνη.....	123
Εικόνα 69 : Πειραματική διάταξη.....	130
Εικόνα 70 : Το εσωτερικό του φούρνου.....	131
Εικόνα 71 : Αφαίρεση οξειδίων.....	132



Εικόνα 72 : Η θερμοκρασία του φούρνου.....	132
Εικόνα 73 : Το μεταλλικό καλούπι.....	133
Εικόνα 75 : Αφαίρεση του χυτευμένου τεμαχίου.....	133
Εικόνα 76 : Τεμάχια που λαμβάνονται.....	134
Εικόνα 77 : Κοπή τεμαχίων στον τροχό.....	135
Εικόνα 78 : Γραμμές του κοπτικού τροχού.....	136
Εικόνα 79 : Λειαντικά χαρτιά.....	136
Εικόνα 80 : Λείανση με χαρτί 500.....	137
Εικόνα 81 : τελική μορφή τεμαχίων.....	138
Εικόνα 82 : Μέτρηση ράουλου.....	139
Εικόνα 83 : Εισαγωγή του δοκιμίου στο έλαστρο.....	140
Εικόνα 84 : Τα δοκίμια μετά την έλαση.....	140
Εικόνα 85 : Τα δοκίμια μετά την έλαση (πλάι).....	141
Εικόνα 86 : Η μηχανή μέτρησης σκληρότητας.....	141
Εικόνα 87 : Μήκη δοκιμίων μετά την έλαση.....	143
Εικόνα 88 : Διάταξη φούρνου στην χύτευση.....	144
Εικόνα 89 : Μέτρηση θερμοκρασίας.....	144
Εικόνα 90 : τεμάχια μετά την χύτευση.....	145
Εικόνα 91 : Κοπή τεμαχίων στον τροχό.....	145
Εικόνα 92 : κοπή τεμαχίων στην φρέζα.....	146
Εικόνα 93 : Ποιότητα επιφάνειας που επιτυγχάνεται με την λείανση (δεξιά) Ποιότητα επιφάνειας πριν (αριστερά).....	146
Εικόνα 94 : Μορφή δοκιμίων μετά την έλαση.....	147
Εικόνα 95 : Μήκη δοκιμίων μετά την έλαση.....	148
Εικόνα 96 : Μέτρα ασφαλείας κατά την χύτευση.....	152
Εικόνα 97 : Οι νανοδομές.....	153
Εικόνα 98 : Ζύγισμα των κυαθίων.....	153
Εικόνα 99 : Ζύγισμα του γραφενίου.....	154
Εικόνα 100 : Σε κάθε κυάθιο αντιστοιχεί συγκεκριμένη ποσότητα γραφενίου....	154
Εικόνα 101 : Χύτευση του τήγματος αλουμινίου-γραφενίου.....	155
Εικόνα 102 : Τα χυτευμένα 0,1% σε γραφένιο.....	156
Εικόνα 103 : Η πριονοκορδέλα και ο τρόπος συγκράτησης ορισμένων δοκιμίων με μικρό πάχος.....	157
Εικόνα 104 : Η σταδιακή βελτίωση της επιφάνειας κατά την λείανση.....	158
Εικόνα 105 : Αφαίρεση μεγάλου πάχους με λείανση.....	159
Εικόνα 106 : Έλεγχος πάχους κατά την λείανση.....	159
Εικόνα 107 : Η τελική μορφή των δοκιμίων πριν την έλαση (0,1%).....	160
Εικόνα 108 : Η τελική μορφή των δοκιμίων πριν την έλαση (0,2%).....	160
Εικόνα 109 : Η ομοιομορφία του πάχους των δοκιμίων.....	160
Εικόνα 110 : Η τελική μορφή των δοκιμίων πριν την έλαση (0,3%).....	161
Εικόνα 111 : Τα δοκίμια σε όλα τα ποσοστά γραφενίου είναι έτοιμα για έλαση.....	161



Εικόνα 112 : Διάταξη της έλασης.....	163
Εικόνα 113 : Μορφή δοκιμίων μετά την έλαση.....	164
Εικόνα 114 : Φορτία έλασης.....	164
Εικόνα 115 : Ρωγμές σε μερικά από τα δοκίμια αλουμινίου-γραφηνίου.....	165
Εικόνα 116 : Μέτρηση διαγωνίων.....	166
Εικόνα 117 : Σημεία επιλογής φορτίων.....	167
Εικόνα 118 : Τα δοκίμια που επιλέχθηκαν.....	178
Εικόνα 119 : Ο δισκοτόμος.....	179
Εικόνα 120 : Η πρώτη κοπή.....	179
Εικόνα 121 : Η δεύτερη κοπή και τα τελικά επιθυμητά κομμάτια.....	179
Εικόνα 122 : Η τοποθέτηση γίνεται με συγκεκριμένη σειρά.....	180
Εικόνα 123 : Ανάμειξη της ρητίνης.....	180
Εικόνα 124 : Τα δοκίμια μετά τον εγκυβωτισμό.....	181
Εικόνα 125 : Εικόνα δομικών μετά το κάθε λειαντικό χαρτί (με την σειρά που αναγράφονται παραπάνω.....	181
Εικόνα 126 : Η αλουμίνα που χρησιμοποιείται.....	182
Εικόνα 127 : Προετοιμασία δοκιμίου.....	183
Εικόνα 128 : παρατήρηση στο μικροσκόπιο.....	183
Εικόνα 129 : 1ο πάσο (x50), δοκίμιο αναφοράς.....	184
Εικόνα 130 : 5ο πάσο (x50), δοκίμιο αναφοράς.....	185
Εικόνα 131 : 10ο πάσο (x50), δοκίμιο αναφοράς.....	185
Εικόνα 132 : 1ο πάσο (x100), δοκίμιο 0,1% GNPs.....	186
Εικόνα 133 : 5ο πάσο (x100), δοκίμιο 0,1% GNPs.....	186
Εικόνα 134 : 5ο πάσο (x50), δοκίμιο 0,2% GNPs.....	187
Εικόνα 135 : 10ο πάσο (x50), δοκίμιο 0,2% GNPs.....	187
Εικόνα 136 : 1ο πάσο (x50), δοκίμιο 0,3% GNPs.....	188
Εικόνα 137 : 10ο πάσο (x50), δοκίμιο 0,3% GNPs.....	188



Περιεχόμενα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 : Φορτίο αλουμινίου αναφοράς.....	149
Διάγραμμα 2 : Σκληρότητα αλουμινίου αναφοράς.....	150
Διάγραμμα 3 : Μήκος για όλα τα ποσοστά.....	168
Διάγραμμα 4 : Παραμόρφωση κατά το μήκος για όλα τα ποσοστά.....	168
Διάγραμμα 5 : Πάχος για όλα τα ποσοστά.....	169
Διάγραμμα 6 : Παραμόρφωση κατά το πάχος για όλα τα ποσοστά.....	169
Διάγραμμα 7 : Πλάτος για όλα τα ποσοστά.....	170
Διάγραμμα 8 Παραμόρφωση κατά το πλάτος για όλα τα ποσοστά.....	170
Διάγραμμα 9 : Σκληρότητα ανά αριθμό πάσων για όλα τα ποσοστά.....	171
Διάγραμμα 10 : Φορτία όλων των ποσοστών.....	172
Διάγραμμα 11 : Πάσο 1.....	173
Διάγραμμα 12 : Πάσο 2.....	173
Διάγραμμα 13 : Πάσο 3.....	174
Διάγραμμα 14 : Πάσο 4.....	174
Διάγραμμα 15 : Πάσο 5.....	175
Διάγραμμα 16 : Πάσο 6.....	175
Διάγραμμα 17 : Πάσο 7.....	176
Διάγραμμα 18 : Πάσο 8.....	176
Διάγραμμα 19 : Πάσο 9.....	177
Διάγραμμα 20 : Πάσο 10.....	177



Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1 : Η άνοδος της κατανάλωσης αλουμινίου και η μείωση του χαλκού.....	18
Πίνακας 2 : Ιδιότητες καθαρού αλουμινίου.....	20
Πίνακας 3 : Κράματα για μηχανική διαμόρφωση.....	23
Πίνακας 4 : Κράματα για χυτήρια.....	24
Πίνακας 5 : Εφαρμογές προϊόντων αλουμινίου και κράματα.....	25
Πίνακας 6 : Παραδείγματα κοκκόδων συνθέτων.....	58
Πίνακας 7 : Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεταλλικών ινών.....	61
Πίνακας 8 : Εφαρμογές ινών.....	62
Πίνακας 9 : Εφαρμογές ινών.....	62
Πίνακας 10 : Εφαρμογές ινών.....	63
Πίνακας 11 : Σύγκριση εύροιας μετάλλων.....	74
Πίνακας 12 : Στοιχειομετρική ανάλυση χρησιμοποιούμενου αλουμινίου.....	126
Πίνακας 13 : Μέγιστη επιτρεπτή μείωση ανά πάσο.....	127
Πίνακας 14 : Μείωση ανά πάσο.....	128
Πίνακας 15 : Μείωση ανά πάσο.....	128
Πίνακας 16 : Μείωση ανά πάσο.....	128
Πίνακας 17 Μέγιστη επιτρεπτή μείωση ανά πάσο.....	129
Πίνακας 18 ; Μείωση ανά πάσο.....	129
Πίνακας 19 : Χαρακτηριστικά φούρνου.....	130
Πίνακας 20 : Χαρακτηριστικά κοπτικού τροχού.....	135
Πίνακας 21 : Χαρακτηριστικά μηχανής σκληρομέτρησης.....	142
Πίνακας 22 : Πάχος δοκιμίων.....	156
Πίνακας 23 : Χαρακτηριστικά προιονοκορδέλλας.....	157
Πίνακας 24: Αντιδραστήριο Kellers.....	182



1. Θεωρητικό μέρος

1.1. Το αλουμίνιο

1.1.1. Ιστορία του αλουμινίου

Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί μέταλλα εδώ και περίπου 7 χιλιάδες χρόνια. Τα 200 χρόνια από την βιομηχανική επανάσταση και τα περίπου 100 από την βιομηχανική παραγωγή του αλουμινίου, μοιάζουν σαν ένας κόκκος άμμου στην κλεψύδρα της ιστορίας. Σε αντίθεση με τον χαλκό, τον χρυσό και τον σίδηρο, το αλουμίνιο δεν υπάρχει στην φύση σε απλές χημικές ενώσεις εύκολα διασπάσιμες, έτσι η απομόνωση του μετάλλου αυτού καθυστέρησε ιδιαίτερα. Η ανακάλυψή του αλλά και η παραγωγή του, έγινε δυνατή μόνον μετά την ανακάλυψη και ευρεία χρήση του ηλεκτρισμού και μόνον όταν η χημεία αποχωρίστηκε από το φάντασμα της αλχημείας. Πρίν από 135 χρόνια, ο Ιούλιος Βερν, γράφοντας το "Από τη Γη στη Σελήνη" είχε χαρακτηρίσει το αλουμίνιο: "Ασπρο σαν το ασήμι και ελαφρό σαν το γυαλί...". Στη στροφή της 3ης χιλιετίας, το αλουμίνιο συμπληρώνει πραγματική ζωή 160 ετών περίπου, ενώ βρίσκεται σε βιομηχανική κλίμακα παραγωγής για περίπου 100 χρόνια.

Αν και το αλουμίνιο δεν έγινε γνωστό παρά μόνο στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, παρόλα αυτά χρησιμοποιήθηκε από την αρχαιότητα με την μορφή του αργίλου σαν πρώτη ύλη για την κατασκευή αγγείων, άλατα περιέχοντα αλουμίνιο για βαφές και φαρμακευτικά παρασκευάσματα. Οι αρχαίοι Κινέζοι, οι Αιγύπτιοι, οι Έλληνες και οι Ρωμαίοι, χρησιμοποίησαν το αλουμίνιο στις φυσικές του ενώσεις χωρίς κατά πάσα πιθανότητα να έχουν πλήρη γνώση της ύπαρξης ενός μετάλλου που έδινε τις ειδικές αυτές ιδιότητες στις δημιουργίες τους.

Ως χημικό στοιχείο το αργίλιο, είναι το 3^ο σε περιεκτικότητα στο γήινο περιβάλλον μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Πώς εξηγείται όμως το γεγονός της τόσο όψιμης ανακάλυψής του; Η απάντηση βρίσκεται στη μεγάλη χημική του συνάφεια με άλλα στοιχεία. Έτσι, το αλουμίνιο υπάρχει σχεδόν παντού στη φύση, αλλά καλά "κλειδωμένο" σε χημικές ενώσεις μεγάλης χημικής ευστάθειας. Η χρήση του ωστόσο (σε κάποιες μορφές ενώσεων του), είναι ιστορικά τεκμηριωμένη στην Αίγυπτο και τη Βαβυλώνα. Έπρεπε να φτάσει το 1761 για να προταθεί πρώτη φορά στην Ιστορία το όνομα "alume" από τον de Morveau, ως η βάση του "alum", δηλαδή του μετάλλου που δεν υπήρχε ακόμη στην καθαρή του μορφή. Αργότερα, το 1807, ο Sir Humphrey Davy πρότεινε το όνομα "aluminium" για το μέταλλο, αν και λίγο αργότερα συμφώνησε με το όνομα "aluminum", όρος που χρησιμοποιείται και σήμερα ακόμα για το αλουμίνιο στην βόρεια Αμερική. Πρώτος ο Βρετανός Davy, υποστήριξε την ύπαρξη του αλουμινίου το 1807, ενώ ο Δανός Oersted κατάφερε να απομονώσει το αλουμίνιο στοιχειακά. Το 1845, ο Γερμανός Woehler υπολόγισε το ειδικό βάρος του αλουμινίου αποδεικνύοντας και επιδεικνύοντας ταυτόχρονα μία από τις σπουδαιότερες ιδιότητες του: την "αβάσταχτη" ελαφρότητα. Ανάμεσα στα 1855 και το 1886, ο Γάλλος Deville παρουσίασε την πρώτη χημική μέθοδο παραγωγής αλουμινίου, πολύ ακριβή ακόμη για βιομηχανοποίηση. Το



γύρισμα της μοίρας έγινε το 1886, με την ταυτόχρονη ανακάλυψη σε Αμερική και Γαλλία της ηλεκτρολυτικής μεθόδου παραγωγής μετάλλου από το οξείδιο του αλουμινίου (την αλουμίνα). Ο Αμερικανός Hall και ο Γάλλος Heroult χάραξαν το δρόμο που αργότερα μετέτρεψε σε λεωφόρο ο Γερμανός Bayer το 1888, εξελίσσοντας την οικονομική μέθοδο παραγωγής αλουμίνας από το βωξίτη. Σε μία νύχτα η τιμή του μετάλλου έπεσε από τα 18 \$ στα 4,50 \$. Ξεκίνησε η βιομηχανική ιστορία του αλουμινίου.

Στον μεσαίωνα οι επιστήμονες - αλχημιστές της εποχής, υποπτεύθηκαν την ύπαρξη ενός μετάλλου στον κοινό και τόσο φτηνό άργιλο, που θα τους έδινε την πολυπόθητη λύση δημιουργίας χρυσού με την μετάλλαξή του.

Λίγο αργότερα το όνομα "aluminium" (αλουμίνιο) καθιερώθηκε για να μην διαφέρει το όνομα του νέου μετάλλου από τα άλλα καθιερωμένα ονόματα των φυσικών στοιχείων που έχουν κατάληξη σε "-ium". Η διεθνής, λοιπόν, χημική ονομασία του νέου μετάλλου είναι "αλουμίνιο" μέχρι και τις μέρες μας. Το ίδιο ίσχυσε και στις ΗΠΑ μέχρι το 1925, όταν η Αμερικανική Εταιρία Χημείας αποφάσισε να αλλάξει το όνομα ξανά σε "aluminum", έτσι ακόμα και σήμερα οι Αμερικάνοι χρησιμοποιούν αυτή την ονομασία, σε αντίθεση με τον υπόλοιπο κόσμο.

Ας επιστρέψουμε, όμως, στην ιστορική μας διαδρομή. Ο Hans Christian Oersted ήταν ο πρώτος επιστήμονας που παρήγαγε καθαρό αλουμίνιο το 1825, με την χρήση χλωριδίου του αλουμινίου ($AlCl_3$) και αμάλαμα ποτάσας, ένα κράμα δηλαδή ποτάσας και ψευδαργύρου. Ο Oersted ανεβάζοντας την θερμοκρασία του μίγματος, σε κατάσταση χαμηλής πίεσης πέτυχε την απομάκρυνση του ψευδαργύρου, το εναπομείναν δε υλικό ήταν το αλουμίνιο. Έτσι γεννήθηκε το μέταλλο που άλλαξε την ιστορία και οδήγησε τον άνθρωπο στο φεγγάρι, δίνοντάς του παράλληλα την δυνατότητα να μπορεί να εκσφενδονίζει πυραύλους μαζικής καταστροφής κατά του εαυτού του [1].

1.1.2. Το Υλικό του 21ου αιώνα

Οι χημικές και φυσικές ιδιότητες του αλουμινίου το καθιστούν μία από τις πλέον χρήσιμες βιομηχανικές πρώτες ύλες, που χαρακτήρισαν μεγάλα βήματα της ανθρωπότητας το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, όπως η κατάκτηση του διαστήματος.

Το αλουμίνιο ή αργίλιο είναι το τρίτο κατά σειρά στοιχείο μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο που συναντάται στο φλοιό της γης. Σε αντίθεση με τον χαλκό, τον χρυσό και τον σίδηρο το αλουμίνιο δεν υπάρχει στην φύση σε απλές χημικές ενώσεις εύκολα διασπάσιμες, έτσι η απομόνωση του μετάλλου αυτού καθυστέρησε ιδιαίτερα. Η ανακάλυψη του, αλλά και η παραγωγή του έγινε δυνατή μόνον μετά την ανακάλυψη και ευρεία χρήση του ηλεκτρισμού και όταν η χημεία αποχωρίστηκε από το φάντασμα της αλχημείας

Το αλουμίνιο προέρχεται από το ορυκτό βωξίτης, που μετά την εξόρυξη του μετατρέπεται σε αλουμίνα και στη συνέχεια με τα ηλεκτρόλυση μετατρέπεται σε μέταλλο



αλουμίνιο .Η σημερινή υψηλή τεχνολογία και οι ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του, εξηγούν το σημερινό ευρύ φάσμα εφαρμογών του.

Το αλουμίνιο μεταποιείται με διέλαση, με έλαση, με χύτευση, με μηχανουργικά εργαλεία για την παραγωγή προϊόντων η τμημάτων διαφόρων προϊόντων, οπότε και τα αποκαλούμε ημι-προϊόντα για χρήση σε μηχανολογικές και ηλεκτρικές εφαρμογές.

Η χρήση του αλουμινίου και των κραμάτων του εξασφαλίζουν σε κάθε περίπτωση πολύ μεγάλη μηχανική αντοχή του σε σχέση με το βάρος του, καθιστούν το αλουμίνιο ένα ιδανικό υλικό για την κατασκευή μεταφορικών μέσων λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται.

Το αλουμίνιο ως υλικό συσκευασίας δεν είναι τοξικό, είναι αδιαπέραστο από υγρά και αέρια και εξασφαλίζει την υγιεινή των τροφίμων όταν και όπου χρησιμοποιείται για την συσκευασία τους. Στην οικοδομή αποτελεί ένα από τα βασικά υλικά. Είναι αδιάβρωτο από καιρικούς παράγοντες και δίνει μοναδικές λύσεις στην κατασκευή μοντέρνων κτιρίων, στην ανακατασκευή, την ανακαίνιση ή συντήρηση παλαιών κτιρίων με ιστορική και αρχιτεκτονική αξία [3].

1.1.3. Αλουμίνιο και βιομηχανία

Το αλουμίνιο άρχισε να δημιουργεί την δική του αγορά καθώς η παραγωγή του στις αρχές του αιώνα έβγαλε το μέταλλο αυτό από τους πίνακες των πολυτίμων μετάλλων. Τότε, λοιπόν, στις αρχές του αιώνα η παραγωγή έφτασε σε μερικούς χιλιάδες τόνους, δικαιώνοντας την «προφητεία» του Ιουλίου Βερν, "Από την Γη στη Σελήνη" .

Οι πρώτες χρήσεις του αλουμινίου σε βιομηχανικές εφαρμογές ξεκίνησαν:

- 1908, με την παραγωγή καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης
- 1910, με την παραγωγή καλωδίων για χρήση σε υπόγειες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρική ενέργειας, μονωμένες με μολύβι και χαρτί. Χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στην Βοστώνη.
- 1912, με την παραγωγή κουπαστών εσωτερικών χώρων από αλουμίνιο για το επιβατικό πλοίο AQUITANA
- 1917, με την παραγωγή καλωδίου για μετασχηματιστές ηλεκτρικής ενέργειας.
- 1920, με την παραγωγή μηχανικών μερών για μηχανές.

Η πρώτη μονάδα παραγωγής πρωτόχυτου αλουμινίου σε βιομηχανικές ποσότητες δημιουργήθηκε στον Καναδά από την Northern Aluminium Company, που αργότερα έγινε η γνωστή σε όλους Alcoa. Η μονάδα παρήγαγε έναν τόνο αλουμινίου την ημέρα από το 1901, όταν ξεκίνησε παραγωγή. Η πατρίδα της πρώτης αυτή μονάδας ήταν το Shawinigan Falls Quibec, κοντά στον ποταμό Saint Maurice, ιδανική τοποθεσία για την

παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Το 1925, καθώς η ζήτηση για αλουμίνιο αυξάνονταν, η Alcan αύξησε την παραγωγή της κατασκευάζοντας νέα μονάδα παραγωγής αλουμινίου και ηλεκτρικής ενέργειας στην πόλη Arvida της ίδιας Καναδικής πολιτείας.

Η ιστορία της Alcan ήταν παράλληλη με την ιστορία παραγωγής πρωτόχυτου αλουμινίου στις ΗΠΑ από την Alcoa και αργότερα από άλλες Ευρωπαϊκές εταιρίες. Η άνοδος της κατανάλωσης αλουμινίου σήμανε την μείωση κατανάλωσης χαλκού, όπως φαίνεται και στον επόμενο πίνακα :

Year	Copper	Aluminium	Cu/Al Ratio	Year	Copper	Aluminium	Cu/Al Ratio
1978	710	610	1,16	1988	1500	1450	1,03
1979	1040	785	1,32	1989	1750	1290	1,35
1980	930	845	1,10	1990	1500	900	1,66
1981	800	650	1,23	1991	1350	700	1,92
1982	800	585	1,36	1992	1300	710	1,83
1983	1100	900	1,22	1993	1250	675	1,85
1984	1180	970	1,21	1994	1485	950	1.56
1985	1080	690	1,56	1995	1860	1150	1.61
1986	935	785	1,19	1996	1475	970	1,52
1987	1050	1000	1,05	1997	1395	980	1,42

Πίνακας 1 : Η άνοδος της κατανάλωσης αλουμινίου και η μείωση του χαλκού

1.1.4. Ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου και των κραμάτων του

Όπως συμβαίνει και στα περισσότερα μαλακά μέταλλα, το αλουμίνιο κρυσταλλώνεται με την κυβική διάταξη των ατόμων. Αυτό σημαίνει ότι τα άτομα του αλουμινίου σχηματίζουν τις γωνίες ενός κύβου με ένα άτομο στο κέντρο της κάθε έδρας με μήκος ακμής κύβου στα $4,049 \times 10^{-8}$ cm και κοντινότερη απόσταση μεταξύ δύο ατόμων στην κρυσταλλική δομή $2 \times 4,049 \times 10^{-8}$ cm.



Εικόνα 1 : Κρυσταλλική δομή αλουμινίου



Το έχουν ονομάσει «μαγικό» μέταλλο, «θαυματοουργό» μέταλλο εξ αιτίας των χημικών και φυσικών ιδιοτήτων του αλλά και του τεράστιου εύρους των μηχανικών χαρακτηριστικών που είναι εφικτά με τα σύγχρονα κράματα αλουμινίου. Μέταλλο με εξαιρετικά μεγάλο εύρος δυνατοτήτων, ιδιοτήτων, φυσικών χημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών που επιδεικνύονται μέσα από μεγάλο αριθμό κραμάτων.

Συνοπτικά το αλουμίνιο :

- Έχει χαμηλό ειδικό βάρος. Μόλις το 1/3 εκείνου του σιδήρου.
- Διαμορφώνεται, ελάσσεται, εξελάσσεται, διελάσσεται και συγκολλείται με ευκολία συνεπώς είναι ιδανικό μέταλλο κατασκευών. Το μέτρο ελαστικότητας του (70.000 Μρα) είναι 3 φορές χαμηλότερο από εκείνο του σιδήρου. Σε δεδομένη κατάσταση φόρτισης, μία κατασκευή από αλουμίνιο παρουσιάζει 3 φορές μεγαλύτερη ελαστική επιμήκυνση απ' ό,τι μία σιδερένια.
- Το αλουμίνιο και τα περισσότερα κράματά του είναι ανθεκτικό έως πολύ ανθεκτικό σε πολλές μορφές διάβρωσης. Λόγω της μεγάλης χημικής συνάφειας με το οξυγόνο, η φυσική επιφάνεια του μετάλλου είναι μόνιμα καλυμμένη με στρώμα οξειδίου του αργιλίου, που αποτελεί ένα πολύ αποτελεσματικό εμπόδιο εξάπλωσης της διάβρωσης. Αυτή είναι η ιδιότητα που το κάνει τόσο δημοφιλές στη Δόμηση, στη Ναυπηγική και στη βιομηχανία κατασκευής μεταφορικών μέσων (Αυτοκίνητα, Τραίνα, Αεροπλάνα). Το μειωμένο έως μηδενικό κόστος συντηρήσεως σε συνδυασμό με το χαμηλό ειδικό βάρος επηρεάζουν θετικά την επιλογή του αλουμινίου. Το αλουμίνιο είναι πολύ καλός αγωγός της θερμότητας και του ηλεκτρισμού .
- Δε μαγνητίζεται και δεν καίγεται, ιδιότητες που θεωρούνται πολύ ουσιώδεις για ειδικές εφαρμογές, όπως τεχνολογία ηλεκτρονικών και κατασκευές θαλάσσης (πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου).
- Δεν είναι τοξικό σε επαφή με τρόφιμα (λογικού εύρους δείκτη οξύτητας) ενώ ως φιλμ προστασίας επιδεικνύει πολύ χαμηλή διαπερατότητα, ιδιότητες που το καθιέρωσαν βασική πρώτη ύλη για τις συσκευασίες τροφίμων και ειδικότερα τις εύκαμπτες συσκευασίες πολλαπλών στρώσεων (πχ πολυεστέρας, αλουμίνιο, πολυαιθυλένιο).
- Υψηλή διάχυτη ανακλαστικότητα (albedo) και χαμηλό συντελεστή δευτερογενούς θερμικής εκπομπής. Οι 2 αυτές ιδιότητες το καθιστούν απαραίτητο ως εξωτερικό «κρύο» φλοιό για τα νέα κτήρια του τριτογενούς τομέα (κτήρια γραφείων, δημόσια κτήρια γενικά, βιομηχανικά κτήρια) καθώς και σε ενεργειακές ανατάξεις παλαιών «ενεργοβόρων» κτηρίων.

Το αλουμίνιο διατίθεται σε μεγάλη ποικιλία κραμάτων. Η επιλογή του κατάλληλου κράματος γίνεται ανάλογα με την χρήση του τελικού προϊόντος και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις, καθώς και από την μέθοδο της παραγωγικής επεξεργασίας. Η δυνατότητα που έχει το αλουμίνιο, να επιτυγχάνει διαφορετικές ιδιότητες προκειμένου να καλύψει τις



ειδικές απαιτήσεις κάθε προϊόντος, οφείλεται στο γεγονός της εύκολης κραματοποίησής του. Με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων κραματοποιών (χημικών) στοιχείων (π.χ. χαλκός, μαγνήσιο, πυρίτιο, μαγγάνιο, ψευδάργυρος κλπ), μπορούμε να επιτύχουμε πρώτη ύλη αλουμινίου με τις επιθυμητές και κατάλληλες ιδιότητες για κάθε τύπο προϊόντος.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ		
	Στοιχεία	Μονάδα μέτρησης
Ατομικό βάρος	26,98	
Πυκνότητα (20 °C)	2,6898	gr/cm ³
Σημείο Τήξης	660,2	°C
Γραμμική διαστολή (0-100 °C)	23,5X10 ⁻⁶	(m/m)/°C
Ηλεκτρική Αντίσταση (20 °C)	2,69	μΩcm
Μέτρο Ελαστικότητας €	68,3	Gpa
Μέτρο Στρέψης (G)	25,5	Gpa
Συντελεστής Poisson	0,34	

Πίνακας 2 : Ιδιότητες καθαρού αλουμινίου

Οι τελικές ιδιότητες κάθε προϊόντος που θα παραχθεί από αλουμίνιο, επιτυγχάνονται με την επιλογή του κατάλληλου κράματος αλουμινίου, την μέθοδο επεξεργασίας του (μηχανική πλαστική διαμόρφωση ή χύτευση) και τις θερμικές κατεργασίες (βαφή, τεχνητή γήρανση, ανόπτηση κλπ) που θα υποστεί.

Το αλουμίνιο και τα κράματά του, (είτε πρωτόχυτο είτε δευτερόχυτο), διαιρούνται σε δύο κύριες κατηγορίες :

- [1] Αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου για χρήση σε χυτήρια (παραγωγή χυτών αντικειμένων).
- [2] Αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου για μηχανική μεταποίηση (παραγωγή προϊόντων έλασης, διέλασης, ολκής, κλπ).

Οι ιδιότητες των προϊόντων του αλουμινίου ή των κραμάτων του, εξαρτώνται τόσο από την κραματοποίηση όσο και από τις μηχανικές ή θερμικές κατεργασίες που θα υποστεί.



Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των τυπικών βιομηχανικών κραμάτων αλουμινίου είναι :

- Ο Χαλκός (Cu)
- Το Μαγγάνιο (Mn)
- Το Πυρίτιο (Si)
- Το Μαγνήσιο (Mg)
- Ψευδάργυρος (Zn)
- Σίδηρος (Fe)

Γενικά, για τη συνήθη παραγωγή των κραμάτων αλουμινίου, ακολουθείται η μεθοδολογία της τήξης, της κραματοποίησης με προσθήκη στοιχείων, και της χύτευσης. [1-2]

1.1.5. Οι κατηγορίες των κραμάτων

Το αλουμίνιο και τα κράματά του που προορίζονται για μηχανική πλαστική διαμόρφωση (έλαση, διέλαση, ολκή, σφυρηλασία κλπ) προσδιορίζονται από το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 573 και από τη χημική τους σύσταση βάσει διεθνώς αποδεκτού συστήματος που χρησιμοποιεί τέσσερις αριθμούς. Το πρώτο από τα τέσσερα ψηφία δείχνει την ομάδα κράματος σύμφωνα με το, σε μεγαλύτερη αναλογία ευρισκόμενο, κραματοποιό στοιχείο. Τα κράματα για μηχανική επεξεργασία χωρίζονται σε θερμοσκληρυνόμενα και θερμοσκληρυνόμενα.

1.1.6. Κράματα θερμοσκληρυνόμενα

Τα κράματα αυτά αποκτούν τις μηχανικές αντοχές μετά από θερμική επεξεργασία.

- Σειρά 2000: κράματα αλουμινίου χαλκού Τα κράματα της σειράς αυτής αποκτούν μηχανικές αντοχές υψηλότερες από αυτές του μέσου χάλυβα. Χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις κατασκευών με απαίτηση υψηλές μηχανικές αντοχές. Κάτω από ειδικές συνθήκες παρουσιάζουν μια αυξημένη ευαισθησία στην ατμοσφαιρική διάβρωση, γι αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται ειδική μέριμνα προστασίας. Τα κράματα της σειράς αυτής μπορούν συγκολληθούν με ειδικές τεχνικές, μόνον όπως η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική, βιομηχανία όπλων κλπ. Χαρακτηριστικά κράματα 2017, 2024.
- Σειρά 6000: κράματα αλουμινίου – πυριτίου μαγνησίου Αποτελούν τα κράματα που κατά βάση χρησιμοποιούνται στην διέλαση για την παραγωγή προφίλ. Η ομάδα αυτή χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες. Στην κατηγορία των κραμάτων



που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο πυρίτιο και που σε συνδυασμό με το μαγγάνιο, χρώμιο και ψευδάργυρο εξασφαλίζουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Χαρακτηριστικά κράματα: 6061, 6082. Η άλλη κατηγορία αποτελείται από κράματα που περιέχουν μικρότερες ποσότητες μαγνησίου και πυριτίου και προσφέρουν μεγάλες ταχύτητες διέλασης, αλλά χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Παρουσιάζουν καλή διακοσμητική συμπεριφορά και έτσι χρησιμοποιούνται ευρέως σε αρχιτεκτονικές και διακοσμητικές εφαρμογές. Χαρακτηριστικά κράματα: 6060, 6063.

- Σειρά 7000: κράματα αλουμινίου ψευδαργύρου Ο ψευδάργυρος με το μαγνήσιο είναι τα κύρια κραματοποιά στοιχεία. Τα κράματα αυτά επιτυγχάνουν τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα αλουμινίου. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική βιομηχανία

1.1.7. Κράματα εργοσκληρυνόμενα

Τα κράματα αυτά αποκτούν τις μηχανικές αντοχές τους ανάλογα με το βαθμό της μηχανικής κατεργασίας που υφίστανται.

- Σειρά 1000: Καθαρό αλουμίνιο με 99,00% ελάχιστη καθαρότητα. Το καθαρό αλουμίνιο υποδιαιρείται σε κατηγορίες ανάλογα με την περιεκτικότητα σε αλουμίνιο. Το καθαρό αλουμίνιο χαρακτηρίζεται από την υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και εύκολη μορφοποίηση. Οι μηχανικές αντοχές είναι σχετικά χαμηλές.
- Σειρά 3000: κράματα αλουμινίου – μαγγανίου. Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων της σειράς αυτής είναι: η εύκολη μορφοποίηση, η καλή αντοχή στην ατμοσφαιρική διάβρωση και η ευκολία συγκόλλησης με τις συνήθεις μεθόδους. Χαρακτηριστικά κράματα το 3003 και 3004.
- Σειρά 4000: κράματα αλουμινίου – πυριτίου. Η παρουσία του πυριτίου ελαττώνει το σημείο τήξης των κραμάτων της κατηγορίας αυτής. Το γεγονός αυτό, καθιστά αυτά τα κράματα κατάλληλα για χρήση ως ηλεκτρόδια πλήρωσης σε εργασίες συγκόλλησης κομματιών αλουμινίου.
- Σειρά 5000: κράματα αλουμινίου – μαγνησίου. Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων αυτών είναι: πολύ καλή συγκολλητικότητα, πολύ καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες (κρυογενικά συστήματα), πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον, μεγάλες μηχανικές αντοχές. Χρησιμοποιείται ευρέως στη ναυπηγική, στη χημική βιομηχανία, στις οικοδομές, στα μεταφορικά μέσα, κλπ. Χαρακτηριστικά κράματα: 5005, 5052, 5754, 5083, 5086, 5182.



1.1.8. Τα κράματα του αλουμινίου και τα χαρακτηριστικά τους

Το αλουμίνιο έχει την δυνατότητα, με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων χημικών στοιχείων, να δημιουργεί συνθέσεις (κράματα) με διαφορετικές ιδιότητες. Η δυνατότητα αυτή, καθιστά το αλουμίνιο και τα κράματά του ως την πλέον κατάλληλη πρώτη ύλη για την παραγωγή τελικών προϊόντων με ξεχωριστές ιδιότητες και ειδικές απαιτήσεις.

Η δυνατότητα που έχει το αλουμίνιο, να επιτυγχάνει διαφορετικές ιδιότητες προκειμένου να καλύψει τις ειδικές απαιτήσεις κάθε προϊόντος, οφείλεται στο γεγονός της εύκολης κραματοποίησής του. Με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων κραματοποιών (χημικών) στοιχείων (π.χ. χαλκός, μαγνήσιο, πυρίτιο, μαγγάνιο, ψευδάργυρος κλπ), μπορούμε να επιτύχουμε πρώτη ύλη αλουμινίου με τις επιθυμητές και κατάλληλες ιδιότητες για κάθε τύπο προϊόντος. Οι τελικές ιδιότητες κάθε προϊόντος που θα παραχθεί από αλουμίνιο, επιτυγχάνονται με την επιλογή του κατάλληλου κράματος αλουμινίου, την μέθοδο επεξεργασίας του (μηχανική πλαστική διαμόρφωση ή χύτευση) και τις θερμικές κατεργασίες (βαφή, τεχνητή γήρανση, ανόπτηση κλπ) που θα υποστεί.

Στα παρακάτω αναφέρονται περιληπτικά οι κατηγορίες και οι συμβολισμοί για τα διάφορα κράματα αλουμινίου, οι θερμικές επεξεργασίες που συνήθως υποβάλλονται, καθώς και η επίδραση των διαφόρων κραματοποιών στοιχείων στις ιδιότητες.

ΚΡΑΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ					
	Κωδικός κράματος	Κύριο κραματοποιό στοιχείο	Σκλήρυνση με μηχανική επεξεργασία	Σκλήρυνση με θερμική επεξεργασία	
EN AW-	1XXX	Κανένα (min.99,00% Al)	X		Μη θερμο- σκληρυνόμενα
	3XXX	Mn	X		
	4XXX	Si	X		
	5XXX	Mg	X		
	2XXX	Cu	(X)	Xs	Θερμο- σκληρυνόμενα
	6XXX	Mg+Si	(X)	X	
	7XXX	Zn	(X)	X	



	8XXX	Άλλο	(X)	X	
Συμβολισμοί: EN : Ευρωπαϊκό πρότυπο, A : Αλουμίνιο, W : Μηχανική πλαστική διαμόρφωση					

Πίνακας 3 : Κράματα για μηχανική διαμόρφωση

1.1.9. Κράματα αλουμινίου για χυτήρια

Σύμφωνα με τα νέα εναρμονισμένα Ευρωπαϊκά Πρότυπα EN, τα κράματα αλουμινίου που προορίζονται για χρήση σε χυτήρια ή για την παραγωγή χυτών αντικειμένων, συμβολίζονται με πέντε αριθμητικά ψηφία.

Το πρώτο ψηφίο προσδιορίζει την ομάδα των κραμάτων βάσει του κυριότερου κραματοποιού στοιχείου. Το πέμπτο ψηφίο είναι πάντα 0. Του πενταψηφίου αυτού αριθμού προηγείται συμβολισμός που δείχνει την χρήση του κράματος [2].

ΚΡΑΜΑΤΑ ΓΙΑ ΧΥΤΗΡΙΑ			
	Τύπος κράματος	Κραματοποιό στοιχείο	Συμβολισμοί:
EN AB-	1XXX0	Κανένα (min 99,00% Al)	EN: Ευρωπαϊκό πρότυπο A: Αλουμίνιο B: Χελώνα C: Κράμα για χυτά M: Μητρικό κράμα
	2XXX0	Cu	
	4XXX0	Si	
EN AC-	5XXX0	Mg	
	7XXX0	Zn	
	8XXX0	Sn	
EN AM-	9XXX0	Μητρικά κράματα	

Πίνακας 4 : Κράματα για χυτήρια



1.1.10. Τομείς εφαρμογών-κράματα που χρησιμοποιούνται

Το αλουμίνιο διατίθεται σε μεγάλη ποικιλία κραμάτων για κάθε τομέα εφαρμογών. Η επιλογή του κατάλληλου κράματος γίνεται ανάλογα με την χρήση του τελικού προϊόντος και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις, καθώς και από την μέθοδο της παραγωγικής επεξεργασίας. Το αλουμίνιο και τα κράματά του (είτε πρωτόχυτο είτε δευτερόχυτο), διαιρούνται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου για χρήση σε χυτήρια (παραγωγή χυτών αντικειμένων).
- Αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου για μηχανική μεταποίηση (παραγωγή προϊόντων έλασης, διέλασης, ολκής, κλπ).

Οι μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων του αλουμινίου ή των κραμάτων του, εξαρτώνται τόσο από την κραματοποίηση, όσο και από τις μηχανικές ή θερμικές κατεργασίες που θα υποστεί. Παρακάτω παραθέτουμε πίνακα των κραμάτων που χρησιμοποιούνται για κάθε τομέα εφαρμογών.

1.1.11. Εφαρμογές προϊόντων αλουμινίου και κράματα

Τομείς εφαρμογών	Προϊόντα	Κράματα που χρησιμοποιούνται
Αεροπορική βιομηχανία	κατασκευές υψηλών αντοχών	2014 2014A 2017A 2024 7010 7075
	κατασκευές μέσης αντοχής	6061 6082
Αυτοκινητοβιομηχανία	σκελετοί με προφίλ	6005A 6060 6063 6082
	σφυρήλατα	2014 6082
	οροφές/σώμα	1200 3003 3103 5005
	ταμπέλες αριθμών κυκλοφορίας	1200
	δεξαμενές καυσίμων	5083 5251 5454
Οικοδομή	ψευδοοροφές	1050A 1200 3003 3103 5005 5005A 6060
	πόρτες / παράθυρα/ προσόψεις	6060 6063 6082
	σκάλες	6060 6063 6082



	πάνελς	1050A 1200 3003 3103 5005A 5052 5251 5754
	κάγκελα	6060 6061 6063 6082
	πύργοι/σκαλωσιές	5083 5086 6061 6082
Χημική βιομηχανία	δοχεία	1005 3003 3103 5005 5005A
	σωλήνες	1050A 1200 3003 3103 5005 5005A 5052 5154A 5251 5454 5754 6061 6082
	δοχεία πίεσης	5052 5083 5086 5154A 5251 5454 5754
	δεξαμενές	3003 3103 5083 5086 5154A 5454 5754
Ηλεκτρικές εφαρμογές	κεραίες/δορυφορικές	5251 6063 6082
	ψύκτρες	6060 6063
	κέλυφος κινητήρα	6060 6063 6082
	πυλώνες	5083 5454 6005A 6061 6082 7020
Γενικές κατασκευές	κατασκευές υψηλών αντοχών	2014 2014A 2017A 2024 7075
	υδραυλικά συστήματα	2017A 2024 6082 7075
	σωληνώσεις	1050A 3003 3103 5005 5005A 5052 5083 5086 5154 5251 5754 6005A 6061 6082
	πλατφόρμες	5083 5086 6005A 6082 7020
	πνευματικά συστήματα	6005A 6060 6063 6082
	δοχεία	1050A 5005A 5083 5086 5454 5754
	συγκολλημένες κατασκευές	5083 5086 5154A 5251 6060 6063 6082 7020
Οδοποιία	γέφυρες	6061 6082 7020



	πινακίδες	5005 5005A 5052 5251
	φωτιστικά	5251 6060 6061 6063 6082
Εξοπλισμός	συναρμολογούμενα συστήματα	6060 6063
	έπιπλα	5005 5005A 6005A 6060 6063
	συσκευές γραφείου	3003 3103 5154A 5754 6060 6063
Συνδέσεις	βίδες/παξιμάδια	2007 2011 2024 2030 6061 6082 7075
	πριτσίνια	2017A 2024 5052 5754 6061 6082 7075
Ναυπηγική	βάρκες/ σκάφη ανοικτής θαλάσσης	5005 5005A 5083 5086 5251 5454 5754 6005A 6061 6082
	κατάρτια	5454 6005A 6061 6082
Συσκευασία	σώμα κουτιών	5052
	καπάκια	1050A 3003 3103
	Foil	1050A 1200
Όργανα Σπορ	ποδήλατα	6082 7020
	σκι	7075
	ρακέτες τένις	7075

Πίνακας 5 : Εφαρμογές προϊόντων αλουμινίου και κράματα

Η χρήση προϊόντων από αλουμίνιο έχει σημαντική θετική οικολογική επίπτωση λόγω της σημαντικής εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνει.

Στην συσκευασία ποτών και αναψυκτικών, το χαμηλό βάρος των κουτιών αλουμινίου έναντι εναλλακτικών συσκευασιών (π.χ. ένα αλουμινένιο κουτάκι 330 cl ζυγίζει 15 g έναντι 38 g για ένα σιδερένιο) περιορίζει σημαντικά την ενέργεια που δαπανάται για την μεταφορά και διακίνηση των προϊόντων.

Στις μεταφορές το αλουμίνιο βρίσκει συνεχώς αυξανόμενη εφαρμογή στην κατασκευή τραίνων, αυτοκινήτων, φορτηγών, βυτιών και επιβατηγών πλοίων (π.χ. fast ferries) λόγω του συνδυασμού χαμηλού βάρους και στιβαρότητας κατασκευής που προσφέρει.



Ειδικά στην αυτοκινητοβιομηχανία η ελάττωση του βάρους συνεπάγεται μειωμένη κατανάλωση καυσίμου καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του αυτοκινήτου. Έτσι, για κάθε 100 κιλά που μειώνεται το βάρος ενός αυτοκινήτου μεσαίου κυβισμού λόγω χρήσης αλουμινίου αντί χάλυβα, προκύπτει μείωση εκπομπής καυσαερίων ποσότητας 2 τόννων για όλη τη διάρκεια ζωής του αυτοκινήτου, ενώ στον ίδιο χρόνο η αναμενόμενη οικονομία καυσίμου είναι 900 λίτρα βενζίνης.

Στην δόμηση η προσθήκη ενός εξωτερικού μανδύα από αλουμίνιο σε νέα ή υπάρχοντα κτίρια βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Ταυτόχρονα το αλουμίνιο αποτελεί ιδανικό υλικό για συστήματα σκιασμού κτιρίων και στήριξης φωτοβολταϊκών στοιχείων. Εάν λάβουμε υπόψη ότι ο οικιστικός και τριτογενής τομέας είναι υπεύθυνος για το 40% της ενέργειας που καταναλώνεται στην Ευρωπαϊκή Ένωση, είναι προφανές ότι η συνεισφορά του αλουμινίου στην επίτευξη των στόχων του Κυότο είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Η διάρκεια ζωής των κατασκευών από αλουμίνιο είναι σημαντικά μεγαλύτερη εκείνων από χάλυβα, για λόγους αντοχής στη διάβρωση, ενώ το κόστος συντήρησής τους είναι ελάχιστο. Η τεχνολογία των κραμάτων σε συνδυασμό με την ευκολία υποβιβασμού του πάχους με την έλαση, δίνει νέα διάσταση σε δυνατότητα οικονομίας μετάλλου στις κατασκευές (σκληρότερα κράματα - χαμηλότερο πάχος) [1].

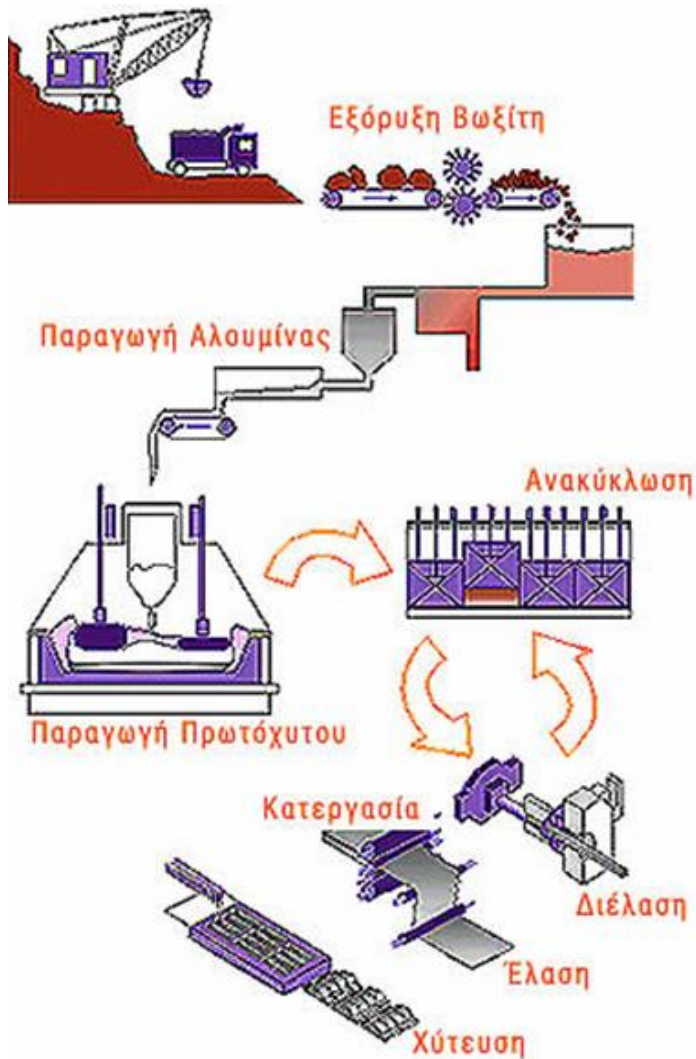
1.1.12. Πρωτογενές και δευτερόγενές αλουμίνιο

Το αλουμίνιο ή αργίλιο παρήχθη βιομηχανικά, για πρώτη φορά μόλις το 1886. Όπως περισσότερα μέταλλα, έτσι και αυτό βρίσκεται υπό τη μορφή ορυκτών. Από βιομηχανικής πλευράς το πλέον σημαντικό ορυκτό είναι ο βωξίτης, όπου το αργίλιο περιέχεται υπό την μορφή οξειδίων ή ένυδρων οξειδίων (αλουμίνα). Ο βωξίτης για να θεωρείται οικονομικά εκμεταλλεύσιμος πρέπει να έχει μία περιεκτικότητα μεγαλύτερη του 55% σε αλουμίνα (Al_2O_3). Το μέταλλο που παράγεται με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης της αλουμίνας, είτε σαν καθαρό αλουμίνιο είτε σαν κράμα αλουμινίου ονομάζεται Πρωτόχυτο Αλουμίνιο.



Εικόνα 2 : τήγμα αλουμινίου σε ένα στάδιο παραγωγής

Μία άλλη πηγή αλουμινίου, πολύ σημαντική από ενεργειακής άποψης, είναι η επανάτηση και επαναχύτευση κομματιών που ήδη έχουν χρησιμοποιηθεί (scrap). Το scrap προέρχεται είτε από συλλογή διαφόρων κομματιών αλουμινίου που η χρήση τους έχει πάψει, όπως κάρτερ αυτοκινήτων, παλιά παράθυρα ή πόρτες, κουτιά μπίρας και αναψυκτικών κ.λ.π. (OLD SCRAP), είτε από τα αποκόμματα που δημιουργούνται κατά την επεξεργασία του αλουμινίου για την παραγωγή προϊόντων (NEW SCRAP). Το αλουμίνιο που παράγεται από την επανάτηση του ονομάζεται Δευτερόχυτο Αλουμίνιο. Το δευτερόχυτο αλουμίνιο, αν ακολουθηθεί ο σωστός τρόπος παραγωγικής διαδικασίας έχει τις ίδιες ιδιότητες και χαρακτηριστικά με αυτά του πρωτόχυτου αλουμινίου.



Εικόνα 3 : διαδικασία παραγωγής πρωτόχυτου αλουμινίου

Στην παραπάνω εικόνα (εικόνα 3) φαίνεται ο κύκλος ζωής του αλουμινίου. Η βιομηχανική παραγωγή αλουμινίου βασίζεται στην τεχνολογία της ηλεκτρόλυσης σε λεκάνες όπου η αλουμίνα, παράγωγο του βωξίτη διαπερνάται από ηλεκτρικό ρεύμα σε μπάνιο κρυσλίθου. Το σχετικά υψηλό κόστος παραγωγής αλουμινίου οφείλεται κυρίως στην μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος [3].

1.1.13. Αλουμίνιο και βιώσιμη ανάπτυξη

Το αλουμίνιο δίκαια χαρακτηρίζεται σαν το "πράσινο" μέταλλο που ικανοποιεί ταυτόχρονα τις τεχνολογικές αλλά και οικολογικές απαιτήσεις σαν ένα σύγχρονο υλικό. Το βαρύ περιβαλλοντικό κόστος που επισύρει η ανεξέλεγκτη τεχνολογική ανάπτυξη, με αποκορύφωμα το φαινόμενο του θερμοκηπίου, απαιτεί λύσεις που να εξασφαλίζουν τη βιωσιμότητα του πλανήτη μας. Η διεθνής παραγωγή αλουμινίου είναι από τους



Βασικούς πρωταγωνιστές στην προσπάθεια για την εξεύρεση αειφόρων λύσεων. Πρακτικά αυτό μεταφράζεται σε συνεχή προσπάθεια για:

- μείωση ενέργειας στην παραγωγική διεργασία
- περιορισμό και έλεγχο εκπομπών ρύπων
- βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος

Η ανακύκλωση του αλουμινίου είναι το σημαντικότερο μέσο για την οικονομία ενέργειας και τη μείωση εκπομπών αερίων που επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα με το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

1.1.14. Πρακτική ανακύκλωσης

Η ανακύκλωση σαν εφαρμοσμένη βιομηχανική μέθοδος παραγωγής αλουμινίου, έχει ιστορία ζωής στην Ευρώπη από το 1920 περίπου.

Το scrap που προκύπτει κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας στα εργοστάσια παραγωγής, ανακυκλώνεται αμέσως εντός του εργοστασίου.

Από την άλλη, οι κάθε είδους κατασκευές και προϊόντα αλουμινίου μπορούν να ανακυκλωθούν μετά το τέλος της χρήσης τους.

Αυτό βέβαια προϋποθέτει την περισυλλογή, τον κραματικό διαχωρισμό και την ανακύκλωσή τους. Εκτεταμένα δίκτυα περισυλλογής, διαχωρισμού, προεπεξεργασίας και εμπορίας, λειτουργούν ήδη σε όλο τον κόσμο.

Σε Ευρωπαϊκή κλίμακα, το αλουμίνιο που χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι από εκείνα με τον υψηλότερο βαθμό ανακύκλωσης.

Ακολουθεί το αλουμίνιο από δομικές εφαρμογές, ενώ τρίτο σε βαθμό ανακύκλωσης είναι το αλουμίνιο από τα κουτιά μπίρας και αναψυκτικών. Έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνικές ανακύκλωσης, προσαρμοσμένες στις διάφορες μορφές ανακυκλώσιμου αλουμινίου, π.χ. άλλη για άβαφο και χονδρού πάχους αλουμίνιο, άλλη για φόιλ αλουμινίου, άλλη για βαμμένο αλουμίνιο. Η εμπειρία της Ιαπωνίας είναι μοναδική κατά το ότι έχει εγκαταλείψει σχεδόν ολοκληρωτικά την πρωτογενή παραγωγή αλουμινίου, την οποία αντικατέστησε με τη δευτερογενή παραγωγή και τις εισαγωγές. Στις ΗΠΑ, η δευτερογενής παραγωγή από παλαιό σκραπ αντιστοιχεί στο 30% της παραγωγής, ενώ το νέο σκραπ (από την παραγωγική διαδικασία) διπλασιάζει αυτό το ποσοστό. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η δευτερογενής παραγωγή αλουμινίου έχει τριπλασιαστεί από το 1980 και έχει φτάσει το 40% του συνόλου.

1.1.15. Παραγωγή Αλουμινίου και βιωσιμότητα

Για να καταδειχθεί η σημαντικότητα της ανακύκλωσης, τονίζεται ότι ενώ για την πρωτογενή παραγωγή 1 κιλού αλουμινίου με ηλεκτρόλυση αλουμίνας από βωξίτη απαιτείται ενέργεια 14 kWh (κιλοβατώρες), η ανακύκλωση της ίδιας ποσότητας από scrap χρειάζεται μόνο 5% της ενέργειας ηλεκτρόλυσης.

Η έντονη προσπάθεια που καταβάλλεται διεθνώς προς την κατεύθυνση αυτή, αποδεικνύεται με την υπεύθυνη διαχείριση των ορυχείων βωξίτη και με την χρήση υδροηλεκτρικής ενέργειας στην ηλεκτρόλυση. Σε πολλά ορυχεία βωξίτη που κλείνουν η επαναφορά του φυσικού τοπίου είναι καθιερωμένη, ενώ τα Ηνωμένα Έθνη έχουν βραβεύσει την αναδάσωση παλαιών ορυχείων μεγάλης εταιρίας στην Αυστραλία. Οι περισσότερες μονάδες ηλεκτρόλυσης (πάνω από 60% παγκοσμίως) τροφοδοτούνται πλέον από υδροηλεκτρικές πηγές που σημαίνει καθαρότερη ενέργεια χωρίς επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με αέριες εκπομπές.

Ταυτόχρονα η προσπάθεια για οικονομικότερη διεργασία ηλεκτρολύσεως έχει ήδη διεθνώς αποδώσει, επιτυγχάνοντας μείωση ενέργειας 30% σε σχέση με εκείνη που χρειαζόταν προ 30ετίας.

Για την προώθηση της ανακύκλωσης αλουμινίου καταβάλλεται προσπάθεια μέσω ενημέρωσης ώστε το κοινό να εξοικειωθεί με τις έννοιες περισυλλογής, διαχωρισμού και ανακύκλωσης. Η διατήρηση της αξίας του μετάλλου, παράλληλα με την επ'άπειρον δυνατότητα ανακύκλωσης, αποτελούν εξαιρετικά ελκυστικά χαρακτηριστικά που ενισχύουν το προφίλ οικολογίας του αλουμινίου. Υπενθυμίζεται ότι σε αντίθεση με άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται σε συσκευασίες ή στη δόμηση, το αλουμίνιο διατηρεί ακέραια τα χαρακτηριστικά του μετά την ανακύκλωση χωρίς ποιοτική υποβάθμιση. Οι ιδιότητες αυτές χαρακτηρίζουν το αλουμίνιο σαν «Ενεργειακή Τράπεζα».



Εικόνα 4 : Βωξίτης



1.1.16. Λεξικό όρων αλουμινίου

1. Πρωτογενές αλουμίνιο: Είναι το αλουμίνιο που παράγεται με την ηλεκτρόλυση της αλουμίνας (οξειδίο του αλουμινίου- άσπρη σκόνη σαν ζάχαρη). Η αλουμίνα προέρχεται από μηχανική-χημική επεξεργασία του ορυκτού βωξίτη που βρίσκεται σε μεγάλα κοιτάσματα στη φύση.
2. Ανακύκλωση: Είναι η συστηματική περισυλλογή χρησιμοποιημένων προϊόντων ή κατασκευών από αλουμίνιο, για την επαναχύτευση του μετάλλου και παραγωγή χρήσιμων και πάλι προϊόντων αλουμινίου. Με την επαναχύτευση του Αλουμινίου επιτυγχάνεται οικονομία ενέργειας 95% σε σχέση με την ενέργεια που χρειάζεται η ηλεκτρόλυση του πρωτογενούς μετάλλου.
3. Δευτερογενές αλουμίνιο: Είναι το αλουμίνιο που προέρχεται από διαδικασία ανακύκλωσης.
4. Αλουμίνιο εμπορικά καθαρό: Πρόκειται για αλουμίνιο πρωτογενές (προϊόν ηλεκτρολύσεως) με καθαρότητα σε αλουμίνιο πάνω από 99%. Κύριες μικροπροσμίξεις σε σίδηρο(Fe) και πυρίτιο (Si).
5. Κράματα αλουμινίου: Παράγονται με προσθήκες στοιχείων σε αλουμίνιο εμπορικής καθαρότητας, ή σε ανακυκλωμένο μέταλλο αναγνωρισμένου τίτλου καθαρότητας. Τα πιο σημαντικά προσθετικά στοιχεία είναι: το Μαγγάνιο (Mn), το Πυρίτιο (Si), το Μαγνήσιο (Mg), ο Χαλκός (Cu), ο Ψευδάργυρος (Zn). Οι κύριοι λόγοι για τη παραγωγή των κραμάτων είναι δυνατόν να είναι: η αύξηση της σκληρότητας, η αντιδιαβρωτικότητα, η συγκολλησιμότητα κλπ.
6. Χρηματιστήριο μετάλλων Λονδίνου (LME): Πρόκειται για το Διεθνές Εμπορικό Σώμα που διευκολύνει τις διεθνείς αγοραπωλησίες Μετάλλου.
7. Σκληρότητα μετάλλου: Είναι η αντίσταση στη πλαστική (μόνιμη) παραμόρφωση, στο σημάδεμα από κτύπημα , στην απόξεση.
8. Ελαση: Είναι η πλαστική (μόνιμη) παραμόρφωση που μειώνει δραστικά το πάχος μιάς πλάκας ή ενός ρόλου αλουμινίου.Γίνεται στα έλαστρα.
9. Διέλαση: Είναι η πλαστική παραμόρφωση με την οποία παράγεται το αρχιτεκτονικό προφίλ (πόρτες - παράθυρα). Γίνεται σε ειδικές πρέσες, όπου μία προθερμασμένη μπιγέτα αλουμινίου υποχρεώνεται πιεζόμενη να «ρεύσει» μέσα από τη μήτρα που καθορίζει τη μορφή του προφίλ.
10. Ελαστρο: Πρόκειται για μηχανήμα με συγκρότημα κυλίνδρων που πιέζονται και συγχρόνως περιστρέφονται , διαμορφώνοντας πλαστικά το αλουμίνιο που περνάει ανάμεσα τους (εκτυκτικό που ξετυλίγει το ρόλο, έλαστρο που υποβιβάζει το πάχος, τυλικτικό που τυλίγει το λεπτότερο φύλλο).



11. **Θερμή έλαση:** Με αυτή μετατρέπονται οι πλάκες του χυτηρίου σε ρολά. Για να γίνει η θερμή έλαση εφικτή και με χαμηλή κατανάλωση ισχύος, οι πλάκες προθερμαίνονται σε θερμοκρασία κοντά στο σημείο τήξεως.
12. **Ψυχρή έλαση:** Γίνεται στα ψυχρά έλαστρα, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, και με αυτή επιτυγχάνεται η μείωση του πάχους των ρόλων αλουμινίου.
13. **Εξέλαση:** Είναι κατεργασία διαμόρφωσης, όπου το αλουμίνιο πιέζεται να ακολουθήσει περιφερειακά τη μορφή ενός καλουπιού.
14. **Αειφόρος (Βιώσιμη) Ανάπτυξη:** Είναι η ανάπτυξη που στηρίζεται στη αρμονική συνύπαρξη προϊόντων - διαδικασιών παραγωγής - κοινωνίας και περιβάλλοντος. Η ολιστική οικονομία ενέργειας για τη παραγωγή, θεωρείται απαραίτητη. Εργαλείο για τη συγκριτική ενεργειακή μελέτη υλικών και διαδικασιών είναι η ανάλυση κύκλου ζωής.
15. **Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA):** Σε βάθος μελέτη ενεργειακής ανάλωσης για τη παραγωγή ενός προϊόντος, εξετάζοντας παράλληλα την ολική μόλυνση σε στερεά, υγρά ή αέρια απόβλητα που επιφέρει η παραγωγή του (και το κόστος απόρριψής τους). Χρησιμοποιείται σαν βασικό ελεγκτικό μέσο για την βιώσιμη ανάπτυξη, δηλ ουσιαστικά την οικολογική ισορροπία [1].

1.1.17. Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] About Aluminium. (2018 Ιανουάριος 15)
Λήφθηκε από <http://www.elval.gr/default.asp?pid=177&la=1>
- [2] Γ.Ν. ΧΑΙΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ (2013), ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ [Pdf διαφάνειες].
Λήφθηκε από http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Alu.pdf
- [3] ΑΤΕΜ κατασκευές αλουμινίου-σιδήρου επεξεργασία μετάλλου (2017 Δεκέμβριος 3)
Λήφθηκε από <http://www.atem-oe.gr/>

1.2. Νανοϋλικά

1.2.1. Τι είναι

Η νανοτεχνολογία ως γενικός όρος χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό και την κατασκευή οτιδήποτε η χρήση του οποίου εξαρτάται από συγκεκριμένη δομή στη νανοκλίμακα. Αυτή γενικά λαμβάνεται ως 100 νανόμετρα ή λιγότερο. Περιλαμβάνει συσκευές ή συστήματα που κατασκευάζονται με εργασία σε επίπεδο μεμονωμένων ατόμων ή μορίων, καθώς και υλικά που περιέχουν πολύ μικρές δομές.

Τα νανοϋλικά θεωρούνται συνήθως ως υλικά με τουλάχιστον μία εξωτερική διάσταση που μετρά 100 νανόμετρα ή λιγότερο ή με εσωτερικές δομές που έχουν μέγεθος 100 nm ή λιγότερο. Μπορεί να έχουν τη μορφή σωματιδίων, σωλήνων, ράβδων ή ινών. Τα νανοϋλικά που έχουν την ίδια σύνθεση με τα γνωστά υλικά σε χονδρική (bulk) μορφή μπορεί να έχουν διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες από αυτά και μπορεί να συμπεριφέρονται διαφορετικά αν εισέλθουν στο σώμα. Μπορεί επομένως να δημιουργούν διαφορετικούς δυνητικούς κινδύνους.

Τα συσσωρευμένα νανοϋλικά πρέπει επίσης να εκτιμηθούν υπό το φως αυτό, καθώς ενδέχεται να παρουσιάζουν ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες των μεμονωμένων νανοσωματιδίων, ειδικά όταν έχουν ασυνήθιστα μεγάλη επιφάνεια για δεδομένη ποσότητα υλικού.

Ο αριθμός των προϊόντων που παράγονται από νανοτεχνολογία ή που περιέχουν νανοϋλικά που εισέρχονται στην αγορά αυξάνεται. Οι τρέχουσες εφαρμογές περιλαμβάνουν την υγειονομική περίθαλψη (στοχοθετημένη παράδοση φαρμάκων, αναγεννητική ιατρική και διαγνωστικά), ηλεκτρονικά, αυτοκινητοβιομηχανία και αεροναυπηγική, καλλυντικά, υφάσματα, τεχνολογία πληροφοριών και προστασία του περιβάλλοντος [2].

1.2.2. Σύνθεση

Τα νανοσωματίδια μπορούν να κατασκευαστούν από ένα μεγάλο εύρος υλικών, όπως κοινά μέταλλα, κεραμικά μεταλλικά οξείδια, πυρίτιο ή ακόμη και πολυμερή. Η μορφολογία τους παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία και καθορίζεται από τη χρήση τους και από τις ιδιότητες που πρέπει να προσδοθούν σε αυτά. Για όλα τα νανοκρυσταλλικά υλικά, που παρασκευάζονται με διάφορες μεθόδους ιδιαίτερο ρόλο έχει η μόλυνση της επιφάνειας και των ενδοεπιφανειών. Οι μέθοδοι με τις οποίες αναπτύσσονται τα νανοσωματίδια χωρίζονται ως εξής [1] :

- Μέθοδοι στερεάς κατάστασης/μηχανικές διεργασίες (Solid-state methods/mechanical processes)
- Μέθοδοι ατμού (Vapor methods)



- Χημική σύνθεση/υγρές χημικές διεργασίες (Chemical synthesis/wet chemical processes)
- Μέθοδοι σύνθεσης από αέρια φάση (Gas phase synthesis methods)

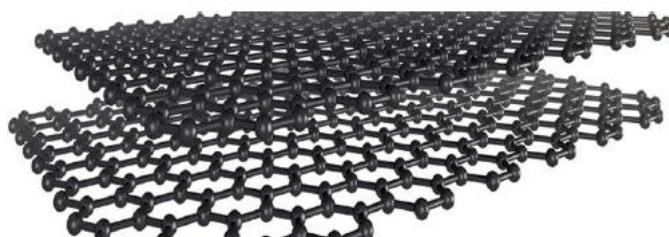
1.2.3. Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] ΚΩΝ. Α. ΧΑΡΙΤΙΔΗΣ. (2012). NANOΔΟΜΕΣ & NANOΥΛΙΚΑ Σύνθεση, Ιδιότητες & Εφαρμογές [Pdf διαφάνειες]. Λήφθηκαν από <http://mycourses.ntua.gr/document/document.php>
- [2] Nanomaterials. (2017 Νοέμβριος 17). Λήφθηκαν από https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/nanomaterials/en/index.htm

1.3. Το γραφένιο

1.3.1. Εισαγωγή

Ο άνθρακας είναι ίσως το πιο συναρπαστικό στοιχείο του περιοδικού πίνακα. Αποτελεί τη βάση του γενετικού κώδικα (DNA) και τον δομικό λίθο για «εξωτικά» υλικά, όπως τα φουλερένια, οι νανοσωλήνες άνθρακα και το γραφένιο, που θεωρούνται εξαιρετικά σημαντικά για την ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας. Στη φύση βρίσκεται στην μορφή γραφίτη, διαμαντιού και άμορφου άνθρακα, ενώ τεχνητά παράγονται τα φουλερένια, οι νανοσωλήνες και το γραφένιο. Ο όρος γραφένιο πρωτοεμφανίστηκε το 1987, προκειμένου να περιγράψει μονά φύλλα γραφίτη ως ένα από τα συστατικά των ενώσεων παρεμβολής γραφίτη (GICs). Ο όρος χρησιμοποιήθηκε επίσης στις πρώτες περιγραφές των νανοσωλήνων άνθρακα, καθώς και για την κρυσταλλική ανάπτυξη του γραφενίου και τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Μεγαλύτερα μόρια ή φύλλα γραφενίου (έτσι ώστε να μπορούν να θεωρηθούν ως πραγματικά απομονωμένοι 2D κρύσταλλοι) δεν μπορούσαν να δημιουργηθούν. [1-2, 4]

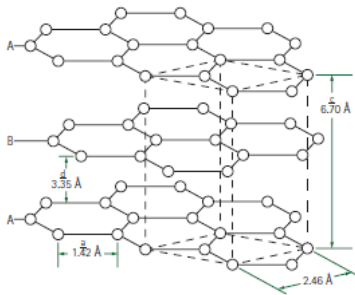


Εικόνα 5 : Επίπεδα διατεταγμένων ατόμων άνθρακα

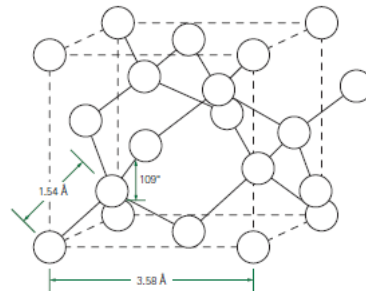
1.3.2. Αλλοτροπικές μορφές άνθρακα

Η διαφορά μεταξύ των απαντώμενων αλλότροπων είναι η δομή και η σύνδεση των ατόμων του άνθρακα. Ενώ υπάρχουν πολλές διαφορετικές μορφές άνθρακα, ο γραφίτης είναι η πιο σταθερή υπό κανονικές συνθήκες ένωση. Συνήθη αλλότροπα είναι ο γραφίτης, το διαμάντι, τα φουλερένια και οι νανοσωλήνες, ενώ απαντώνται και άλλα σε συνθήκες ειδικών θερμοκρασιών και πιέσεων. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται συνήθως στη θερμοχημεία ως πρότυπη κατάσταση για τον ορισμό της Ο γραφίτης δημιουργείται από την μείωση ιζηματογενών άνθρακικών ενώσεων κατά την επεξεργασία του ορυκτού. Σε αντίθεση με την κοινή πεπτοίθηση, οι χημικοί δεσμοί στον γραφίτη είναι ισχυρότεροι από αυτούς του διαμαντιού. Ωστόσο, αυτό που καθορίζει τη διαφορά στη σκληρότητα των δύο ενώσεων είναι η δομή του πλέγματος των ατόμων άνθρακα. Τα διαμάντια περιέχουν τρισδιάστατους δεσμούς πλέγματος, ο γραφίτης περιέχει δύο διαστάσεων πλέγματα (στρώματα φύλλων άνθρακα). Ενώ μέσα σε κάθε στρώμα γραφίτη τα άτομα άνθρακα περιέχουν πολύ ισχυρούς δεσμούς, τα στρώματα είναι ικανά να ολισθαίνουν, κάνοντας τον γραφίτη ένα πιο μαλακό και πιο εύπλαστο

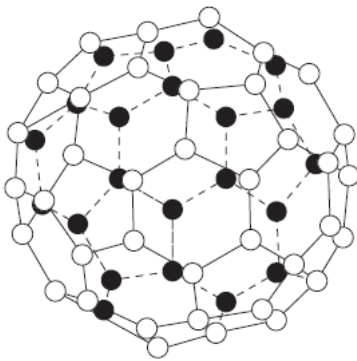
υλικό. Έχει πολύ καλές ηλεκτρικές, μηχανικές, θερμικές και χημικές ιδότητες. Εντοπίστηκε για πρώτη φορά πριν από χίλια χρόνια και ονομάστηκε για πρώτη φορά το 1789. Ο γραφίτης είναι ένα από τα τρία μόνο φυσικά απαντώμενα αλλότροπα του άνθρακα (τα άλλα δύο είναι άμορφος άνθρακας και το διαμάντι). Θερμότητας σχηματισμού ενώσεων από άνθρακα. Όπως έχει προηγουμένως αναφερθεί, ο γραφίτης έχει μια επίπεδη στρωματοποιημένη δομή, κάθε στρώση της οποίας, αποτελείται από άτομα άνθρακα συνδεδεμένα μεταξύ τους σε ένα εξαγωνικό πλέγμα. Οι ομοιοπολικοί δεσμοί που υπάρχουν είναι εξαιρετικά ισχυροί και τα άτομα άνθρακα βρίσκονται σε απόσταση 0,142 nm. Τα άτομα άνθρακα συνδέονται μαζί με πολύ εύρωστους sp^2 υβριδικούς δεσμούς σε ένα μόνο στρώμα ατόμων, δύο διαστάσεων. Καθε διαδιάστατη στρώση, πάχους ενός ατόμου με δεσμευμένα άτομα άνθρακα sp^2 σε γραφίτη, απέχει 0,335 nm [3, 8].



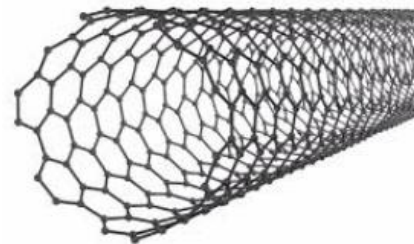
Η κρυσταλλική δομή του γραφίτη



Η κρυσταλλική δομή του διαμαντιού



Η κρυσταλλική δομή του φουλλερενίου
νανοσωλήνα



Η κρυσταλλική δομή του

Εικόνα 6 : Αλλότροπα άνθρακα



1.3.3. Γραφένιο - τι είναι

Το γραφένιο (graphene) είναι ένα φύλλο ατόμων άνθρακα που είναι διευθετημένα σε κυψελοειδή διάταξη και έχει πάχος ίσο με ένα άτομο. Επειδή η τρίτη του διάσταση είναι ουσιαστικά ανύπαρκτη, το γραφένιο συνιστά το πρώτο δισδιάστατο κρυσταλλικό υλικό που απομόνωσε ο άνθρωπος. Ο γραφίτης, το υλικό που αποτελεί τη μύτη ενός μολυβιού, συνιστά μια πολυστρωματική δομή από γραφένια τα οποία αλληλεπιδρούν πολύ ασθενικά μεταξύ τους. Αυτός είναι ο λόγος που ο γραφίτης χρησιμοποιείται ως στερεό λιπαντικό. Ο γραφίτης είναι από την φύση του πολύ ψαθυρό υλικό, συνεπώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό. Το γραφένιο από την άλλη είναι το ισχυρότερο υλικό που έχει καταγραφεί, όντας έως και 40 φορές ισχυρότερο από το διαμάντι. Για να καταλάβουμε πόσο λεπτό είναι το γραφένιο, αρκεί να αναφέρουμε ότι κρύσταλλος γραφίτη με πάχος ενός χιλιοστού αποτελείται από περίπου 3 εκατομμύρια φύλλα γραφενίου.

1.3.4. Πρώτη εμφάνιση γραφενίου

Οι στρώσεις γραφίτη προηγουμένως (αρχής γενομένης από τη δεκαετία του 1970) προέρχονταν από κρυσταλλική ανάπτυξη (κατά τη διεργασία της κρυστάλλωσης άτομα ή μόρια από ένα συνεχές μέσο, ενσωματώνονται στον κρύσταλλο συμβάλλοντας έτσι στην ανάπτυξή του) από τα άλλα υλικά. Αυτό το «κρυσταλλικά αναπτυσσόμενο γραφένιο» αποτελείται από ένα μονοατομικού πάχους εξαγωνικό πλέγμα των sp^2 δεσμών των ατόμων άνθρακα, όπως και στο αυτοτελές γραφένιο. Ωστόσο, υπάρχει σημαντική μεταφορά φορτίου από το υπόστρωμα στο κρυσταλλικά αυξανόμενο γραφένιο και σε ορισμένες περιπτώσεις υβριδοποίησης μεταξύ των d τροχιακών των ατόμων υποστρώματος και των τροχιακών p του γραφενίου, η οποία μεταβάλλει σημαντικά την ηλεκτρονική δομή του κρυσταλλικά αυξανόμενου γραφενίου.

Στρώσεις γραφίτη παρατηρήθηκαν με μικροσκοπία μετάδοσης ηλεκτρονίων (TEM) σε ακατέργαστα υλικά, ιδίως σε αιθάλη που λήφθηκε με χημική αποφλοίωση. Υπήρξαν επίσης πολλές προσπάθειες για να κατασκευαστούν πολύ λεπτές ταινίες από γραφίτη με μηχανική αποφλοίωση (από το 1990 και μέχρι μετά το 2004), αλλά κανένα από αυτά που παρήχθησαν δεν ήταν λεπτότερο των 50 με 100 στρωμάτων.

Ένα σημαντικό βήμα προόδου στην επιστήμη του γραφενίου ήρθε όταν ο Andre Geim και ο Kostya Novoselov στο Πανεπιστήμιο του Μάντσεστερ κατάφεραν να εξάγουν μονοατομικού πάχους κρυσταλλίτες (γραφένιο) από ακατέργαστο γραφίτη το 2004. Οι ερευνητές έβγαλαν στρώματα γραφενίου από γραφίτη και τα μετέφεραν σε λεπτό διοξείδιο του πυριτίου πάνω σε δίσκο πυριτίου σε μια διαδικασία που αποκαλείται μικρομηχανική διάσπαση. Το διοξείδιο του πυριτίου απομονωμένο ηλεκτρικά από το γραφένιο αλληλεπιδράσε ασθενώς με το γραφένιο, παρέχοντας στρώματα ουδέτερα φοτισμένα.

Η τεχνική μικρομηχανικής διάσπασης οδήγησε άμεσα στην πρώτη παρατήρηση του ανώμαλου κβαντικού φαινομένου του Hall στο γραφένιο, το οποίο παρείχε άμεση



απόδειξη της θεωρητικά προβλεπόμενης π φάσης του Berry των χωρίς μάζα φερμιονίων του Dirac στο γραφένιο. Το ανώμαλο κβαντικό φαινόμενο Hall στο γραφένιο αναφέρθηκε μέσω προσομοίωσης από τους Geim και Novoselov καθώς και τους Philip Kim και Yuanbo Zhang από το Πανεπιστήμιο Κολούμπια. Η θεωρία του γραφενίου διερευνήθηκε για πρώτη φορά από τον Φίλιπ Ρ. Γουάλας το 1947 ως αφετηρία για την κατανόηση των ηλεκτρονιακών ιδιοτήτων του πιο περίπλοκου 3D γραφίτη. Η αναπτυσσόμενη χωρίς μάζα εξίσωση Dirac τονίστηκε πρώτα από τους Gordon W. Semenoff και David P. DeVincenzo και Eugene J. Mele. Ο Semenoff υπογράμμισε την εμφάνιση του ηλεκτρονιακού επιπέδου Landau σε ένα μαγνητικό πεδίο ακριβώς στο σημείο Dirac. Αυτό το επίπεδο είναι υπεύθυνο για το ανώμαλο κβαντικό φαινόμενο Hall. Αργότερα, ενιαίες στρώσεις γραφενίου παρατηρήθηκαν άμεσα με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Πιο πρόσφατα, δείγματα γραφενίου παρασκευασμένα σε ταινίες του νικελίου, καθώς και σε πυριτίο αλλά και σε ανθρακικό καρβίδιο του πυριτίου, ανέδειξαν την ανώμαλο κβαντικό φαινόμενο Hall απευθείας σε ηλεκτρικές μετρήσεις. Γραφίτικά στρώματα σε μορφή άνθρακα καρβιδίου του πυριτίου δείχνουν το φάσμα Dirac σε υπό γωνία φωτοεκπομπή, και το ανώμαλο κβαντικό φαινόμενο Hall παρατηρείται με συντονισμό κυκλοτρόνιου και πειράματα σήραγγας. Το γραφένιο προσφέρει επίσης μια εξαιρετική αναλογία συμπυκνωμένης ύλης. Από την άλλη πλευρά, αν και είναι αναπόσπαστο μέρος των 3D υλικών, το γραφένιο θεωρήθηκε ότι δεν μπορεί να υπάρξει σε ελεύθερη κατάσταση και ότι είναι ασταθές στο σχηματισμό κυρτών δομών όπως η αιθάλη, τα φουλερένια και οι νανοσωλήνες. Ξαφνικά, το μοντέλο έγινε πραγματικότητα, όταν βρέθηκε μόνιμα ελεύθερο γραφένιο τρία χρόνια μετά και ιδίως όταν η πειραματική παρακολούθηση επιβεβαίωσε ότι η μεταφορά φορτίου του ήταν πράγματι φερμιόνια Dirac χωρίς μάζα. Ένας απλός μη τεχνικός προσδιορισμός έχει δοθεί στο γραφένιο:

1.3.5. Μονοστρωματικό και πολυστρωματικό γραφένιο

Ανάλογα με το πλήθος των στρώσεων από τις οποίες αποτελείται, το γραφένιο διακρίνεται σε μονοστρωματικό και πολυστρωματικό. Το μονοστρωματικό αποτελείται από ένα δισδιάστατο πλέγμα ατόμων άνθρακα, ενώ το πολυστρωματικό από δύο ή περισσότερα, σχηματίζοντας μία τρισδιάστατη δομή. Το δεύτερο συναντάται στην διεθνή ορολογία ως graphene nanoplatelets (GNPs) και αποτελείται από 2 έως 100 φύλλα με εμβαδόν επιφάνειας περίπου 1x100 nm.

1.3.6. Ιδιότητες

Το γραφένιο έχει προσελκύσει το έντονο ενδιαφέρον της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας εξαιτίας των εκπληκτικών ιδιοτήτων του, οι οποίες διαφέρουν εντυπωσιακά από τις αντίστοιχες των γνώριμων τρισδιάστατων υλικών. Για παράδειγμα, το ηλεκτρικό ρεύμα διαπερνά σχεδόν ανεμπόδιστο το εσωτερικό του έχοντας ηλεκτρική αγωγιμότητα μεγαλύτερη από εκείνη του αργύρου (ασήμι), τη μεγαλύτερη γνωστή τιμή αγωγιμότητας σε θερμοκρασία δωματίου σήμερα. Η ικανότητά του να άγει τη θερμότητα είναι



εκπληκτική, καθώς είναι η μεγαλύτερη που έχει καταγραφεί πειραματικά. Συγκεκριμένα έχει μεγάλο εύρος ενδιαφέρουσων ιδιοτήτων όπως :

1.3.7. Ηλεκτρονικές ιδιότητες

Το γραφένιο είναι εντελώς διαφορετικό από τα περισσότερα συμβατικά τρισδιάστατα υλικά. Το φυσικό γραφένιο είναι ένα ημι-μέταλλο ή μηδενικού κενού ημιαγωγός. Η κατανόηση της ηλεκτρονικής δομής του γραφένιου είναι το σημείο εκκίνησης για την εξεύρεση της δομής των ζωνών του γραφίτη. Συνειδητοποιήθηκε νωρίς ότι η σχέση E-k είναι γραμμική για χαμηλές ενέργειες κοντά στις έξι γωνίες των δισδιάστατων εξαγωνικών ζώνων Brillouin, που οδηγεί σε μηδενική ενεργή μάζα για τα ηλεκτρόνια και τις οπές. Λόγω αυτής της γραμμικής (ή " κωνικής ") διασποράς, η σχέση σε χαμηλές ενέργειες, τα ηλεκτρόνια και τις οπές κοντά σε αυτά τα έξι σημεία, δύο εκ των οποίων είναι μη ισοδύναμα, συμπεριφέρονται σαν σχετικιστικά σωματίδια, περιγράφεται από την εξίσωση Dirac για σωματίδια με spin 1/2. Ως εκ τούτου, τα ηλεκτρόνια και οι οπές ονομάζονται φερμιόνια Dirac, και οι έξι γωνίες της ζώνης Brillouin ονομάζονται σημεία Dirac. Η εξίσωση που περιγράφει τη σχέση E-k είναι $E = \hbar v (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$ όπου η ταχύτητα Fermi είναι $v \sim 10^6$ m / s.

1.3.8. Οπτικές ιδιότητες

Οι μοναδικές ηλεκτρονικές ιδιότητες του γραφένιου παράγουν μια απροσδόκητα μεγάλη αδιαφάνεια για μία ατομική μονή στρώση, με τιμή: απορροφά πα \approx 2,3% του λευκού φωτός, όπου α είναι η σταθερά της τέλει δομής. Αυτό είναι συνέπεια της ασυνήθιστα χαμηλής ενέργειας της ηλεκτρονικής δομής του μονοστρωματικού γραφένιου το οποίο αναδुकνει ηλεκτρόνια και οπές κωνικής ζώνης που συναντιούνται μεταξύ τους στο σημείο Dirac που είναι ποιοτικά διαφορετικό από τις πιο κοινές τετραγωνικές συμπαγείς ζώνες. Αυτό έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά, αλλά η μέτρηση δεν είναι αρκετά ακριβής ώστε να αποδειχθεί με άλλες τεχνικές για τον καθορισμό της σταθεράς της τέλει δομής.

1.3.9. Θερμικές ιδιότητες

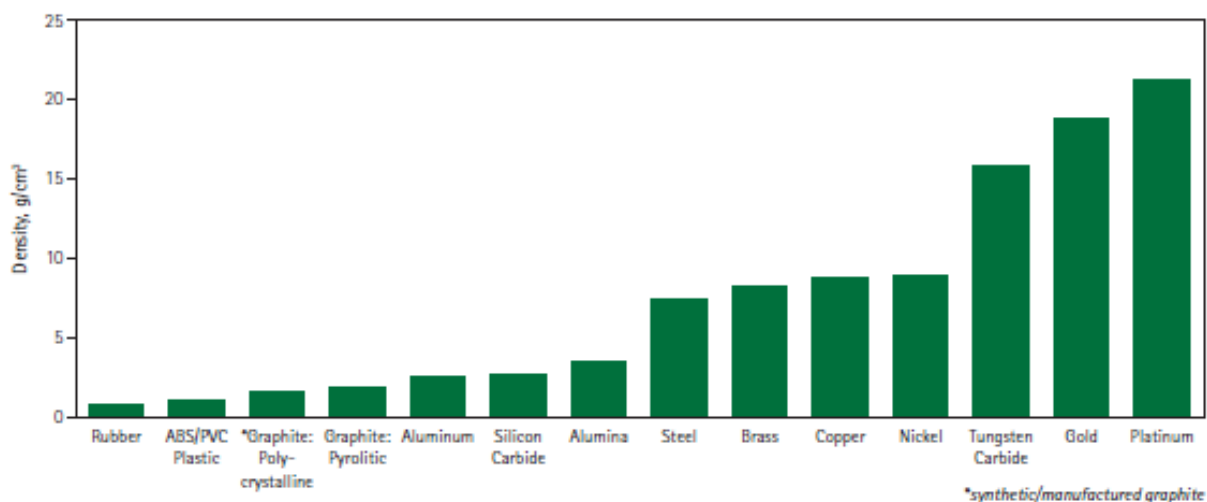
Η σε θερμοκρασία δωματίου θερμική αγωγιμότητα του γραφένιου μετρήθηκε πρόσφατα να είναι μεταξύ $(4.84 \pm 0.44) \times 10^3$ έως $(5.30 \pm 0.48) \times 10^3$ W/m*K. Οι μετρήσεις αυτές, που πραγματοποιούνται από τεχνική μη οπτικής επαφής, είναι μεγαλύτερες από εκείνες που μετρώνται για νανοσωλήνες άνθρακα ή διαμάντι και σημαίνουν ότι το γραφένιο είναι πολύ καλός αγωγός της θερμότητας. Μπορεί να αποδειχθεί με τη χρήση του νόμου των Wiedemann-Franz, ότι η θερμική αγωγιμότητα κυριαρχείται από φωτόνια. Η βαλλιστική θερμική αγωγιμότητα του γραφένιου είναι ισότροπη.

1.3.10. Μηχανικές ιδιότητες

Το 2008 πραγματοποιείται το πρώτο πείραμα που αποδεικνύει ότι το γραφένιο είναι το ισχυρότερο υλικό που υπάρχει στη φύση. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι το γραφένιο έχει αντοχή εφελκυσμού 100 φορές μεγαλύτερη από το ασάλι. Ωστόσο, η διαδικασία παραγωγής του μέσω ης μηχανικής αποφλοίωσης του φυσικού γραφίτη, θα απαιτήσει περαιτέρω τεχνολογική ανάπτυξη πριν να γίνει εμπορικά διαθέσιμο. Χρησιμοποιώντας ένα μικροσκόπιο ατομικής δύναμης (AFM), μετρήθηκε η σταθερά ελαστικότητας φύλλων γραφενίου. Τα φύλλα γραφενίου, τοποθετήθηκαν σε κυκλικές κοιλότητες διοξειδίου του πυριτίου και η ακίδα του AFM χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του. Το μέτρο ελαστικότητας Young στο 1 TPa και η αντοχή στον εφελκυσμό (στο επίπεδο του κρυστάλλου) στα 130 GPa. Αυτές οι εξαιρετικά υψηλές τιμές καθιστούν το γραφένιο το πιο ισχυρό υλικό στη φύση, που μπορεί να αξιοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών από την νανοηλεκτρονική (π.χ. αισθητήρες πίεσης, συντονίσιοι νανοταλαντωτές), ως την αεροδιαστημική τεχνολογία, όπου το γραφένιο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό μέσο για την δημιουργία νέων πολύ ανθεκτικών συνθέτων υλικών.

1.3.11. Πυκνότητα

Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του γραφίτη γενικά βελτιώνονται με αύξηση της πυκνότητας. Οι περισσότεροι εμπορικά διαθέσιμοι γραφίτες σπάνια ξεπερνάνε το 80% της θεωρητικά υπολογιζόμενης πυκνότητας. Σε σύγκριση με άλλα υλικά ο γραφίτης έχει μικρή πυκνότητα, το οποίο είναι μεγάλο πλεονέκτημα για πολλές εφαρμογές. Αυτές είναι εφαρμογές που απαιτούν βέλτιστο συνδυασμό αντοχής και βάρους.



Εικόνα 7 : Πυκνότητα διαφόρων υλικών



1.3.12. Εμφάνιση και παραγωγή

Το γραφένιο που παράγεται από αποφλοίωση είναι σήμερα ένα από τα πιο ακριβά υλικά στη Γη, με ένα δείγμα που μπορεί να τοποθετηθεί στη διατομή μιας ανθρώπινης τρίχας να κόστιζε περισσότερο από 1.000 δολάρια τον Απρίλιο του 2008 (περίπου 100.000.000 δολάρια / cm²). Από την άλλη πλευρά, η τιμή του κρυσταλλικά αυξανόμενου γραφενίου σε SiC πάνω σε καρβίδιο του πυριτίου έχει τιμή η οποία ήταν περίπου 100 \$/cm² το 2009. Αυτό είναι περίπου 1.000.000 φορές φθηνότερα από το αποφλοιωμένο γραφένιο. Ακόμη φθηνότερο γραφένιο έχει παραχθεί από μεταφορά από νικέλιο, από Κορεάτες_ερευνητές, με μεγέθη πλακιδίων έως 30".

Στη βιβλιογραφία, ειδικά στην επιστημονική κοινότητα επιφανειών, το γραφένιο αναφέρεται και ως μονοστρωματικός γραφίτης. Αυτή η κοινότητα έχει μελετήσει εντατικά το κρυσταλλικά αυξανόμενο γραφένιο σε διάφορες επιφάνειες (πάνω από 300 άρθρα πριν από το 2004). Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα εν λόγω γραφενικά στρώματα συνδυάζονται με ασθενείς επιφάνειες (από δυνάμεις Van der Waals), για να διατηρούν τους δισδιάστατους ηλεκτρονιακούς δεσμούς της δομής του απομονωμένου γραφενίου, όπως επίσης συμβαίνει με την αποφλοίωση νιφάδων γραφενίου σε σχέση με το διοξείδιο του πυριτίου [1, 3, 5-8].

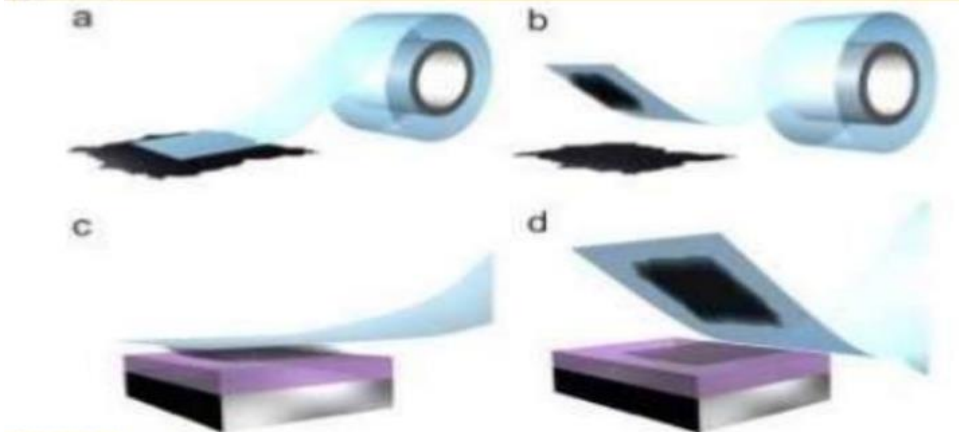
1.3.13. Μέθοδος κολλητικής ταινίας

Το 2004, οι Ρώσοι ερευνητές πήραν γραφένιο από μηχανική αποφλοίωση (αναφέρεται και ως μικρομηχανική δοάσπαση) του γραφίτη. Χρησιμοποίησαν συνεκτική ταινία για να χωρίσουν επανειλημμένα κρύσταλλους γραφίτη σε όλο και περισσότερο λεπτότερα κομμάτια. Η ταινία με τις επικολλημένες οπτικά διαφανείς νιφάδες διαλύθηκε σε ακετόνη και μετά από μερικά περαιτέρω βήματα, οι νιφάδες συμπεριλαμβανομένων των μονοστρωμάτων είχαν κατακαθίσει σε ένα πλακίδιο πυριτίου. Τα μεμονωμένα ατομικά στρώματα απομονώθηκαν σε ένα οπτικό μικροσκόπιο.

Ένα χρόνο αργότερα, οι ερευνητές απλοποίησαν την τεχνική και άρχισαν την ξηρά απόθεση, αποφεύγοντας το στάδιο που το γραφένιο επιπλέει σε ένα υγρό. Οι σχετικά μεγάλοι κρυσταλλίτες (πρώτα, μόνο μερικά μικρόμετρα σε μέγεθος αλλά, τελικά, μεγαλύτεροι από 1 χιλιοστό και ορατοί με γυμνό μάτι) λήφθηκαν από αυτή την τεχνική. Αναφέρεται συχνά ως μέθοδος κολλητικών ταινιών (Scotch tape method-mechanical exfoliation method).

1. MECHANICAL EXFOLIATION (ME):

Mechanical exfoliation separates different layers of graphene from a graphite. Adhesive tape is pressed onto the graphite and peeled away when some layers stick to the surface. This tape is pressed onto the surface of the target substrate. The tape is peeled off when the layer sticks to the target surface.



Εικόνα 8 : Μηχανική αποφλοίωση

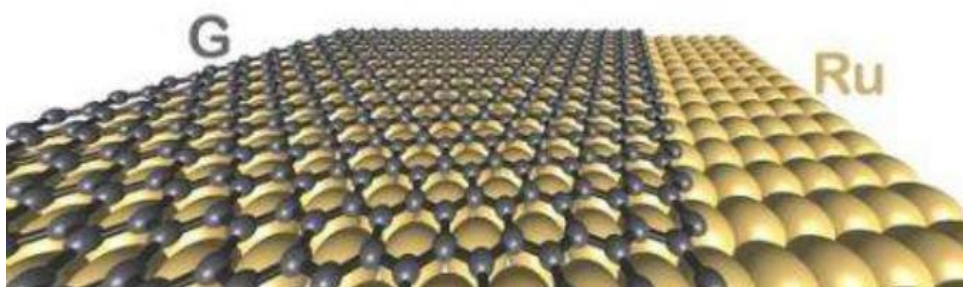
1.3.14. Ανάπτυξη σε καρβίδιο πυριτίου

Μια άλλη μέθοδος είναι η θέρμανση καρβιδίου του πυριτίου σε υψηλές θερμοκρασίες (> 1100 °C) για να μειωθεί σε γραφένιο. Η διαδικασία αυτή παράγει ένα δείγμα μεγέθους που εξαρτάται από το μέγεθος του χρησιμοποιούμενου υποστρώματος SiC. Η επιφάνεια του καρβιδίου του πυριτίου χρησιμοποιείται για τη δημιουργία γραφενίου, το πυρίτιο ή ο άνθρακας επηρεάζουν ιδιαίτερα το πάχος, την κινητικότητα και την πυκνότητα του φορέα γραφενίου. Αν υπάρξουν μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις τότε αντί για γραφένιο αρχίζουν να σχηματίζονται νανοσωλήνες

1.3.15. Ανάπτυξη πάνω σε υποστρώματα μετάλλου

Σε αντίθεση με υλικά τα οποία περιέχουν άνθρακα μέσα, όπως το καρβίδιο του πυριτίου, εδώ πρέπει να εισαχθεί ο άνθρακας. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί την ατομική δομή ενός υποστρώματος μετάλλου για την έναρξη της ανάπτυξης του γραφενίου. Το γραφένιο που καλλιεργείται πάνω σε ρουθίνιο δεν αποφέρει συνήθως δείγμα γραφενίου με ομοιόμορφο πάχος στρωμάτων και η σύνδεση μεταξύ του κατώτερου στρώματος γραφενίου και του υποστρώματος μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες των στρωμάτων άνθρακα. Από την άλλη πλευρά, το γραφένιο που καλλιεργείται πάνω σε ιρίδιο είναι πολύ αδύναμα συνδεδεμένο, με ομοιόμορφο πάχος, και μπορεί να έχει πολύ καλή διάταξη. Χρησιμοποιούνται μεθόδοι χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) για την τοποθέτηση του άνθρακα πάνω στα υποστρώματα. Όπως και σε πολλά άλλα υποστρώματα, το γραφένιο πάνω σε ιρίδιο είναι ελαφρά κυματιστό. Λόγω της διάταξης του μεγάλου άξονα αυτών των κυματισμών, γίνεται ορατή η δημιουργία

μικροκενών στους ηλεκτρονιακούς δεσμούς της δομής (κώνου Dirac). Υψηλής ποιότητας φύλλα ολιγοστρωματικού γραφενίου που υπερβαίνει το 1 cm^2 (0,2 τετραγωνικές ίντσες) έχουν συντεθεί μέσω χημικής απόθεσης ατμού πάνω σε λεπτές ταινίες νικελίου. Αυτά τα φύλλα έχουν μεταφερθεί με επιτυχία σε διαφορά υποστρώματα διασφαλίζοντας την απόδειξη της βιωσιμότητας για πολλές ηλεκτρονικές εφαρμογές. Μια βελτίωση της τεχνικής αυτής έχει βρεθεί στα φύλλα χαλκού, όπου η ανάπτυξη σταματά αυτόματα μετά από ένα μονό στρώμα γραφενίου και μπορούν να δημιουργηθούν μεγάλες ταινίες γραφενίου.



Εικόνα 9 : Γραφένιο πάνω σε ρουθένιο

1.3.16. Πυρόλυση του αιθοξειδίου του νατρίου (sodium ethoxide)

Η πυρόλυση είναι η χημική διάσπαση οργανικών υλικών με την θέρμανση απουσία οξυγόνου και άλλων αντιδραστηρίων εκτός πιθανόν από ατμό. Μια πρόσφατη δημοσίευση έχει περιγράψει μια διαδικασία για την παραγωγή γραφενίου ποσοτήτων γραμμάριου, από τη μείωση της αιθανόλης από νάτριο, ακολουθούμενη από την πυρόλυση των παραγώγων του αιθοξειδίου, καθώς και το πλύσιμο με νερό για την αφαίρεση των αλάτων νατρίου.

1.3.17. Μείωση του οξειδίου του γραφίτη

Η μείωση του οξειδίου του γραφίτη ήταν πιθανώς η ιστορικά πρώτη μέθοδος σύνθεσης γραφενίου. Ο P. Boehm ανέφερε μονοστρωματικές νιφάδες οξειδίου του γραφίτη από το 1962. Σε αυτό το πρώιμο έργο αποδείχθηκε η ύπαρξη μονοστρωματικών νιφάδων οξειδίου του γραφίτη. Η συμβολή του Boehm πρόσφατα αναγνωρίστηκε από τον νομπελίστα για την έρευνα του πάνω στο γραφένιο, Andre Geim. Η μείωση οξειδίου του γραφίτη μπορεί να επιτευχθεί με ταχεία θέρμανση και να παράγει σε μεγάλο βαθμό εξαπλωμένη σκόνη άνθρακα με μικρό ποσοστό νιφάδων γραφενίου. Η μείωση μονοστρωματικών φιλμ οξειδίου του γραφίτη π.χ. από υδραζίνη, ανόπτηση σε αργό/υδρογόνο, αναφέρθηκε ότι παράγει φιλμ γραφενίου. Ωστόσο, η ποιότητα του γραφενίου που παράγεται από μείωση του οξειδίου του γραφίτη είναι χαμηλότερη.



1.3.18. Από νανοσωλήνες

Αναφέρθηκαν πειραματικές μέθοδοι για την παραγωγή κορδελλών γραφένιου, αποτελούμενες από το κόψιμο ανοικτών νανοσωλήνων. Σε μία τέτοια μέθοδο, νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων είναι ανοιχτοί σε διάλυμα με δράση υπερμαγγανικού καλίου και θειικού οξέος. Σε μία άλλη μέθοδο, νανοκορδέλες γραφένιου παράγονται με εγχάραξη πλάσματος νανοσωλήνων που είναι εν μέρει ενσωματωμένοι σε πολυμερή φιλμ [8].

1.3.19. Εφαρμογές

Το γραφένιο αναμένεται σύντομα να χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών και να αποτελέσει κύριο συστατικό καινοτόμων συσκευών και διατάξεων. Ηδη διεξάγεται εντατική έρευνα για την κατασκευή ταχύτερων και μικρότερης ενεργειακής κατανάλωσης τρανζίστορ από τα αντίστοιχα πυριτίου που χρησιμοποιούνται σήμερα. Η ευκινησία των φορέων στο γραφένιο είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή στο πυρίτιο. Ωστόσο υπάρχει ένα μικρό πρόβλημα. Στο γραφένιο δεν υπάρχει ενεργειακό χάσμα μεταξύ της ζώνης σθένους και αγωγιμότητας όπως στο πυρίτιο, με συνέπεια να μην μπορεί να βρεθεί εύκολα από την κατάσταση λειτουργίας (On) στην κατάσταση μη λειτουργίας (Off). Για τη δημιουργία ενεργειακού χάσματος έχει προταθεί η χρήση ταινιών γραφένιου με πλάτος μερικά νανόμετρα, καθώς και η χημική τροποποίηση του ανθρακικού δικτύου του γραφένιου με διάφορα μόρια.

Η αντίδραση του γραφένιου με ατομικό υδρογόνο οδηγεί σε ένα νέο κρυσταλλικό σύστημα με ηλεκτρονικό ενεργειακό χάσμα, το οποίο ονομάζεται γραφάνιο (graphane). Από την άλλη πλευρά, η απουσία ενεργειακού χάσματος στο γραφένιο επιτρέπει την απορρόφηση του φωτός σε μεγάλη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, ανοίγοντας μια τεράστια δυναμική για φωτονικές εφαρμογές. Επειδή το γραφένιο είναι διαφανές και ταυτόχρονα εμφανίζει μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα, είναι ιδιαίτερα ελκυστικό για την παραγωγή διαφανών αγώγιμων ηλεκτροδίων τα οποία απαιτούνται σε εφαρμογές όπως διάφανες οθόνες αφής, οθόνες υγρών κρυστάλλων, οργανικά φωτοβολταϊκά και δίοδοι. Πολύ πρόσφατα μεγάλη πολυεθνική εταιρεία κατασκεύασε την πρώτη εύκαμπτη οθόνη αφής, από μεγάλα φύλλα γραφένιου πάνω σε υπόστρωμα πολυμερούς.

1.3.20. Πολυμερή σύνθετα με ενίσχυση γραφένιου

Απλώνοντας ένα μικρό ποσό γραφένιου σε κάποιο πολυμερές, οι ερευνητές έφτιαξαν σκληρά και ελαφρά υλικά. Η ηλεκτρική συμπεριφορά στα σύνθετα μπορεί να αντέξει πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από ό, τι τα πολυμερή μόνα τους. Τα πολυμερή μπορούν να εγχυθούν με νανοσωλήνες άνθρακα για να φτιάξουν υλικά με παρεμφερείς ιδιότητες. Επίσης το γραφένιο ενδέχεται να έχει μικρότερη τοξικότητα από νανοσωλήνες άνθρακα. Μια δημοσίευση στο περιοδικό Nature Nanotechnology διαπίστωσε ότι



μεγάλοι νανοσωλήνες άνθρακα προκαλούν τις ίδιες τοξικές αντιδράσεις σε ποντίκια, όπως αυτές του αμιάντου. Η ανησυχία είναι ότι οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να μιμούνται τις ίνες αμιάντου, οι οποίες είναι αρκετά λεπτές για να διεισδύσουν στους πνεύμονες και να προκαλούν καρκίνο. Το γραφένιο, από την άλλη πλευρά, το οποίο είναι ένα νανόμετρο μόνο σε πάχος, είναι αρκετά μεγάλο στις δύο άλλες διαστάσεις. και δεν θα είναι σε θέση να περάσει από τα εμπόδια του αίματος στον εγκέφαλο ή στα κύτταρα, αναφέρει ο Lawrence Drzal, διευθυντής του Κέντρου Σύνθετων Υλικών και Δομών στο Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν.

Τα πολυμερή σύνθετα με ενίσχυση γραφενίου είναι ιδανικά για ελαφριές δεξαμενές βενζίνης και πλαστικά δοχεία που διατηρούν τη φρεσκάδα των τροφίμων για εβδομάδες. Θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να φτιάξουν ελαφρύτερα και με μικρότερη κατανάλωση καυσίμων αεροσκάφη και εξαρτήματα αυτοκινήτων, καθώς και ισχυρότερες ανεμογεννήτριες, ιατρικά εμφυτεύματα, και αθλητικό εξοπλισμό. Επιπλέον, είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να φτιαχτούν διαφανείς αγωγίμες επιστρώσεις για ηλιακές κυψελίδες και οθόνες.

Η ανάπτυξη αποτελεί μέρος μιας ευρύτερης προσπάθειας έρευνας για να δημιουργήσουν πολυμερή ενισχυμένα με νανοσωματίδια. Ίνες άνθρακα και ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται παραδοσιακά για την ενίσχυση πολυμερών. Σε αντίθεση με τις ίνες, όμως, ένα πολύ μικρό ποσό των νανοσωματιδίων (λιγότερο από το 2 τοις εκατό του όγκου του σύνθετου) είναι αρκετό για να κάνει το πολυμερές ισχυρότερο και ανθεκτικότερο στη θερμότητα. Επειδή χρησιμοποιείται λιγότερο υλικό πληρώσεως, το σύνθετο μπορεί να διατηρήσει την ικανότητα τανισμού και τη διαφάνεια το πολυμερούς.

Τα νανοσωματίδια από πηλό και οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι σημαντικά υλικά για χρήση σε πολυμερή σύνθετα. Η Toyota έχει φτιάξει κάποια τμήματα κινητήρα από σύνθετα πηλού-νάιλον, τα οποία είναι ισχυρότερα και μπορεί να αντέξουν πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από ό, τι μπορεί το νάιλον. Πολυμερή με έγχυση νανοσωλήνων άνθρακα χρησιμοποιούνται για να φτιαχτούν ρόπαλα του μπέιζμπολ και μπαστούνια του γκολφ και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μέρη του αυτοκινήτου, όπως λαβές και φτερά. Αλλά λόγω του υψηλού κόστους των νανοσωλήνων άνθρακα έχουν περιορισμένη χρήση.

Αναφέρεται ότι για όλες τις ιδιότητες που καταδεικνύονται τα φύλλα γραφενίου είναι ίδιες ή ανώτερες από τους νανοσωλήνες. Χρησιμοποιώντας τα ίδια πολυμερή, δημιουργήθηκαν δύο σύνθετα υλικά, που το πρώτο περιέχει 1 τοις εκατό κατά βάρος των νανοσωλήνων άνθρακα, και το δεύτερο να περιέχει το ίδιο ποσό γραφενίου. Προσθήκη γραφενίου στο πολυμερές το καθιστά το 80 τοις εκατό σκληρότερο, ενώ οι νανοσωλήνες άνθρακα, λίγο περισσότερο από το 50 τοις εκατό πιο σκληρό. Το σύνθετο γραφένιο θα μπορούσε να αντέξει 30 βαθμούς Κελσίου περισσότερο, σε σύγκριση με το σκέτο πολυμερές, ενώ οι νανοσωλήνες άνθρακα δεν αυξάνουν τη σταθερότητα της θερμοκρασίας.



1.3.21. Το γραφένιο στην κατασκευή εύκαμπτων οθονών και κυκλωμάτων

Το γραφένιο είναι εύκαμπτο και εξαιρετικά καλός αγωγός του ηλεκτρισμού. Επίσης, είναι ένα υλικό πιο σκληρό κι από το διαμάντι. Θα μπορούσε λοιπόν να βρει χρήση σε εύκαμπτες οθόνες του υπολογιστή, σε μοριακά ηλεκτρονικά και σε νέες ασύρματες επικοινωνίες.

Η κατασκευή φύλλων γραφενίου υψηλής ποιότητας είναι συνήθως μια αργή, επίπονη διαδικασία, όμως τελευταία αρκετές ερευνητικές ομάδες έχουν ανακαλύψει τρόπους για να φτιαχτούν κυκλώματα γραφενίου, χρησιμοποιώντας τεχνικές δανεισμένες από την κατασκευή μικροσίπ για μαζική παραγωγή.

Τα στρώματα του γραφενίου, άτομα άνθρακα διατεταγμένα σε ένα σχήμα κυψελοειδούς δομής από εξάγωνα πάχους ενός μόλις ατόμου, μπορούμε να τα πάρουμε εύκολα από τη μύτη ενός μολυβιού αν χρησιμοποιήσουμε μια κολλητική ταινία. Αντίθετα, η νέα τεχνική αναγκάζει τα άτομα του άνθρακα, μέσα σε ατμούς υδρογονανθράκων, να κολλήσουν πάνω σε μια επιφάνεια νικελίου και έτσι να σχηματίσουν εξάγωνα, τη γνωστή μορφή του γραφενίου. Εν συνεχεία χρησιμοποιώντας τεχνικές που συναντάμε στην κατασκευή των τσιπ χαράσσονται ολοκληρωμένα κυκλώματα πάνω στην επιφάνεια νικελίου. Καθώς σχηματίζονται στρώματα γραφενίου, αυτά παίρνουν το σχήμα του κυκλώματος που θέλουμε, αναφέρουν ερευνητές στο περιοδικό Nature.

"Η ανακάλυψη ενός κατάλληλου υλικού που να είναι διαφανές, αγωγίμο και λεπτό είναι ο μεγάλος στόχος", λέει ο Philip Kim, ένας από τους ερευνητές και φυσικός της συμπυκνωμένης ύλης στο Πανεπιστήμιο Κολούμπια. Ο Kim και οι συνάδελφοί του έδειξαν ότι το γραφένιο που σχηματίζεται από την απόθεση χημικού ατμού, διατηρεί εξαιρετικές ηλεκτρικές ιδιότητες ακόμη και όταν λυγίζεται.

Τα τελικά φύλλα γραφενίου πάνω σε πολυμερές πλαστικό έχουν τόσο μικρό πάχος ώστε να παραμένουν διαφανή και να μπορούν να κάμπτονται ή να τεντώνονται, ανάλογα με το πολυμερές που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή τους. Η νέα τεχνική θα μπορούσε να αξιοποιηθεί αρχικά για την ανάπτυξη ελαστικών οθονών, στις οποίες το γραφένιο θα υποκαθιστά το ακριβό και άκαμπτο οξειδίο τιτανίου-ίνδιου. Αργότερα, όταν θα υπάρχουν τεχνικές για την παραγωγή ποιοτικών φύλλων γραφενίου σε μεγάλες διαστάσεις, ο άνθρακας θα αρχίσει να αντικαθιστά το πυρίτιο σε όλες τις εφαρμογές της ηλεκτρονικής, προβλέπει ο ερευνητής.

1.3.22. Γραφένιο και μπαταρίες

Το γραφένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει την χωρητικότητα, τον ρυθμό φόρτισης και την διάρκεια ζωής των μπαταριών. Οξειδίο του γραφενίου χρησιμοποιείται για να αυξήσει την χωρητικότητα των μπαταριών έως και 10 φορές, φροντίζοντας ταυτόχρονα να μην πέφτει ευτή μετά από κάθε κύκλο φόρτισης. Αυτό μπορεί να έχει μεγάλη επίδραση στα ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα, μειώνοντας το κόστος από την αντικατάσταση των μπαταριών και κάνοντας τα έτσι πιο προσιτά. Ηλεκτρονικές



συσκευές θα έχουν ίσως την δυνατότητα να φορτίζονται μέσα σε δευτερόλεπτα, ενώ η μπαταρία τους θα διαρκεί πολύ περισσότερο.

1.3.23. Ύφανση

Δημιουργήθηκε ένα νέο υλικό, το οξειδίο του γραφενίου, που μπορεί να διπλωθεί, να ζαρωθεί και, μέχρι ενός σημείου, να τεντωθεί. Αλλά παρόλο ότι έχει το ίδιο πάχος με το συνηθισμένο χαρτί (μόλις ένα χιλιοστό του χιλιοστού) είναι πολύ δύσκαμπτο και εξαιρετικά ανθεκτικό, ισχυρίζονται οι εφευρέτες του. Επιπλέον, θεωρούν ότι το υλικό που βασίζεται σε μια ένωση του άνθρακα μπορεί να προσαρμοστεί για πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης και της μοριακής αποθήκευσης, σαν ιοντικού αγωγού και σαν υπερπυκνωτή.

Μια ομάδα από το Βορειοδυτικό Πανεπιστήμιο στο Σικάγο συμπεριλαμβανομένου και του Rodney Ruoff έχει ανακαλύψει ότι μεγάλες ποσότητες οξειδωμένου γραφενίου μπορούν να 'υφανθούν' μαζί, δημιουργούν έναν νέο τύπο "χαρτιού" που είναι πιο δύσκαμπτο και ισχυρότερο από άλλα λεπτά υλικά. Συγκεκριμένα δημιούργησαν το νέο υλικό από επικαλυπτόμενα φύλλα οξειδίου του γραφενίου, ενωμένα όπως τα κεραμίδια μιας στέγης χάρη σε δεσμούς υδρογόνου. Επίσης, διπλώνεται σχετικά εύκολα αλλά σκίζεται πολύ δύσκολα.

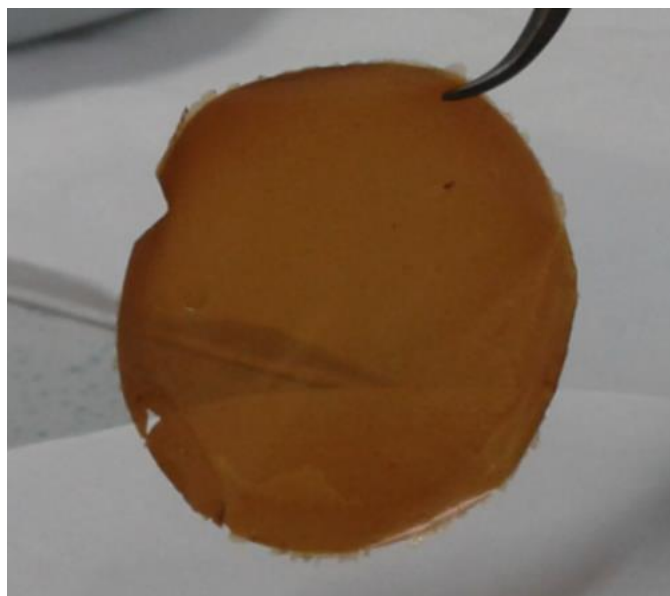
"Το όνειρό μου ήταν να αποσυνθέσω το γραφίτη σε μεμονωμένα φύλλα, και έπειτα να συγκεντρώσω εκ νέου αυτά τα φύλλα με διαφορετικούς τρόπους", λέει ο Ruoff.

Για να το καταφέρει άρχισε με την οξειδωση του γραφίτη, με σκοπό να αντικαταστήσει κατά προσέγγιση τα μισά από τα άτομα άνθρακα με άτομα οξυγόνου. Όταν το οξειδίο του γραφίτη αναμιγνύεται με νερό, αυτά τα άτομα του οξυγόνου απωθούν τα μόρια του νερού, αναγκάζοντας τα μεμονωμένα στρώματα - του οξειδίου του γραφενίου - να διασκορπιστούν ή να γίνουν "φύλλα". Οι ερευνητές ακολούθως φίλτραραν αυτό το μίγμα (με τα φύλλα) με τη βοήθεια μιας μεμβράνης, η οποία συλλέγει τα στρώματα με μια τέτοια ρύθμιση ώστε παραγάγει οξειδίο του γραφενίου λεπτό σαν χαρτί.

Ο κανονικός γραφίτης έχει μια λεπτή δομή, που χρειάζεται μόνο μια μικρή πλευρική δύναμη για να διασπαστεί σε κανονικά λεπτά στρώματα. Αντιθέτως, τα στρώματα στο οξειδίο του γραφενίου αναμειγνύονται το ένα με το άλλο και ρυτιδώνουν στις μεγαλύτερες κλίμακες. Αυτό επιτρέπει στο φορτίο να κατανεμηθεί σε όλη τη δομή, γι αυτό και η δομή αυτή γίνεται πιο ισχυρή από το φύλλο του γραφίτη και το φύλλο από νανοσωλήνες άνθρακα. Στην πραγματικότητα, ισχυρίζεται ο Ruoff, το μόνο ισχυρότερο υλικό θα μπορούσε να είναι το διαμάντι.

Η περιπλεγμένη δομή αφήνει, επίσης, μεμονωμένη μετατόπιση των στρωμάτων το ένα πάνω από το άλλο, έτσι ώστε τα συλλογικά στρώματα να γίνονται εύκαμπτα. Αλλά το πιο σπουδαίο είναι ότι το χαρτί μπορεί χημικά να συντονιστεί με την αλλαγή της ποσότητας του οξυγόνου στα στρώματα. Η μείωση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο, παραδείγματος χάριν, θα το έκανε μονωτή μέσα σε έναν καλό αγωγό, έτσι η ηλεκτρική

αγωγιμότητα των υλικών αυτών στο μέλλον θα είναι δυνατόν να ρυθμιστεί κατά βούληση. Επιπλέον, το ειδικό αυτό χαρτί θα μπορούσε να εμποτιστεί με πολυμερή, κεραμικά ή μέταλλα, για να κάνει σύνθετα υλικά που να ξεπερνούν σε πολύτιμες ιδιότητες τα καθαρά αντίστοιχά τους.



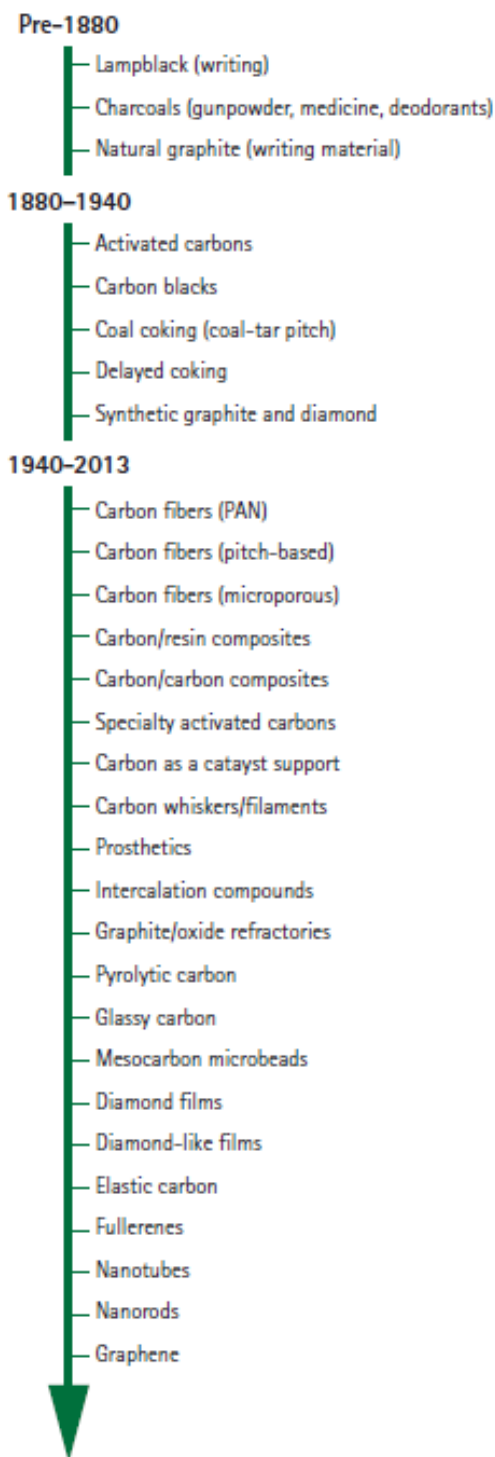
Εικόνα 10 : Φίλμ οξειδίου του γραφενίου

1.3.24. Το λεπτότερο μπαλόνι του κόσμου

Χρησιμοποιώντας το γραφένιο, ερευνητές του Πανεπιστημίου Cornell στις ΗΠΑ δημιούργησαν μια μεμβράνη σαν μπαλόνι που έχει πάχος μόνο ένα άτομο, αλλά είναι αρκετά δυνατή ώστε να αντέχει σε εσωτερικές πιέσεις αρκετών ατμοσφαιρών. Σε αντίθεση με τα λαστιχένια μπαλόνια, τα οποία ο αέρας διαρρέει, έστω και με μικρή ταχύτητα, το μπαλόνι από γραφένιο είναι τόσο αδιαπέραστο ώστε συγκρατεί ακόμα και τα πολύ μικρά άτομα του αέριου ήλιου. Παραδόξως, η κατασκευή του μπαλονιού δεν ήταν ιδιαίτερα δύσκολη. Οι επιστήμονες γνώριζαν εδώ και χρόνια ότι μπορούν να απομονώσουν φύλλα γραφενίου απλά τοποθετώντας μια κολλητική ταινία πάνω σε καθαρό γραφίτη. Όταν η ταινία αφαιρεθεί και κολλήσει για λίγο σε μια πλάκα διοξειδίου του άνθρακα, αφήνει πίσω της στρώματα γραφενίου με πάχος από ένα έως μερικά άτομα. Η ανακάλυψη, που δημοσιεύεται στο Nano Letters, θα μπορούσε να έχει εφαρμογές σε έρευνες Βιολογίας και Επιστήμης Υλικών.

1.3.25. Εξέλιξη ανθρακικών προϊόντων

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα στο οποίο φαίνονται τα ανθρακικά προϊόντα που παράχθηκαν και σε ποιο έτος πρωτοέγινε η παραγωγή τους [5-10].



Εικόνα 11 : Εξέλιξη ανθρακικών προϊόντων



1.3.26. Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] Μίαρης Α. (2014), *Μελέτη ιδιοτήτων εκπομπής πεδίου τρισδιάστατων καθόδων Οξειδίου του Γραφενίου*. Λήφθηκε από <http://www.physics.ntua.gr/gr/dpms/diplomatikes/miaris.pdf>
- [2] Παπαγγελής Κ. (2010), Το γραφένιο στην...Ελλάδα. *Εφημερίδα το Βήμα*, Λήφθηκε από <http://www.tovima.gr/editors/editor/?edid=4671>
- [3] I.A. Ovid'ko (2013). MECHANICAL PROPERTIES OF GRAPHENE *Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences*, Λήφθηκε από http://www-proxy.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_13413/01_13413_ovidko.pdf
- [4] Jesus de La Fuente. (2018 Μάρτιος 22). What is graphene. Λήφθηκε από <https://www.graphenea.com/pages/graphene#.W0Hp4NlzY2w>
- [5] Jesus de La Fuente. (2018 Φεβρουάριος 13). The properties of graphene. Λήφθηκε από <https://www.graphenea.com/pages/graphene-properties#.W0HpCNlzY2z>
- [6] Jesus de La Fuente. (2017 Δεκέμβριος 25). What is graphene oxide. Λήφθηκε από <https://www.graphenea.com/pages/graphene-oxide#.W0HoptlzY2w>
- [7] PROPERTIES AND CHARACTERISTICS OF GRAPHITE (2018 Ιανουάριος 5). Λήφθηκε από <http://poco.com/Portals/0/Literature/Semiconductor/IND-109441-0115.pdf>
- [8] Σοφία Γιάχο (2017), *ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΥ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ ΣΕ ΠΟΡΩΔΕΣ ΜΕΣΟ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΕΛΑΪΚΗΣ ΦΑΣΗΣ*. Λήφθηκε από [file:///C:/Users/dennh/Downloads/Nemertes_Jaho\(chem_eng\).pdf](file:///C:/Users/dennh/Downloads/Nemertes_Jaho(chem_eng).pdf)
- [9] David Bradley (2012). *Is graphene safe?*. Λήφθηκε από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702112701013>
- [10] Peter W. Sutter, Jan-Ingo Flege and Eli A. Sutter. (2008). A Smarter Way to Grow Graphene. Λήφθηκε από <https://phys.org/news/2008-05-smarter-graphene.html>

1.4. Σύνθετα υλικά

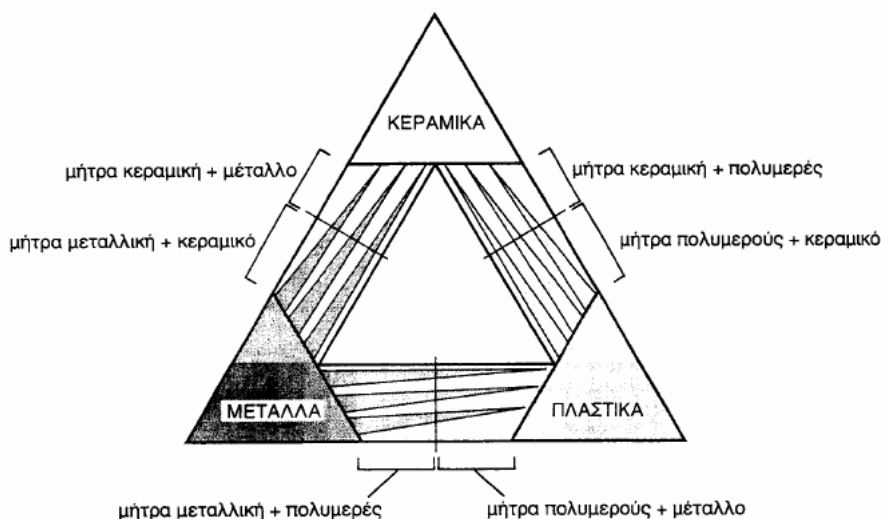
1.4.1. Εισαγωγή και ορισμός

Για ένα σύστημα ο όρος “σύνθετο” σημαίνει ότι τούτο αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material). Πιο ειδικά, σήμερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του.

Ορισμός (Agarwal–1990): Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.

Το ένα, από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

Στην εικόνα 12 παρουσιάζεται ο συνδυασμός ανά δύο των βασικών οικογενειών υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά και κεραμικά υλικά) και οι ομάδες συνθέτων που προκύπτουν.



Εικόνα 12 : Βασικές οικογένειες υλικών για ομάδες συνθέτων



1.4.2. Ιστορική εξέλιξη

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τον άνθρωπο από αρχαιοτάτων χρόνων. Υλικά που εύκολα βρίσκουμε στη φύση (ξύλο, πέτρα, πηλός, κόκαλα) χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα από τον άνθρωπο, ο οποίος σύντομα έμαθε να βελτιώνει τις ιδιότητες τους ενισχύοντας τα υλικά αυτά με πρόσθετα συστατικά. Για παράδειγμα, οι Αιγύπτιοι (5000 π.Χ.) χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα άχυρων, με αποτέλεσμα τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Επίσης, παρατήρησαν ότι οι πλάκες από πολύστρωτες βέργες ξύλου, παρουσίαζαν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από το φυσικό ξύλο έναντι στρέβλωσης που οφειλόταν στην απορρόφηση υγρασίας. Στη Μεσοποταμία (1000 π.Χ.) εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων με σκοπό τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών. Η χρήση της σιδηρόβέργας για προεντεταμένο σκυρόδεμα, που χρησιμοποιείται στις οικοδομές της σύγχρονης εποχής, δεν είναι παρά η μετεξέλιξη της τεχνικής της ανάμιξης γύψου με ζωικό τρίχωμα, η οποία ήταν μια πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής στους αναπτυσσόμενους πολιτισμούς. Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και επρόκειτο για μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland. Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών υπήρξε ραγδαία και συνδυάστηκε με την προηγούμενη ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών γυαλιού και των υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου (1960) και την έντονη τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και διαστημοπλοίων. Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, αρχικά σε μικρές ποσότητες, οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι οποίες τελευταία αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ενισχύσεις στις αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές. Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές. Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 χρόνια, π.χ. η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-14πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο). Τα σύνθετα υλικά καλύπτουν μεγάλο μέρος των εφαρμογών των νέων τεχνολογιών αιχμής στις κατασκευές και έχουν μεταβάλει σημαντικά τις ακολουθούμενες διαδικασίες σχεδίασης, παραγωγής, ελέγχου και συντήρησης. Η μεγάλη ποικιλία ινών και ρητινών, καθώς και οι διάφορες μέθοδοι κατασκευής παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να επιλέξει το πιο κατάλληλο σύστημα υλικών που καλύπτει τις απαιτήσεις του, σύστημα που έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες, που πολλές φορές μπορεί να είναι και μοναδικά. 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 και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους



παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Μερικά μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών, όπως: τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά, η ιδιαίτερη και πολλές φορές ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος (θαλάσσιο περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες, χημικό περιβάλλον, κλπ.) καθώς και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος, βαθμιαία αντιμετωπίζονται πιο αποτελεσματικά μέσω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης στην παραγωγή νέων και καλλίτερων ινών, ρητινών και εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής.

1.4.3. Ταξινόμηση

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

- Ινώδη σύνθετα (fibrous composites): Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας.
- Στρωματικά σύνθετα (laminated composites): Με επάλληλες στρώσεις υλικών.
- Κοκκώδη σύνθετα (particulate composites): Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις.

Η ιδιότητα αυτή οδηγεί άμεσα σε ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών συνθέτων στις ακόλουθες υπο-ομάδες :

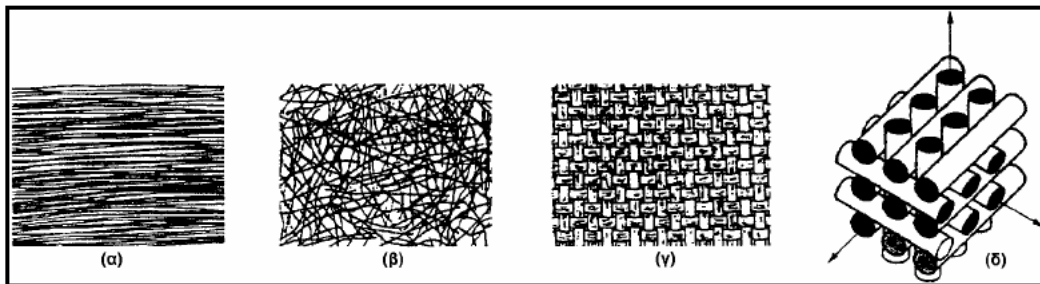
- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.
- Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση.

Μία επιπλέον διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως:

- Αυνεχείς ή μεγάλοι μήκους ίνες (continuous fibers), όταν είναι $l / d \geq 100$.
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers), όταν είναι $l / d < 100$.

- Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers): Με $d < 1\mu\text{m}$ και $l \cong 100\mu\text{m}$ (πρόκειται για λεπτούς
- μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).

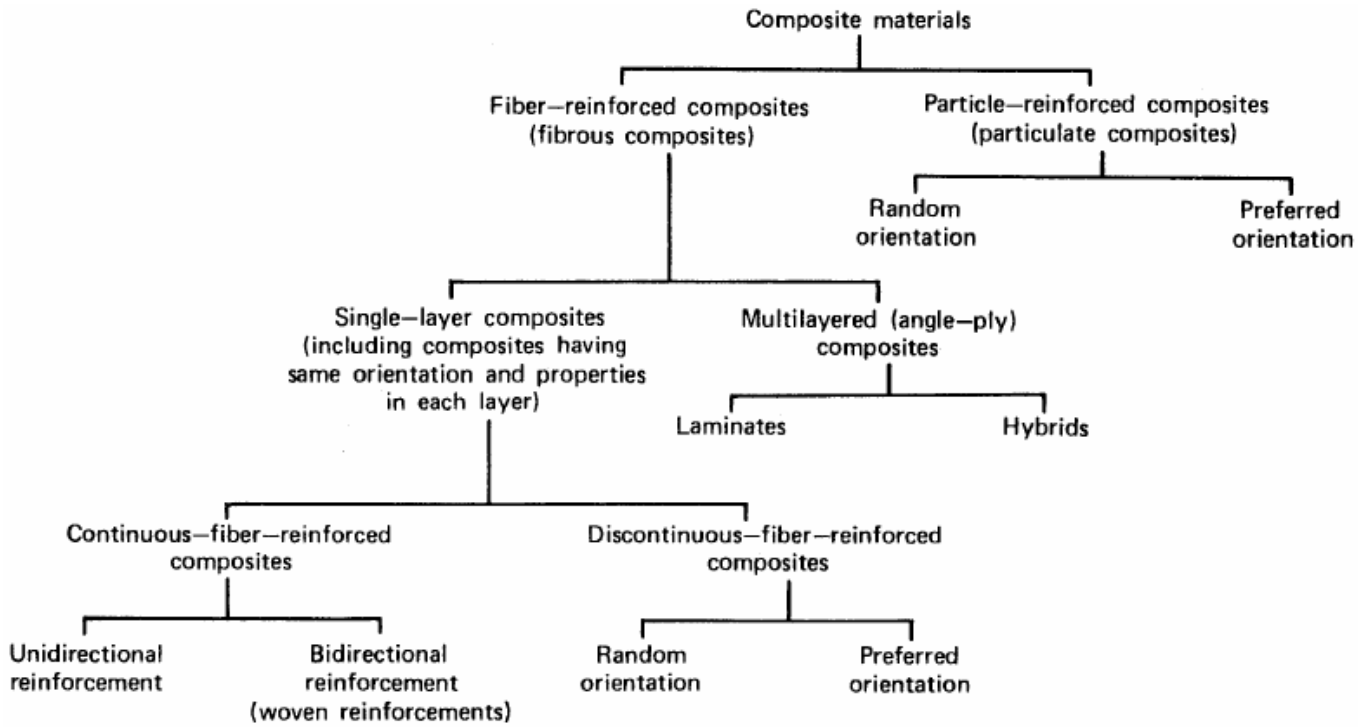
Σημείωση : Οι κοντές ίνες, λόγω του μικρού μήκους τους, δεν χρησιμοποιούνται ως μονοδιευθυντική ενίσχυση, αλλά εφαρμόζονται συνήθως με τη μορφή πλέγματος ινών τυχαίας διεύθυνσης.



Εικόνα 13 : Πλέξη ινών

Στην εικόνα 13 φαίνονται οι τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη.

Με βάση όσα έχουν ήδη αναφερθεί για τις κατηγορίες των συνθέτων υλικών, έχει καθιερωθεί η ταξινόμηση τους, όπως φαίνεται στην εικόνα 14 [1].



Εικόνα 14 : Σύνθετα υλικά

1.4.4. Κοκκώδη σύνθετα

Τα κοκκώδη σύνθετα έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών. Το πιο συνηθισμένο από όλα είναι το σκυρόδεμα, ένα μείγμα από σκόνη τσιμέντου, νερό και ενισχυτικά υλικά όπως χαλίκια, πέτρες και άμμο. Το μείγμα τσιμέντου με νερό έχει τον ρόλο της μήτρας, συγκρατώντας τα ενισχυτικά υλικά. Τα ενισχυτικά υλικά τοποθετούνται στο μείγμα, ώστε να προσδώσουν συγκεκριμένες επιθυμητές ιδιότητες.

System	Application	Ingredients
Paint	Spreadable surface coating	Mixture of solvent, opaque particles, and polymer such as an acrylic emulsion
Ink	Printing on paper	Small graphite particles in a mixture of solvent and polymer
Porcelain	Dishes, dental crowns, electrical insulators	Mixture of oxide ceramic crystals and glass phases
Electrical contacts	Make-break circuit switches	Arc resistant refractory phase (W, WC, Mo) and high electrical conductivity phase (Ag, Cu)
Heat sinks	Redistribution of heat in computers, rocket engines, high intensity lighting	High conductivity phase (Cu, Ag) with low thermal expansion phase (W, Mo, WC)
Brake pads	Transformation of kinetic energy into heat to stop mechanical systems	Mixtures of graphite, polymers, metals, and ceramics
Electromagnetic shields	Absorption of radio wave interference in devices such as computers	Polypropylene or other polymers with electrically conductive dispersed conductors of nickel and graphite
Permanent magnets	Flexible magnets for use in headphones, stereo speakers, electric motors	Polymer mixed with high capacity magnetic compound
Correction fluid	Opaque cover up for typographical errors or drawing mistakes on paper	White titania (TiO ₂) particles dispersed in a solvent-softened polymer
Cemented carbide	Provide hard surfaces for drawing, machining, drilling, shearing, extrusion of metals	Interlocked network of hard carbide (WC) particles in a tough metal matrix (Co)
Wear resistant aluminum	Air conditioner rotors, endurance horseshoes, sporting equipment	Mixture of hard silicon carbide (SiC) particles in aluminum alloy matrix
Inertial weights	Selective mass to balance gyroscopes, aircraft wings, helicopter rotors, vibrators, fishing, and golf club weights	Composite consisting of mostly tungsten (W) mixed with transition metals, such as Cu, Fe, Ni, Mn, Co
Low toughness projectiles	Lead-free frangible ammunition where the bullet has sufficient strength for firing but disintegrates on target impact	Variants include tungsten (W) bonded with nylon or copper (Cu) bonded with tin (Sn)
Foamed ceramic	Insulation for high temperature heating pipes with low thermal conductivity up to 1000 °C	High porosity foamed hydrous calcium silicate with a density near 0.2 g/cm ³

Πίνακας 6 : Παραδείγματα κοκκώδων συνθέτων



Τα κοκκώδη σύνθετα προσφέρουν μεγάλη ευελιξία δημιουργίας. Οι δομές που μπορούν να κατασκευαστούν είναι από απλές μέχρι σύνθετες, χωρίς μεγάλη αύξηση του κόστους κατασκευής. Η μεταφορά φορτίου από την μήτρα στην ενισχυτική φάση είναι παρόμοιας ικανότητας με αυτή των ινώδων σύνθετων, με το πλεονέκτημα της ισοτροπίας. Το κόστος κατασκευής για τα κοκκώδη σύνθετα είναι γενικά μικρότερο από τα ινώδη. Λόγω της μικρής ηλικίας των κοκκώδων συνθέτων, χρειάζεται περισσότερος χρόνος για να αποδειχθούν κατάλληλα για οποιαδήποτε εφαρμογή. Αυτό αυξάνει το κόστος του σχεδιασμού, λόγω των πολλών πειραμάτων, κάτι που δεν συμβαίνει σε ευρέως διαδεδομένα υλικά. Οι δυνατότητες βελτίωσης, ωστόσο, που έχουν τα κοκκώδη σύνθετα, σε συνδυασμό με τις ήδη εξαιρετικές ιδιότητές τους, αυξάνουν την δημοτικότητά τους και συγκεντρώνουν ολοένα και περισσότερο το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας [2].

1.4.5. Μήτρα

Ο ρόλος της μήτρας συνίσταται σε:

- 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 ικανοποιεί το ρόλο, με τον οποίο είναι επιφορτισμένη η μήτρα, πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

- Ολκιμότητα.
- Ανθεκτικότητα.
- Σχετική ευκαμψία.
- 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. Τέλος, για τη σωστή λειτουργία του συνθέτου υλικού, καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας – μήτρας.

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

- Οργανικές.
- Μεταλλικές.
- Κεραμικές.

Η επιλογή κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του συνθέτου. Μία γενική οδηγία αναφορικά με τα θερμοκρασιακά όρια για κάθε ομάδα υλικών παρουσιάζεται στην εικόνα 21.



Εικόνα 15 : Υλικό μήτρας και θερμοκρασία

Τα αντίστοιχα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται με τις ακόλουθες συντμήσεις:

- PMC: Polymer Matrix Composite
- MMC: Metal Matrix Composite
- CMC: Ceramic Matrix Composite

1.4.6. Οργανικές μήτρες

Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε:

(α) Θερμοπλαστικές: Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Παρουσιάζουν δομή, όπου οι μοριακές αλυσίδες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, που λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή όμως διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω του χαμηλού τους κόστους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Ως ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμίαντος, μαρμαρυγίες, κ.α.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.

(β) Θερμοσκληρυνόμενες: Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Τέτοιες μήτρες είναι:



- Πολυεστερικές ρητίνες που ενισχύονται με ίνες γυαλιού.
- Εποξυδικές ρητίνες με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200 °C, καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες από τις προηγούμενες και χρήση στη αεροναυπηγική.
- Φαινολικές ρητίνες, οι οποίες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400 °C.

1.4.7. Μεταλλικές μήτρες

Μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υλικά μήτρες προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα. Για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μήτρων, αφού η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών μήτρων είναι πολύ χαμηλή (~300 °C), ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 500 °C. Σε σχέση με τις οργανικές μήτρες, οι μεταλλικές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα, τα σπουδαιότερα των οποίων φαίνονται στον πίνακα 12.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<ul style="list-style-type: none">• Μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες.• Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων του συνθέτου σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διευθύνσεις διαφορετικές από αυτές του προσανατολισμού των ινών.• Βελτίωση της ακαμψίας και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου.• Μείωση της ευαισθησίας του συνθέτου στην παρουσία διαλυτών και διεύρυνση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του συνθέτου.• Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του συνθέτου για ειδικές εφαρμογές.• Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων του συνθέτου υλικού (συγκόλληση, κόλληση).	<ul style="list-style-type: none">• Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα που οδηγεί στη μικρορωγμάτωση και τη θραύση των ινών.• Μεγαλύτερη πυκνότητα και επομένως μεγαλύτερο βάρος της συνολικής κατασκευής.• Φαινόμενα διάλυσης ινών στη μήτρα, σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. διάλυση ινών SiO₂ σε μήτρα Al).• Ασυνέχεια της καμπύλης εφελκυσμού των συνθέτων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας.• Δύσκολη παραγωγή συνθέτου υλικού και μεγαλύτερο κόστος.

Πίνακας 7 : Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεταλλικών ινών

1.4.8. Κεραμικές μήτρες

Τα κεραμικά υλικά είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και την χημική προσβολή. Στην περίπτωση της κεραμικής μήτρας, οι ίνες αποβλέπουν αφενός στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αιφνιδιασμούς και αφετέρου στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής.



Η ολκιμότητα και το ποσοστό των ινών επιδρούν ευνοϊκά στη βελτίωση της αντοχής της μήτρας. Το σημαντικότερο πρόβλημα στη χρήση κεραμικών μητρών εντοπίζεται στη συνάφεια ινών– μήτρας και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ινών.

Μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν, επίσης, οι μήτρες άνθρακα, ενώ ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο. Είναι γνωστές οι οικοδομικές κατασκευές τσιμέντου με ενίσχυση χάλυβα (οπλισμένο σκυρόδεμα), ινών αμιάντου (ελενίτ), ινών γυαλιού, καθώς επίσης και οι κατασκευές από γύψο με ενίσχυση ινών γυαλιού ή αμιάντου.

1.4.9. Τελική επιλογή υλικών

Στους πίνακες 13-15 δίνονται παραδείγματα των συνηθέστερων συνθέτων υλικών οργανικής, μεταλλικής και κεραμικής μήτρας με ενίσχυση διαφόρων τύπων ινών και οι εφαρμογές τους στην κατασκευαστική βιομηχανία [1].

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Εποξειδική	Kevlar	Αεροναυπηγική και ναυπηγική βιομηχανία. Βιομηχανία αθλητικών ειδών (ρακέτες τένις, μπαστούνια golf, είδη τοξοβολίας, καλάμια ψαρέματος)
Πολυεστερική	Γραφίτη	Αεροναυπηγική και αυτοκινητο - βιομηχανία. Μέρη αεροσκαφών, πλοιαρίων και αυτοκινήτων, μικρού βάρους και υψηλής αντοχής σε διάβρωση.
Πολυμερική	Γυαλιού	Αθλητικός εξοπλισμός

πίνακας 8 : Εφαρμογές ινών

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Al	Borsic	Πτερύγια στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών.
	Al ₂ O ₃	Εμβόλα μηχανών Diesel.
	SiC	Πτερύγια εκτόξευσης βλημάτων.
	Γραφίτη	Ιστοί κεραίων τηλεσκοπίου Hubble.
Κραμάτων Cu	SiC	Υψηλής αντοχής προπέλες σκαφών.
Κράματα Ti και W	SiC & B ₄ N	Πτερύγια και δίσκοι στροβίλων.

πίνακας 9 : Εφαρμογές ινών



ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Άνθρακα	Άνθρακα	Μέρη αεροσκαφών και διαστημοπλοίων υψηλών προδιαγραφών (επιτρεπτή η λειτουργία ως τους 3000 °C). Δισκόφρενα σε αγωνιστικά αυτοκίνητα
Al ₂ O ₃ , SiC, ZrO ₂ , Si ₃ N ₄ και κεραμικά γυαλιά	Al ₂ O ₃ & SiC	Αγωγοί εναλλακτών θερμότητας, συστήματα θερμομόνωσης.

πίνακας 10 : Εφαρμογές ινών

1.4.10. Επίδραση του γραφενίου στο αλουμίνιο

Η υπάρχουσα βιβλιογραφία, λαμβάνοντας υπόψη την σχετικά πρόσφατη ανακάλυψη του γραφενίου, δεν είναι εκτενής. Τα περισσότερα δημοσιευμένα άρθρα είναι εντός της τελευταίας δεκαετίας, ενώ το γραφένιο και συγκεκριμένα η επίδραση που έχει σε μεταλλικές μήτρες αλουμινίου δεν είναι ευρέως μελετημένη. Ωστόσο από τις έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σε χυτά σύνθετα αλουμινίου-γραφενίου έχουν λάβει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα η εξέταση της μηχανικής συμπεριφοράς σύνθετων αλουμινίου γραφενίου για συγκεντρώσεις γραφενίου 0,1% κ.β. και 0,2% κ.β. έχουν καταλήξει στα παρακάτω συμπεράσματα.

Ως προς την μικροσκοπική δομή του χυτού σύνθετου :

- Η προσθήκη γραφενίου επηρεάζει τόσο την επιφάνεια, όσο και την χημική σύνθεση των δενδριτικών περιοχών.
- Δεν επηρεάζεται η διασπορά ούτε το μέγεθος των πόρων από την προσθήκη γραφενίου σε μεταλλική μήτρα αλουμινίου.
- Το μέσο μήκος των δενδριτικών περιοχών, επηρεάζεται από την προσθήκη γραφενίου και εξαρτάται από την ποσότητα αυτού.
- Υπάρχει σχηματισμός ενώσεων Al₄C₃, με προσθήκη γραφενίου περισσότερο από 0,1% κ.β., στα όρια των κόκκων.

Ως προς τις μηχανικές αντοχές του :

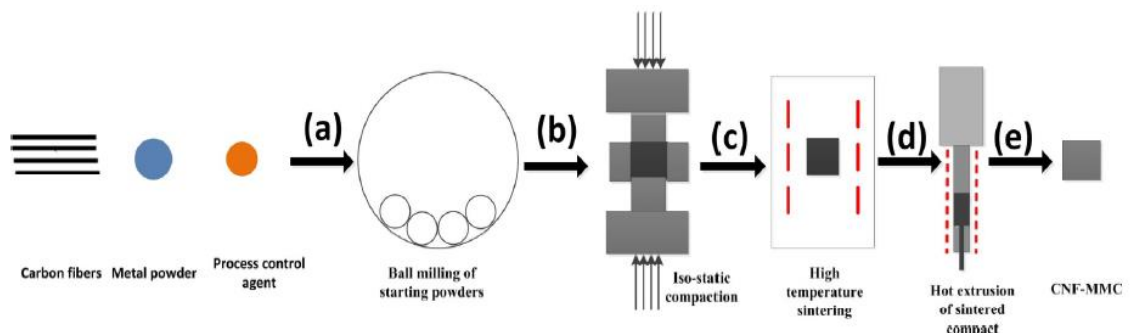
- Η αντοχή(UTS) του συνθέτου αυξάνεται, με ταυτόχρονη μείωση της παραμόρφωσης θραύσης για σύνθετα 0,1% κ.β. γραφενίου.
- Η κάμψη παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με τον εφελκυσμό.
- Λόγω του μεγαλύτερου μέσου μήκους και του στρογγυλεμένου σχήματος των δενδριτικών περιοχών των συνθέτων με 0,2% κ.β. σε γραφένιο, σε συνδυασμό με ενώσεις Al₄C₃ που σχηματίζονται, το σύνθετο πραγματοποιεί θραύση πιο γρήγορα, υποδεικνύοντας μιο πιο ψαθυρή συμπεριφορά [4-7].

1.4.11. Μέθοδοι δημιουργίας συνθέτων αλουμινίου-γραφενίου

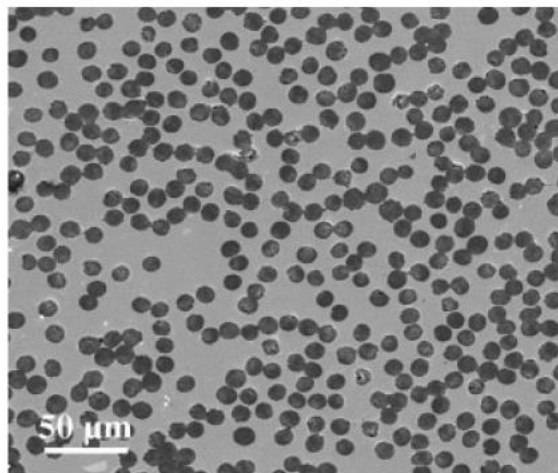
Οι διαφορετικές μέθοδοι μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες [3] :

a) Μέθοδοι στερεάς κατάστασης

- Κονιομεταλλουργία : είναι από τις πιο οικονομικές και εύκολες μεθόδους. Το μείγμα αναδεύεται έως καλή διασπορά των γραφενίων. Στην συνέχεια εισάγεται στο καλούπι και συμπιέζεται υπό συγκεκριμένες θερμοκρασιακές συνθήκες. Η μέθοδος αυτή μπορεί να είναι αποτελεσματική για συγκεντρώσεις 0,1 έως 50% κατά όγκο σε γραφένιο.

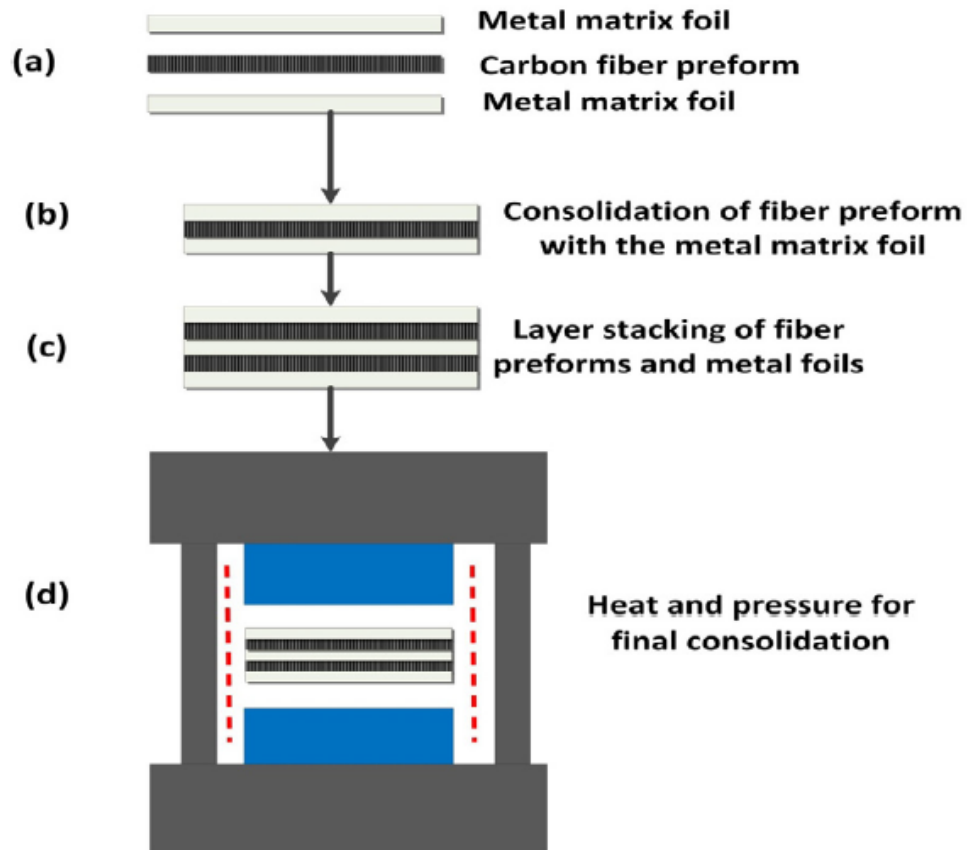


Εικόνα 16 : Βήματα κατασκευής συνθέτου αλουμινίου-γραφενίου με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας



Εικόνα 17 : Μικρογράφημα επιφάνειας 35% σε γραφένιο κατά όγκο, κατασκευασμένου με μεταλλουργία

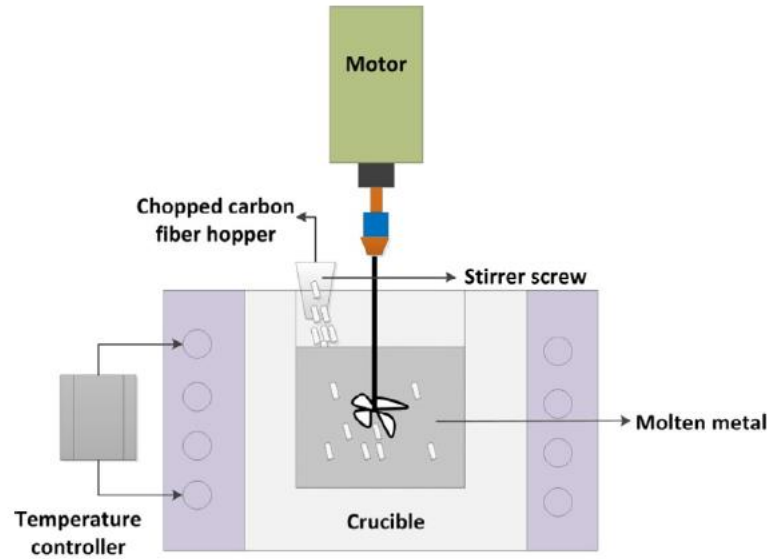
- Συγκόλληση διάχυσης (diffusion bonding) : οι δομές γραφενίου εισάγονται ενδιάμεσα από φύλλα αλουμινίου σε επιθυμητό προσανατολισμό. Με συνδυασμό θερμοκρασίας και πίεσης τα υλικά συγκολλούνται μετά το πέρας ενός χρονικού διαστήματος. Γίνεται και σε χαμηλότερη θερμοκρασία, με το κόστος να ανεβαίνει λόγω των υψηλών απαιτήσεων των εργαλείων.



Εικόνα 18 : Βήματα κατασκευής σύνθετου αλουμινίου-γραφενίου με τη μέθοδο συγκόλλησης διάχυσης

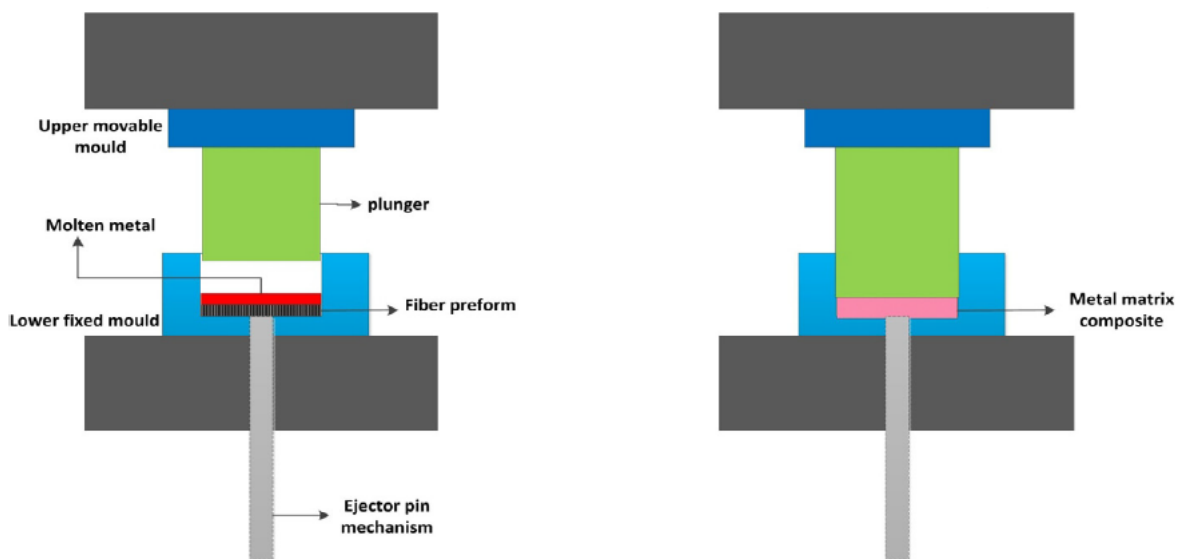
b) Μέθοδοι υγρής κατάστασης

- **Ανάδευση τήγματος :** η απλότητα αυτής της μεθόδου έχει ως αποτέλεσμα την εφαρμογή της από ακαδημαϊκά ιδρύματα αλλά και από βιομηχανίες. Το μείγμα αναδεύεται πολλές φορές ώστε να εξασφαλιστεί η καλή διασπορά των νανοδομών και χυτεύεται σε επιθυμητές γεωμετρίες.



Εικόνα 19 : Βήματα κατασκευής σύνθετου αλουμινίου-γραφενίου με τη μέθοδο ανάδευσης τήγματος

- Χύτευση υπό πίεση : το ενισχυτικό γραφένιο βρίσκεται μέσα στο καλούπι και το χυτό αλουμίνιο εισάγεται υπό πίεση. Επιτυγχάνονται πολύ καλές ιδιότητες γεωμετρίας και πορόδους, ωστόσο αυξάνεται και η δυσκολία της μεθόδου.



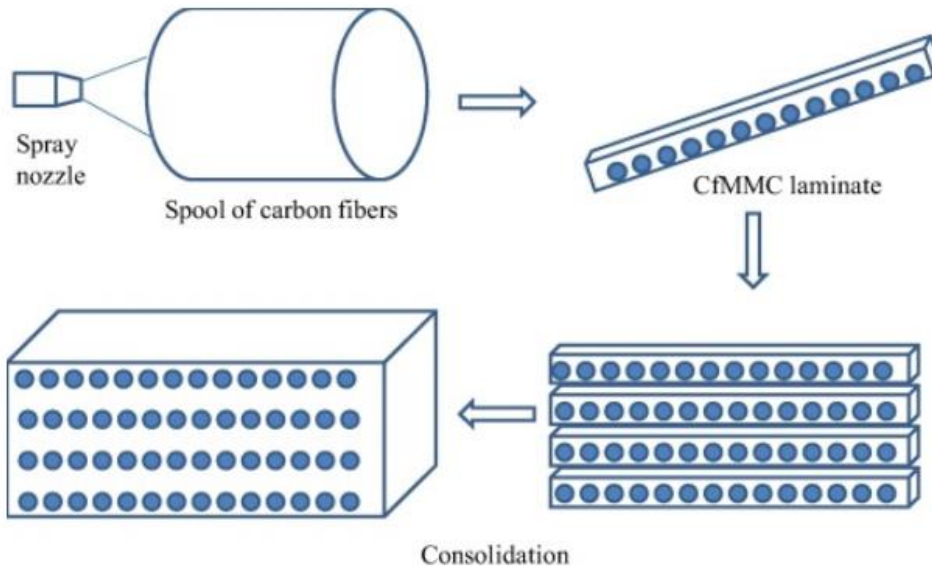
Εικόνα 20 : Βήματα κατασκευής σύνθετου αλουμινίου-γραφενίου με τη μέθοδο χύτευσης υπό πίεση

- Στην χύτευση υπό βαρύτητα το σύνθετο μπορεί να εμφανίσει ελαττώματα κακής συνάφειας καθώς και σχηματισμό ανεπιθύμητων ενώσεων.

c) Μεθόδοι εναπόθεσης

- Φυσική εναπόθεση ατμών : κατασκευάζονται ίνες γραφενίου με επικάλυψη αλουμινίου, μέσω της τήξης του μετάλλου με την βοήθεια πλάσματος. Οι ίνες μπορούν μετά μέσω συγκόλληση διάχυσης να εισαχθούν σε αλουμινένια

μήτρα, με κύριο πλεονέκτημα την δυνατότητα εφαρμογής επιθυμητού προσανατολισμού [3].



Εικόνα 21 : Βήματα κατασκευής σύνθετου αλουμινίου-γραφενίου με μέθοδο εναπόθεσης. Οι ίνες ψεκάζονται με το υλικό μήτρας αφού τυλιχθούν σε κύλινδρο



1.4.12. Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] Δ.Μανωλάκος (2014). Μηχανική Σύνθετων Υλικων [Pdf διαφάνειες]. Λήφθηκε από <http://mycourses.ntua.gr/document/document.php>
- [2] Randall M. German (2016). *Particulate composites Fundamentals and Applications*. Λήφθηκε από DOI 10.1007/978-3-319-29917-4
- [3] Kamyar Shirvanimoghaddam, Salah U. Hamim, Mohammad Karbalaei Akbari, Seyed Mousa Fakhrhoseini, Hamid Khayyam, Amir Hossein Pakseresht, Ehsan Ghassali, Mahla Zabet, Khurram Shahzad Munir, Shian Jia, J. Paulo Davim, Minoo Naebe (2017). Carbon Fiber Reinforced Metal Matrix Composites: Fabrication Processes and Properties. *Elsevier, Part A 92*, 70-96.
- [4] H. Kwon, D.H. Park, J.F. Silvain, A. Kawasaki. (2010). Investigation of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composite materials. *Compos. Sci. Technol.*, 70, 546-550.
- [5] H. Kwon, M. Estili, K. Takagi, T. Miyazaki, A. Kawasaki. (2009). Combination of hot extrusion and spark plasma sintering for producing carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites, *Carbon*, 47, 570-577.
- [6] Georgios V. Seretis, Georgios Kouzilos, b, Aikaterini K. Polyzou, c, Dimitrios E. Manolakos, d and Christopher G. Provatidis. (2017). Effect of Graphene Nanoplatelets Fillers on Mechanical Properties and Microstructure of Cast Aluminum Matrix Composites, *Nano Hybrids and Composites*, 15, 26-35.
- [7] S.F. Bartolucci, J. Paras, M.A. Rafiee, J. Rafiee, S. Lee, D. Kapoor, N. Koratkar. (2011). Graphene-aluminum nanocomposites, *Mater. Sci. Eng., A* 528, 7933-7937.

1.5. ΧΥΤΕΥΣΗ

1.5.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Η χύτευση ανήκει στις αρχέγονες κατεργασίες (primary forming processes) και είναι μηχανική κατεργασία διατήρησης μάζας, όπου το προς μορφοποίηση υλικό που βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση διοχετεύεται σε μια προετοιμασμένη κοιλότητα, τον τύπο (αποτύπωμα ή καλούπι), και αφήνεται να στερεοποιηθεί αποκτώντας την επιθυμητή μορφή.

Για την προετοιμασία της κοιλότητας που θα υποδεχθεί το τηγμένο μέταλλο, στις περισσότερες μεθόδους χύτευσης, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ή πρότυπο (pattern).

- Εάν με την χύτευση προσδίδεται στο στερεό και το τελικό του σχήμα, τότε το στερεό ονομάζεται χυτό (casting).
- Εάν όμως το στερεοποιημένο σώμα πρόκειται να υποβληθεί σε κατεργασίες διαμόρφωσης (π.χ. έλαση ή σφυρηλάτηση) για να αποκτήσει τις επιθυμητές ιδιότητες και την τελική του μορφή, τότε ονομάζεται πλίνθωμα (ingot), η δε διαδικασία μορφοποίησης του (χύτευση πλινθώματος) ουσιαστικά αποτελεί ένα προκαταρκτικό στάδιο κατεργασιών διαμόρφωσης.

Παρόλο που κατασκευάζονται χυτά αντικείμενα από μη μεταλλικά υλικά (συνθετικές ύλες, θερμοπλαστικά υλικά, κεραμικά), η χύτευση έχει πρωτεύουσα σημασία στη παραγωγή μεταλλικών προϊόντων από σιδηρούχα (χυτοσίδηρος, χυτοχάλυβας) και μη σιδηρούχα (αλουμίνιο, χαλκός, ορείχαλκος, μαγνήσιο, ψευδάργυρος, κασσίτερος, μόλυβδος και κράματα αυτών) μέταλλα. Επισημαίνεται εδώ ότι τα βιομηχανικά κράματα ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες :

- τα κράματα χύτευσης (cast alloys)
- και τα κράματα διαμόρφωσης (wrought alloys).

Οι διαστάσεις των χυτών αντικειμένων ποικίλουν και καλύπτουν όλη την περιοχή από τεμάχια μεγέθους μερικών χιλιοστών και βάρους κλάσματος τού γραμμαρίου, όπως τα δόντια ενός φερμουάρ, μέχρι τεμάχια διαστάσεων 10 και πλέον μέτρων και βάρους πολλών τόνων, όπως π.χ. προπέλες πλοίων.

Με τη χύτευση κατασκευάζονται ακόμα και σύνθετες μορφές τεμαχίων που μερικές φορές είναι αδύνατο να κατασκευασθούν με άλλες μεθόδους κατεργασίας, π.χ. τεμάχια που έχουν κενούς χώρους, οπές, καμπυλότητες ή τεμάχια από μέταλλα που είναι δύσκολο να υποστούν μια περαιτέρω κατεργασία αποβολής υλικού. Λόγω των προτερημάτων και των δυνατοτήτων της, η χύτευση είναι μια από τις πιο σημαντικές παραγωγικές κατεργασίες.

1.5.2. Ταξινόμηση των μεθόδων χύτευσης

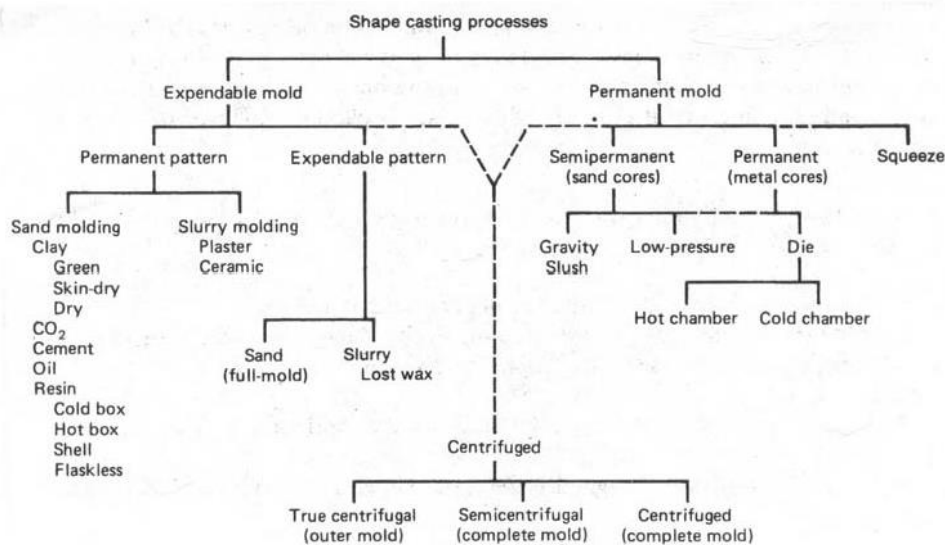
Οι μέθοδοι χύτευσης που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι πολλές και εμφανίζονται με διαφορετικές παραλλαγές. Χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η παραγωγή πλινθωμάτων (ingot casting), μια ταξινόμηση των μεθόδων χύτευσης μπορεί να γίνει με κριτήριο τη φύση του μοντέλου και του καλούπιού. Διακρίνονται οι ακόλουθες μεγάλες ομάδες μεθόδων χύτευσης:

- Μέθοδοι με καλούπι μιας χρήσης και μόνιμο μοντέλο.
- Μέθοδοι με καλούπι και μοντέλο μιας χρήσης.
- Μέθοδοι με μόνιμο καλούπι.
- (Ειδικές) Μέθοδοι με μόνιμο ή μιας χρήσης καλούπι.

Στις ομάδες αυτές περιλαμβάνονται αντίστοιχα οι ακόλουθες τεχνικές :

- Μέθοδοι με καλούπι μιας χρήσης και μόνιμο μοντέλο (expandable mold, permanent pattern casting).
 - Χύτευση σε άμμο (sand casting) με κύριες παραλλαγές τη μέθοδο της υγρής άμμο (green sand casting) και τη μέθοδο της ξηρής άμμου (dry-sand casting)
 - Χύτευση σε άλλα μέσα πλην άμμου (slurry-mold casting) με κύριες παραλλαγές τη χύτευση σε γύψινο καλούπι (plaster-mold casting) και τη χύτευση σε κεραμικό καλούπι (ceramic-mold casting)
 - Μέθοδοι με καλούπι και μοντέλο μιας χρήσης (expandable mold, expandable casting)
 - Χύτευση με "μάσκα" (shell casting)
 - Χύτευση με "επένδυση" (investment casting)
 - Μέθοδοι με μόνιμο καλούπι (permanent pattern casting)
 - Χύτευση βαρύτητας (gravity casting)
- Χύτευση χαμηλής πίεσης (low-pressure casting)
- Χύτευση πίεσης (die casting)
 - Χύτευση συμπίεσης (squeeze casting)
 - (Ειδικές) Μέθοδοι με μόνιμο ή μιας χρήσης καλούπι
 - Φυγοκεντρική χύτευση (centrifugal casting)
 - Ημι-φυγοκεντρική χύτευση (semi-centrifugal casting)
 - Φυγοκεντριζόμενη χύτευση (centrifuged casting)

Η ταξινόμηση των μεθόδων χύτευσης παρουσιάζεται διαγραμματικά στην εικόνα 22. Κάθε μία από τις μεθόδους αυτές διαθέτει ορισμένα πλεονεκτήματα και συγκεκριμένα πεδία εφαρμογών.



Εικόνα 22 : Ταξινόμηση μεθόδων χύτευσης των μετάλλων.

1.5.3. Βασική ορολογία χύτευσης

Η ορολογία που χρησιμοποιείται στην χύτευση παρουσιάζεται με αναφορά σ' ένα τυπικό καλούπι (mold) για χύτευση σε υγρή άμμο (εικόνα 23). Τα καλούπια είναι ο σημαντικότερος παράγοντας σε μία χύτευση και συνήθως είναι διαιρετά και αποτελούνται από δύο μέρη. Εξαιρεση αποτελεί η χύτευση με μοντέλα από κερί ή θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη όπου χρησιμοποιείται ολόσωμο καλούπι, καθώς και οι μέθοδοι χύτευσης σε μόνιμο (επαναχρησιμοποιούμενο) τύπο όπου χρησιμοποιούνται καλούπια ή μήτρες με περισσότερα από δύο μέρη προκειμένου να χυτευθούν αντικείμενα πολύπλοκης γεωμετρίας. Το καλούπι περιορίζεται και διαμορφώνεται μέσα στο πλαίσιο ή κάσα (flask). Τα πλαίσια διακρίνονται σε σταθερά ή λυόμενα και χρησιμοποιούνται κατά ζεύγη οπότε διακρίνουμε, αντίστοιχα, άνω πλαίσιο (core) και κάτω πλαίσιο (drag). Τα πλαίσια είναι συνήθως ξύλινα ή μεταλλικά και χωρίς πυθμένα. Στο εσωτερικό τους φέρουν οριζόντιες νευρώσεις για τη συγκράτηση της άμμου, ενώ στις εξωτερικές πλευρές τους προσαρτώνται υποδοχές, όπου προσαρμόζονται οι ευθυντήριοι πείροι (connecting pins) που εξασφαλίζουν την τακτοποίηση στη σωστή θέση των δύο τμημάτων του πλαισίου κατά τις διάφορες φάσεις της χύτευσης.

Για να δοθεί στην κοιλότητα του καλουπιού το κατάλληλο σχήμα, ώστε να χυτευθεί το υλικό και να παραχθεί το χυτό, χρησιμοποιούνται τα μοντέλα. Το μοντέλο (pattern) είναι «όμοιο» του αντικειμένου που πρόκειται να παραχθεί με μια κύρια διαφορά: Όλες οι διαστάσεις του είναι αυξημένες, σε σχέση με το τελικό αντικείμενο, για να ληφθεί υπόψη η συστολή του τήγματος μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (solid shrinkage ή shrinkage allowance). Εφόσον προβλέπεται κατεργασία κοπής για αποπεράτωση του χυτού, προστίθεται και το κατάλληλο πάχος υλικού που προβλέπεται να απομακρυνθεί κατά την αποπεράτωση (machining allowance).

Το μοντέλο συνήθως κατασκευάζεται από ξύλο (λόγω του χαμηλού του κόστους), μέταλλο, γύψο ή συνθετικές ρητίνες. Τα μεταλλικά μοντέλα έχουν μεγαλύτερο κόστος παραγωγής,



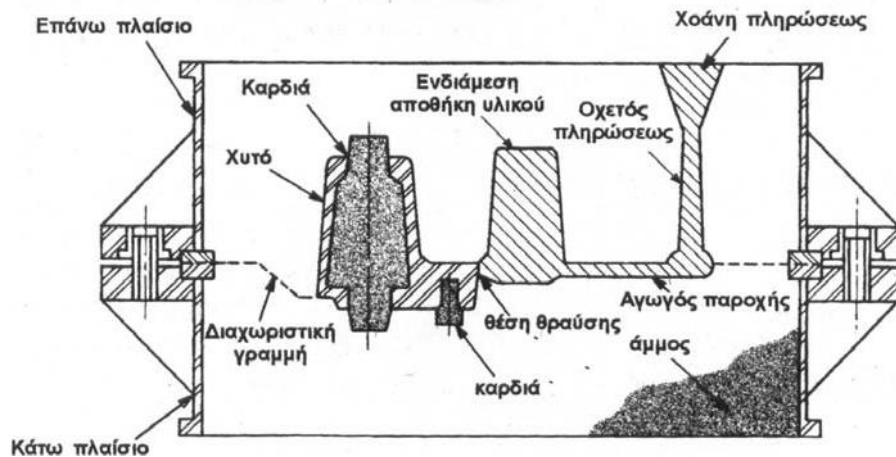
κατασκευάζονται συνήθως από αλουμίνιο, μπρούντζο ή χυτοσίδηρο και διαθέτουν καλύτερη στιβαρότητα και διαστατική σταθερότητα σε σχέση με τα ξύλινα. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που απαιτείται «τύπωμα» πολλών τεμαχίων και υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του ξύλινου προτύπου. Το μοντέλο πρέπει να απομακρύνεται εύκολα από το καλούπι και για το λόγο αυτό κατασκευάζεται συνήθως σε δύο τμήματα (δαιρετό ή διμερές). Αντίστοιχα και στο καλούπι επιλέγεται ένα επίπεδο διαχωρισμού (parting line) που διαχωρίζει την κοιλότητα σε δύο τμήματα. Οι επιφάνειες οι κάθετες στη διεύθυνση απομάκρυνσης του μοντέλου διαμορφώνονται με μια κωνικότητα (draft), ώστε να είναι δυνατή η αφαίρεση του μοντέλου χωρίς καταστροφή ή παραμόρφωση του τύπου.

Για να δημιουργηθούν οι εσωτερικές διαμορφώσεις του χυτού, μέσα στην κοιλότητα του χυτού χρησιμοποιούνται πυρήνες ή καρδιές (core) που είναι φτιαγμένες από ειδική άμμο ή μέταλλο. Με τον τρόπο αυτό γίνεται δυνατή η χύτευση αντικειμένων συνθετότερης γεωμετρίας αλλά αυξάνει το κόστος κατασκευής. Οι καρδιές στηρίζονται σε ειδικές υποδοχές του καλουπιού (nesting holes ή core prints).

Κάθε καλούπι διαθέτει επίσης αγωγούς (runners) για να διοχετευθεί το λιωμένο μέταλλο και τουλάχιστον ένα κατακόρυφο αγωγό (χοάνη και οχετό πλήρωσης/routing basin - sprue) για την τροφοδότηση με τήγμα. Ιδιαίτερα σε χυτά τεμάχια μεγάλου όγκου χρησιμοποιούνται στο καλούπι ενδιάμεσες αποθήκες υλικού (feeder head ή blind riser). Ο ρόλος των αποθηκών αυτών είναι πολύ σημαντικός, γιατί στις περιπτώσεις μεγάλων τεμαχίων δημιουργούνται κενά στο χυτό εξ αιτίας της στερεοποίησης των εξωτερικών επιφανειών πριν από το εσωτερικό του χυτού. Με τη χρήση τους, τα σφάλματα στερεοποίησης δημιουργούνται σε αυτές και το χυτό παραμένει χωρίς κενά. Επίσης στη χύτευση πολύ καθαρών μετάλλων, στις ενδιάμεσες αποθήκες συγκεντρώνονται οι τυχόν ακαθαρσίες, ενώ το χυτό παραμένει καθαρό.

Γενικά, ο οχετός πλήρωσης, οι αγωγοί ροής, οι αποθήκες υλικού κ.λπ. σχηματίζουν ένα σύστημα καναλιών (gating system) που επιτρέπει την ομοιόμορφη ροή και κατανομή του τήγματος σε όλο τον όγκο του χυτού. Η σωστή σχεδίαση και συγκρότηση του συστήματος καναλιών είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή, τεχνικά και οικονομικά, χύτευση -χωρίς ελαττώματα- και απαιτεί αυξημένη τεχνογνωσία και εμπειρία.

Το ρευστό μέταλλο πρέπει να διοχετευθεί στον τύπο κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να απομακρύνονται ο αέρας ή τα αέρια που δημιουργούνται από την επίδραση του θερμού μετάλλου πάνω στον τύπο και να επιτευχθεί η τέλεια πλήρωση του τύπου από το ρευστό μέταλλο, ώστε το τελικό χυτό να είναι συμπαγές και απαλλαγμένο από ελαττώματα.



Εικόνα 23 : Ορολογία χύτευσης με αναφορά σε τομή καλουπιού για χύτευση σε άμμο.

1.5.4. Ικανότητα των υλικών προς χύτευση ή εύροια (fluidity)

Με τον γενικό όρο εύροια περιγράφεται η ικανότητα του τήγματος να γεμίζει με ακρίβεια το αποτύπωμα. Η εύροια εξαρτάται από τις ιδιότητες/παραμέτρους του τήγματος και τις συνθήκες χύτευσης.

Παράμετροι του τήγματος που επηρεάζουν την εύροια είναι:

- το ιξώδες
- η επιφανειακή τάση
- η επιφανειακή τάση λόγω οξειδωσης
- τα διαλυμένα στο τήγμα αέρια
- οι αιωρούμενες στο τήγμα σκουριές (εγκλείσματα)
- ο τρόπος στερεοποίησης και κρυστάλλωσης του τήγματος

Συνθήκες της χύτευσης που επηρεάζουν την εύροια είναι:

- το σχήμα του τεμαχίου
- η πίεση εγχύσεως του τήγματος προς πλήρωση του αποτυπώματος
- οι ιδιότητες των τοιχωμάτων του αποτυπώματος
- ο ρυθμός χύτευσης
- ο βαθμός υπερθέρμανσης του τήγματος

Η ικανότητα προς χύτευση (castability) είναι γενικότερος όρος που αναφέρεται στη δυνατότητα ενός υλικού να μορφοποιείται σε τελικό προϊόν με κατεργασία χύτευσης. Είναι



ανάλογος των όρων «συγκολλητότητα» και «διαμορφωσιμότητα» που αναφέρονται στη δυνατότητα μορφοποίησης με συγκόλληση και κατεργασίες διαμόρφωσης, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 11 που ακολουθεί παρουσιάζει τις κύριες εφαρμογές και την ικανότητα προς χύτευση των τυπικών βιομηχανικών κραμάτων.

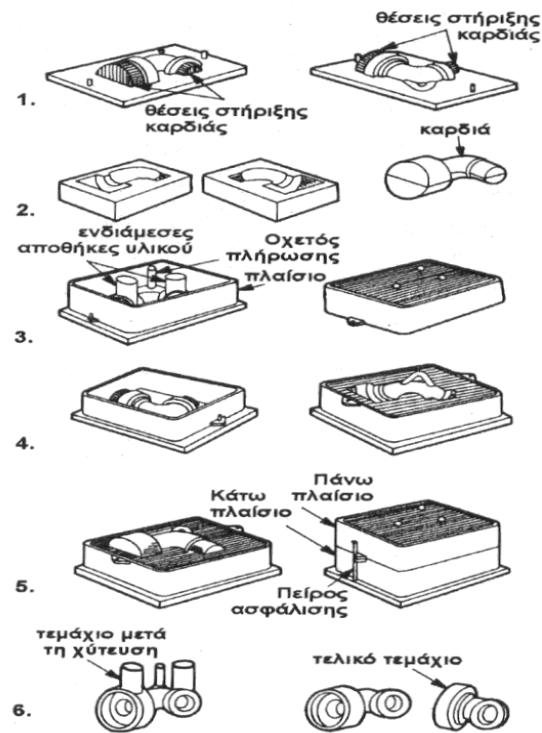
TYPE ALLOY	OF	APPLICATION	CASTABILITY	WELDABILITY	MACHINABILITY
Aluminum		Pistons, clutch housings, intake manifolds, engine blocks, heads, cross members, valve bodies, oil pans, suspension components	G-E	F	G-E
Copper		Pumps, valves, gear blanks, marine propellers	F-G	F	G-E
Gray Iron		Engine blocks, gears, brake disks and drums, machine bases	E	D	G
Magnesium		Crankcase, transmission housings, portable computer housings, toys	G-E	G	E
Malleable iron		Farm and construction machiner, heavy-duty bearings, railroad rolling stock	G	D	G
Nickel		Gas turbine blades, pump and valve components for chemical plants	F	F	F
Nodular iron		Crankshafts, heavy-duty gears	G	D	G
Steel (carbon and low alloy)		Die blocks, heavy-duty gear blanks, aircraft undercarriage members, railroad wheels	F	E	F-G
Steel (high alloy)	(high alloy)	Gas turbine housings, pump and valve components, rock crusher jaws	F	E	F
White iron (Fe ₃ C)	iron	Mill liners, shot blasting nozzles, railroad brake shoes, crushers and pulverizers	G	VP	VP
Zinc		Door handles, radiator grills	E	D	E

*E, excellent; G, good; F, fair; VP, very poor; D, difficult.

Πίνακας 11 : Σύγκριση εύροιας μετάλλων

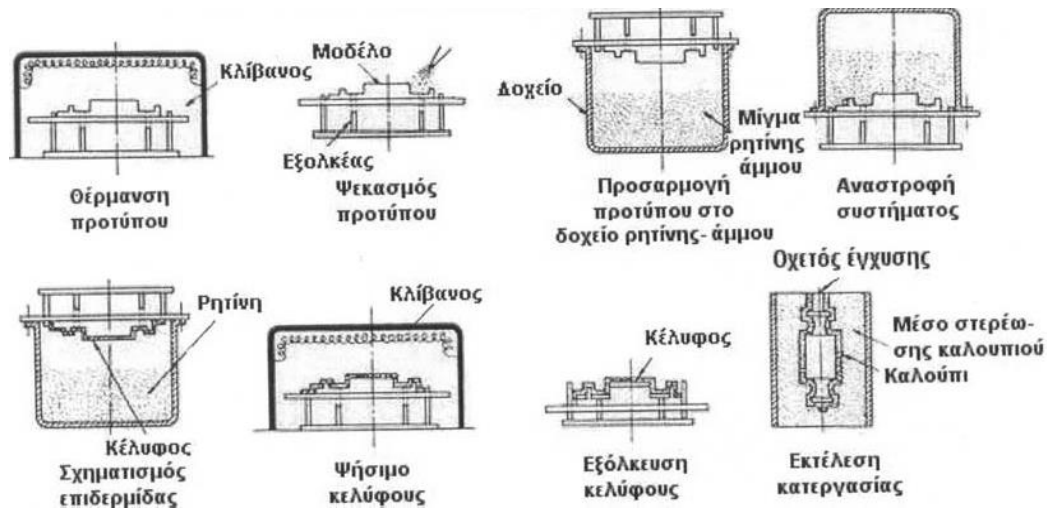
1.5.5. Κύριες μέθοδοι χύτευσης

- Μέθοδοι με χρήση μη μόνιμου τύπου (expendable mold casting)
- Χύτευση σε άμμο (sand casting)



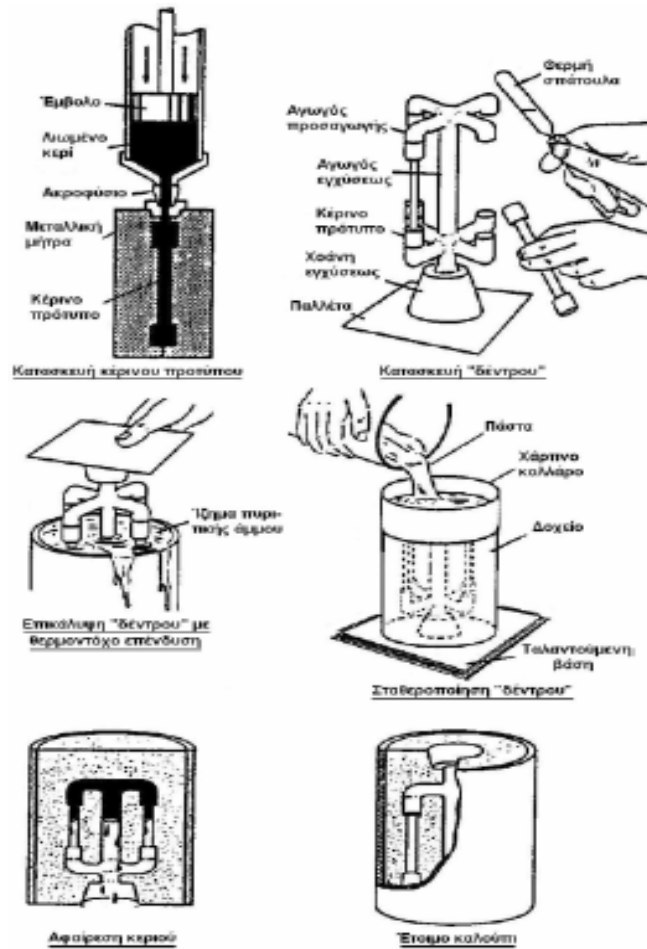
Εικόνα 24 : Χύτευση σε άμμο.

- Χύτευση σε γύψινο καλούπι (Plaster-mold casting)
- Χύτευση σε κεραμικό καλούπι (ceramic-mold casting)
- Χύτευση κελύφους ή χύτευση με «μάσκα» ή μέθοδος Croning (shell mould casting)



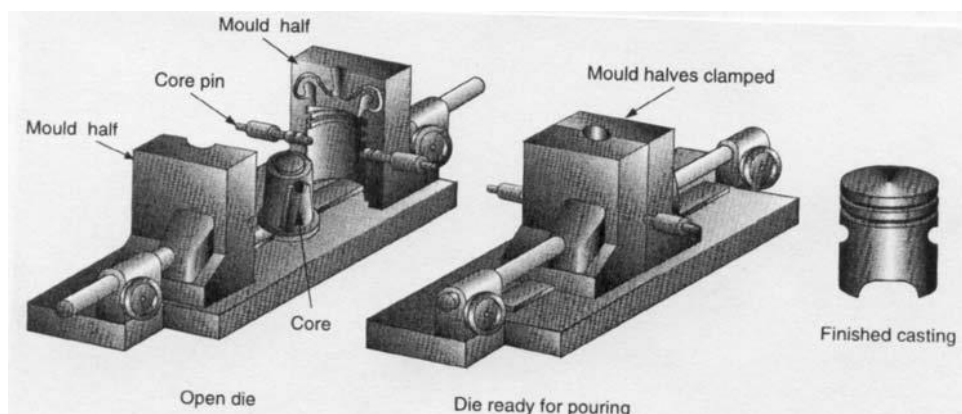
Εικόνα 25 : Χύτευση κελύφους ή χύτευση με «μάσκα».

- Χύτευση με επένδυση ή με «λιωμένο κερί» (investment casting) Πρόκειται για μέθοδο χύτευσης μεγάλης ακριβείας, γνωστής ήδη από την κλασική αρχαιότητα. Εφαρμόζεται κυρίως για την κατασκευή μεγάλου εύρους μορφής χυτών μικρών διαστάσεων και σε υλικά που δεν επιδέχονται εύκολα κατεργασία αποβολής υλικού ή σε υλικά που η δευτερογενής επεξεργασία τους είναι πολύ δαπανηρή. Το βάρος των κατασκευαζόμενων χυτών ποικίλλει από μερικά gr μέχρι μερικά kg, ενώ μπορεί να επιτευχθούν πάχη μέχρι 0.5 mm. Η μέθοδος είναι εφαρμόσιμη σε όλα τα σιδηρούχα και μη σιδηρούχα κράματα. Τυπικά παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου αποτελούν η κατασκευή κοσμημάτων, οδοντικών προθέσεων, κοπτικών εργαλείων ειδικής γεωμετρίας, πτερυγίων στροβίλων κ.λπ.



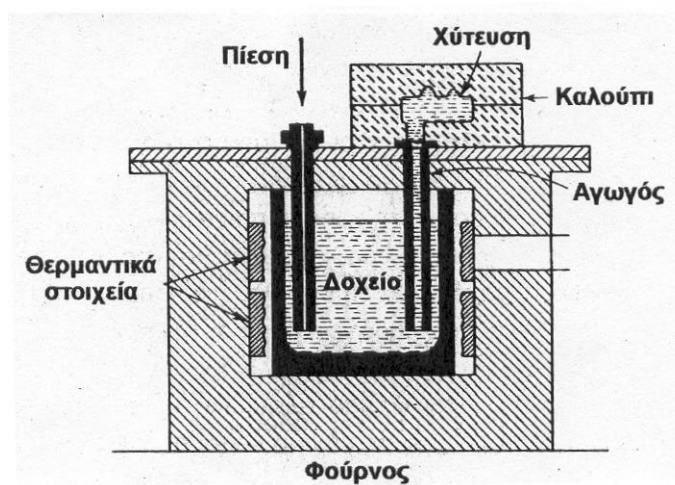
Εικόνα 26 : Χύτευση με επένδυση ή με «λιωμένο κερί» (investment casting)

- Μέθοδοι με χρήση μόνιμου τύπου (permanent mold casting)
- Χύτευση σε μόνιμο (μεταλλικό) τύπο (gravity die-casting)



Εικόνα 27 : Χύτευση (με βαρύτητα) σε μόνιμο τύπο.

- Χύτευση υπό χαμηλή πίεση (low-pressure casting ή pouring pressure casting)
Η χύτευση υπό χαμηλή πίεση διαφέρει από τη χύτευση με βαρύτητα στη διαδικασία εισόδου του τήγματος. Το τηγμένο μέταλλο βρίσκεται σε ειδικό δοχείο που θερμαίνεται συνεχώς και εξαναγκάζεται να εισέλθει στο καλούπι μέσω πίεσης, η οποία διατηρείται μέχρι τη στερεοποίηση του υλικού. Μόλις διακοπεί η πίεση, το προκύπτον χυτό απομακρύνεται, ενώ το παραμένον τήγμα στον αγωγό επιστρέφει στο δοχείο. Χρησιμοποιείται κυρίως για τη χύτευση κραμάτων αλουμινίου σε καλούπια από γύψο ή χυτοσίδηρο.



Εικόνα 28 : Χύτευση υπό χαμηλή πίεση.

- Χύτευση υπό πίεση (die-casting)
Το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι η διοχέτευση του τήγματος σε χαλύβδινο τύπο υπό υψηλή πίεση (0,7 – 700 MPa), όπου αυτό στερεοποιείται. Τα γενικά χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι η μεγάλη ταχύτητα παραγωγής και η μεγάλη ακρίβεια διαστάσεων των χυτών καθώς και η δυνατότητα μαζικής παραγωγής. Ο κύριος περιορισμός για την επικράτηση της μεθόδου έναντι των συναφών κατεργασιών είναι το κόστος του απαιτούμενου εξοπλισμού και το οικονομικό μέγεθος της παραγωγής. Τα κύρια πεδία εφαρμογών της χύτευσης υπό πίεση αναφέρονται στη βιομηχανία αυτοκινήτων (έμβολα, μπλοκ κυλίνδρων κ.λπ.), στον ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό, στη «λεπτομηχανουργική» (παιχνίδια, οπτικά και τυπογραφικά όργανα κ.λπ.) και στα εξαρτήματα ελέγχου και αυτοματισμού μηχανών



1.5.6. Μηχανισμός στερεοποίησης χυτών

Γενικά, δεν υπάρχει ένας μοναδικός, τυπικός μηχανισμός στερεοποίησης των χυτών και υπενθυμίζεται ότι τα καθαρά μέταλλα και τα κράματα ακολουθούν διαφορετικούς νόμους πήξης. Τα καθαρά μέταλλα στερεοποιούνται σε καθορισμένη θερμοκρασία, ενώ τα κράματα σε μια περιοχή θερμοκρασιών που ξεκινά από τη γραμμή liquidus και τελειώνει στη γραμμή solidus, του διαγράμματος θερμοτικής ισορροπίας του κράματος.

Κατά την χύτευση, έχει διαπιστωθεί ότι ο χρόνος πήξης, που έχει άμεση σχέση με το ρυθμό απόψυξης και κατά συνέπεια με την αποκτούμενη κρυσταλλική δομή του χυτού, περιγράφεται από τη σχέση Chvorinov:

$$T = K \left(\frac{V}{A} \right)^2, \text{ όπου:}$$

K: σταθερά

V: ο όγκος του στερεοποιούμενου ρευστού μετάλλου

A: η διεπιφάνεια μεταξύ ρευστού μετάλλου και τύπου

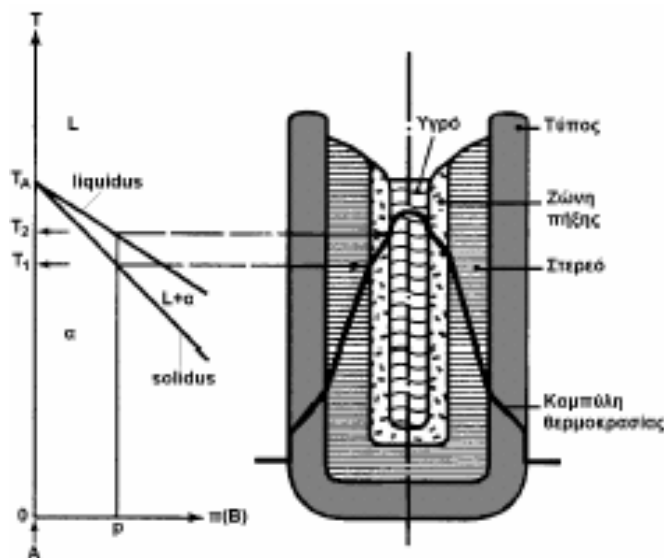
Όταν εγχύεται τήγμα μετάλλου μέσα σε τύπο, η στερεοποίηση ξεκινά από τα τοιχώματα του τύπου που βρίσκονται σε χαμηλή θερμοκρασία. Η απόψυξη συνεχίζεται με ροή της θερμότητας δια μέσου του υπό πήξη πλινθώματος προς τα εξωτερικά τοιχώματα του και δια των τοιχωμάτων του τύπου προς το περιβάλλον.

Οι θερμικές συνθήκες της πήξης και της απόψυξης του μετάλλου εξαρτώνται από τους ακόλουθους, κυρίως, παράγοντες:

- Τη φύση του κράματος, τις θερμικές σταθερές του (θερμότητα, θερμική διαπερατότητα, λανθάνουσα θερμότητα πήξης) και τυχόν εκλυόμενη θερμότητα κατά τους διάφορους μετασχηματισμούς του.
- Τη θερμοκρασία του κράματος και την ταχύτητα πλήρωσης του τύπου.
- Τη φύση του τύπου (υλικό, ειδική θερμότητα, θερμική διαπερατότητα).
- Την αρχική θερμοκρασία του τύπου και τον τρόπο απόψυξης του (ελεύθερα στο περιβάλλον ή με κυκλοφορία ψυκτικού μέσου μέσω των τοιχωμάτων του).
- Τα γεωμετρικά στοιχεία του τύπου (πάχος τοιχωμάτων και σχήμα).
- Τον όγκο του πλινθώματος και τη σχέση όγκος πλινθώματος / όγκος ύλης του τύπου.
- Την τυχόν χρήση επαλείψεων στην εσωτερική επιφάνεια του τύπου για την εξασφάλιση καλής ποιότητας επιφάνειας πλινθώματος.

Σε μια ενδιάμεση χρονική στιγμή της στερεοποίησης συνυπάρχουν μέσα στον τύπο :

- Η στερεά φάση που ξεκινά από τα τοιχώματα του τύπου και επεκτείνεται προς το εσωτερικό του.
- Η υγρή φάση που εντοπίζεται στο κεντρικό τμήμα του τύπου και συνεχώς συρρικνώνεται σε όφελος της στερεάς φάσης.
- Η ζώνη πήξης που προχωρεί από έξω προς τα μέσα και στην οποία συνυπάρχουν η υγρή και η στερεά φάση. Η εξωτερική της επιφάνεια έχει τη θερμοκρασία του τέλους πήξης T_2 και η εσωτερική της επιφάνεια τη θερμοκρασία αρχής πήξης T_1 , το δε πάχος της είναι αύξουσα συνάρτηση του θερμοκρασιακού εύρους πήξης, $(T_1 - T_2)$.



Εικόνα 29 : Χαρακτηριστικές φάσεις κατά τη στερεοποίηση τήγματος.

Τα φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την πήξη ενός τήγματος και αναλύονται στη συνέχεια είναι η συστολή όγκου (shrinkage), η διακρυστάλλωση (transcrystallization) και ο χημικός διαφορισμός (segregation) στη μάζα του χυτού.

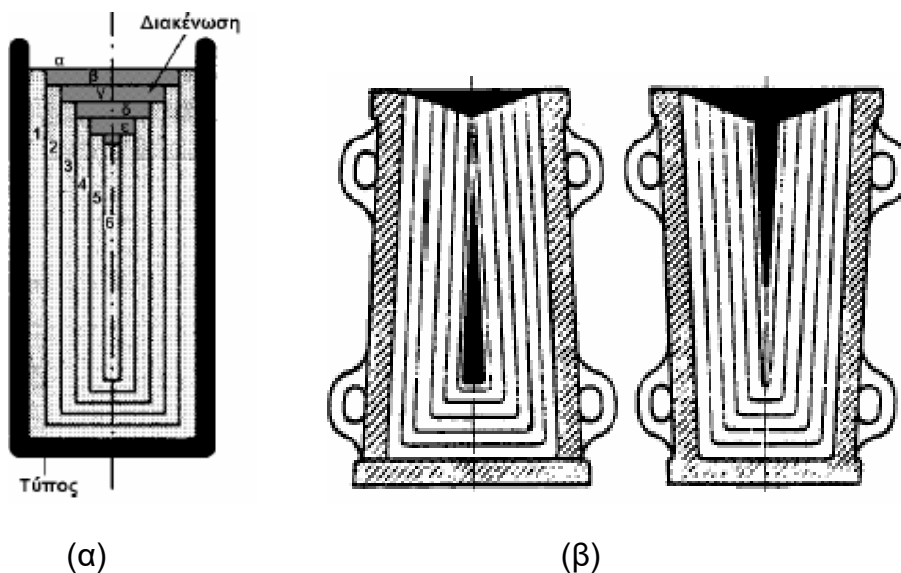
1.5.7. Μηχανισμός στερεοποίησης: Παρατηρούμενα φαινόμενα

Το κύριο φαινόμενο που παρατηρείται κατά την πήξη ενός μετάλλου είναι η υποχώρηση του όγκου του λόγω συστολής. Η συστολή αυτή εκδηλώνεται και στις τρεις περιόδους απόψυξης και στερεοποίησης δηλ. Κατά την υγρή κατάσταση (τήγμα), κατά την πήξη και στην στερεά κατάσταση και γίνεται η αιτία για την εμφάνιση πολλών ελαττωμάτων των χυτών αντικειμένων.

Α) Υποχώρηση λόγω συστολής κατά την πήξη:

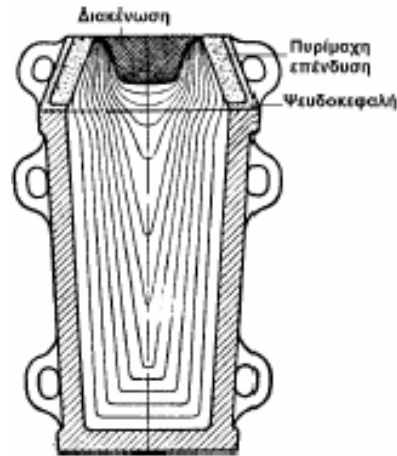
Διακενώσεις (ripping): Πρόκειται για κοιλότητες κωνικής μορφής λόγω της ανισόθερμης (ανομοιόμορφης) πήξης κατά συνεχείς στρώσεις από τα έξω προς τα μέσα. Η θέση, η μορφή και η έκταση των διακενώσεων εξαρτάται από την μορφή του καλουπιού και το ρυθμό απόψυξης του χυτού.

Στα χυτά η διακένωση σχηματίζεται εκεί που το υγρό στερεοποιείται τελευταίο, κατά κανόνα στο εσωτερικό του χυτού και κατά συνέπεια δεν είναι ορατή. Αποτελεί ελάττωμα για το πλίνθωμα και πρέπει να αφαιρείται. Για τη διόρθωση της διακένωσης γίνεται χρήση ψευδοκεφαλής (hot top, sinkhead), με σκοπό αυτή να περιοριστεί μέσα στην ψευδοκεφαλή και να αφαιρεθεί μετά μ' αυτήν αποδίδοντας υγιές πλίνθωμα. Πολλές φορές, για να μειωθούν οι διαστάσεις της ψευδοκεφαλής αυτή κατασκευάζεται με εσωτερική μονωτική επένδυση που συντηρεί το μέταλλο στο στόμιο της υγρό (θερμή ψευδοκεφαλή).



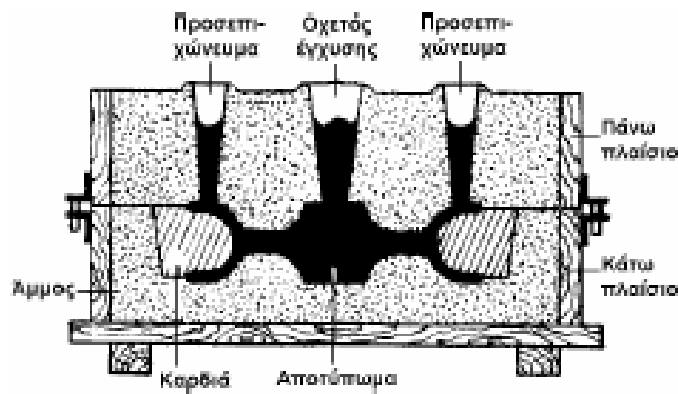
Εικόνα 30 : (α) Σχηματισμός διακένωσης,

(β) Επίδραση της γεωμετρίας του τύπου στο σχηματισμό διακένωσης.

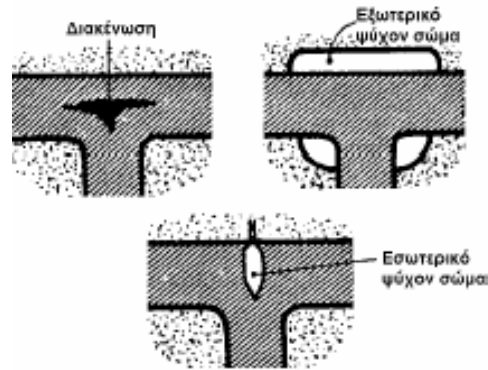


Εικόνα 31 : Εφαρμογή και λειτουργία ψευδοκεφαλής.

Για την αποφυγή των διακενώσεων και άλλων συναφών ελαττωμάτων στη χύτευση χρησιμοποιούνται επίσης προσεπιχωνεύματα (feeder head, riser) και ψύχοντα σώματα (chills). Τα προσεπιχωνεύματα εξασφαλίζουν τη συνεχή τροφοδοσία με τήγμα της σχηματιζόμενης λόγω της στερεοποίησης κοιλότητας. Τα ψύχοντα σώματα τοποθετούνται εξωτερικά (στις ογκωδέστερες περιοχές του χυτού) ή εσωτερικά (παραμένουν μέσα στο χυτό) με σκοπό την επίτευξη σύγχρονης πήξης σ' όλη τη μάζα του.



Εικόνα 32 : Εφαρμογή προσεπιχωνεύματος.



Εικόνα 33 : Εφαρμογή «ψύχοντος σώματος».

Μικροδιακενώσεις (microvoiding): Είναι κενά που εμφανίζονται στα όρια στερεοποιηθέντων κρυσταλλίτων. Οφείλονται στον ασυνεγή εγκλωβισμό και την συνακόλουθη στερεοποίηση υγρού τήγματος μέσα στους σχηματιζόμενους κρυσταλλίτες. Οι μικροδιακενώσεις παρατηρούνται συνήθως όταν το θερμοκρασιακό εύρος τήξης είναι μεγάλο και το πάχος της ζώνης πήξης είναι σημαντικό. Όταν επακολουθεί μηχανική κατεργασία και πλαστική παραμόρφωση, οι μικροδιακενώσεις συγκολλούνται αυτόματα (εν ψυχρώ) και εξαφανίζονται. Άρα, δεν αποτελούν σοβαρό ελάττωμα και δεν απαιτείται ιδιαίτερος λόγος πρόληψης τους.

Β) Υποχώρηση λόγω συστολής στην στερεά κατάσταση.

Η συστολή όγκου (μεταβολή διαστάσεων) στη στερεά φάση είναι επίσης σημαντική και εξαρτάται από τον συντελεστή θερμικής διαστολής του μετάλλου. Άλλη επίδραση οφειλόμενη στην ανομοιομορφία του ρυθμού απόψυξης του στερεού μετάλλου είναι η ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων στο αντικείμενο που αποτελούν εστία ανάπτυξης ρηγματώσεων. Οι τάσεις αυτές είναι ανάλογες προς το μέτρο ελαστικότητας, τον συντελεστή διαστολής και την διαφορά θερμοκρασίας του μετάλλου, είναι δε ανεξάρτητες από τις διαστάσεις του τεμαχίου.

Ρωγμές λόγω εσωτερικών τάσεων που εμφανίζονται κάτω από την γραμμή solidus αλλά κατά την διάπυρη κατάσταση του μετάλλου ονομάζονται θερμές, ενώ οι δημιουργούμενες λόγω διαφορών συστολής μετά την πλήρη απόψυξη χαρακτηρίζονται ως ψυχρές ρωγμές.

Γ) Διακρυστάλλωση

Με τον όρο διακρυστάλλωση περιγράφεται ο τρόπος κρυστάλλωσης ενός χυτού. Λόγω της απότομης ψύξης που συμβαίνει στην επιφάνεια επαφής του τήγματος με τα τοιχώματα του τύπου, σχηματίζεται στη διεπιφάνεια μια πολύ λεπτή ζώνη από πολυκρυσταλλικό λεπτόκοκκο μέταλλο που ονομάζεται μικροκρυσταλλική ή ψυχρή ζώνη (chill zone). Το μικρό πάχος της ζώνης αυτής οφείλεται στην υψηλή υπόψυξη που εμφανίζει το τήγμα σ' αυτή,



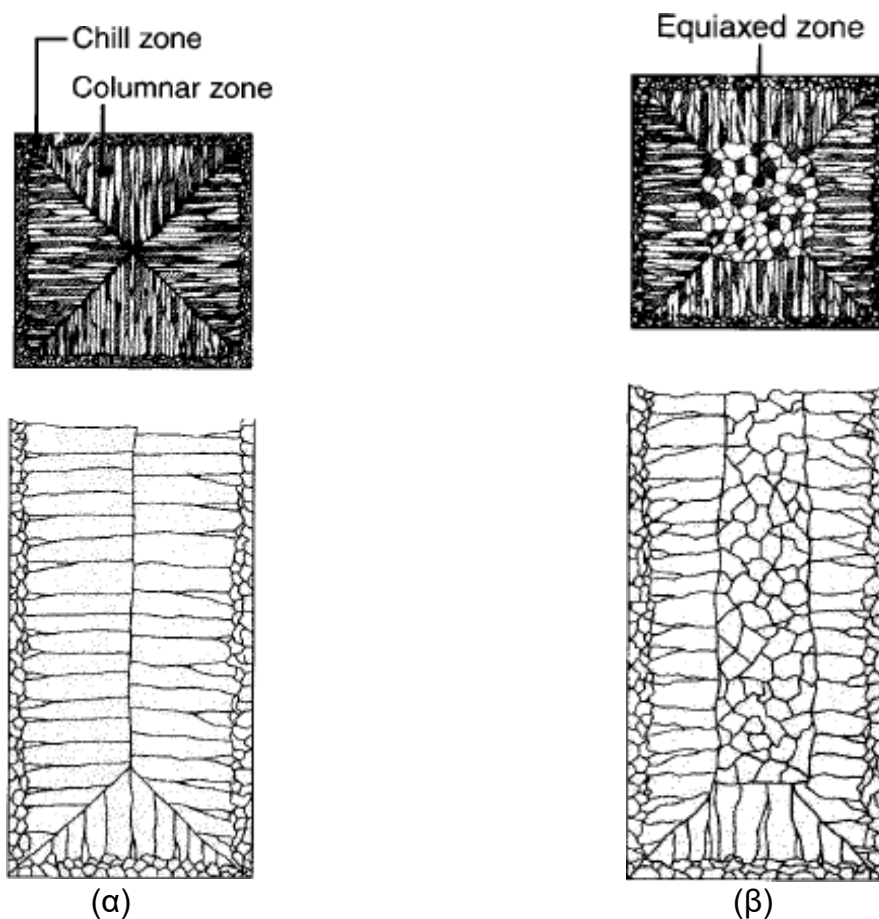
φαινόμενο που είναι η αιτία ώστε οι σχηματιζόμενοι πυρήνες κρυστάλλωσης να είναι πολυπληθείς, με αποτέλεσμα η ανάπτυξη των κόκκων να είναι ανταγωνιστική και να τερματίζεται πολύ γρήγορα.

Οι αναπτυσσόμενοι κρύσταλλοι είναι ισοαξονικοί, μικρού μεγέθους και τυχαίου προσανατολισμού. Μετά το σχηματισμό της μικροκρυσταλλικής ζώνης, η πήξη συνεχίζεται μέσα στη μάζα του μετάλλου με τη ζώνη πήξης να προχωρεί, συναρτήσει του χρόνου, από έξω προς τα μέσα. Μέσα στη ζώνη αυτή η υπόψυξη είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη της μικροκρυσταλλικής, με αποτέλεσμα οι δημιουργούμενοι πυρήνες κρυστάλλωσης να είναι ολιγάριθμοι. Σε κάθε θέση πυρήνωσης αναπτύσσεται εξόγκωμα που εξελίσσεται σε δενδρίτη.

Με την πρόοδο της στερεοποίησης αναπτύσσονται ευμεγέθεις δενδριτικοί κρυσταλλίτες, οι οποίοι λόγω της σύγχρονης μετακίνησης της ζώνης προς τα μέσα λαμβάνουν επιμήκη μορφή, κάθετη προς τις παρειές του τύπου. Η πλευρική ανάπτυξη των δενδριτικών κρυστάλλων σταματά όταν συναντηθούν με γειτονικά αναπτυσσόμενους κρυσταλλίτες. Μετά τη στερεοποίηση το χυτό αποκτά χαρακτηριστικό ιστό, η δε προκύπτουσα ζώνη ονομάζεται βασαλτική ή κιονοειδής ζώνη (columnar zone).

Εάν το πάχος του πλινθώματος είναι μικρό, η βασαλτική ζώνη αναπτύσσεται μέχρι το κέντρο του, βλέπε Σχήμα 6.19(α). Εάν όμως το πάχος του πλινθώματος είναι σχετικά μεγάλο, κατά το τέλος της πήξης εμφανίζεται ένας διαφορετικός τρόπος κρυστάλλωσης, με βάση ένα μηχανισμό πολλαπλασιασμού των κρυστάλλων, στο κέντρο του πλινθώματος. Τότε οι κόκκοι είναι περίπου ισομεγέθεις κυτταροειδείς, χωρίς μικρογραφική μορφή ιστού (ισοαξονικοί). Η κεντρική αυτή περιοχή ονομάζεται ισοαξονική ζώνη (equiaxed zone).

Σημειώνεται ότι σε πολλά βιομηχανικά κράματα είναι δυνατόν να απουσιάζει μία από τις τρεις αυτές ζώνες. Στους ανοξειδωτους χάλυβες η δομή είναι συνήθως κιονοειδής ενώ στους χαμηλά κραματωμένους χάλυβες εμφανίζονται και οι τρεις ζώνες.



Εικόνα 34 : Τυπικές μορφές διακρυστάλλωσης χυτού – (α) ανάπτυξη δύο ζωνών, (β) ανάπτυξη τριών ζωνών

δ) Διαφορισμός

Γενικά, διαφορισμός (segregation) είναι η χημική ανομοιογένεια που εντοπίζεται στο χυτό από κάποιο κράμα. Όταν αναφέρεται στην κλίμακα κόκκου, πρόκειται για τον μικροδιαφορισμό που οφείλεται στη ταχεία πήξη του κράματος και μπορεί να εξαλειφθεί με ανόπτηση προς ομογενοποίηση. Εάν αναφέρεται σ' όλη την έκταση του χυτού, πρόκειται για μακροδιαφορισμό. Ο μακροδιαφορισμός ευνοείται από την βραδεία απόψυξη και συντελεί στην μεγαλύτερη συγκέντρωση των συνοδών στοιχείων ή των προσμίξεων στο κέντρο του τεμαχίου. Δεν εξαφανίζεται με θερμική κατεργασία του χυτού.



1.5.8. Ελαττώματα χυτών αντικειμένων.

Τα συνήθη ελαττώματα που εμφανίζονται στα χυτά αντικείμενα μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- Ελαττώματα χημικής φύσεως: Οφείλονται στον μακροδιαφορισμό και αφορούν:
 - χημική ανομοιογένεια των κανονικών συστατικών του χυτού στα διάφορα σημεία του που συνεπάγεται διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες με αποτέλεσμα αιφνίδιες θραύσεις.
 - διαφορισμό των ακαθαρσιών που δρουν σαν κέντρα κρυστάλλωσης με συνεπακόλουθο την δυσμενή επίδραση στις φυσικές ιδιότητες του χυτού.
- Φυσικά ελαττώματα: Εδώ κατατάσσονται οι διακενώσεις και οι μικροδιακενώσεις
- Τυχαία ελαττώματα: Είναι ασυνέχειες που οφείλονται στην συστολή του χυτού κατά την απόψυξη και παρουσιάζονται, είτε σαν σχισμές παράλληλες προς την επιφάνεια ή σαν κάθετες ρηγματώσεις στο εσωτερικό του χυτού.
- Ελαττώματα οφειλόμενα στον χρόνο χύτευσης:
- Σπήλαια : είναι μεγάλες φυσαλίδες που οφείλονται στην ατελή έξοδο των αερίων, τα οποία παραμένουν μέσα στο υγρό μέταλλο καταστρέφοντας το αποτύπωμα.
- Φυσαλίδες: προέρχονται από τα αέρια του τήγματος ή την υγρασία της άμμου χύτευσης που δεν κατόρθωσαν να διαφύγουν. Παρατηρούνται κυρίως στην επιφάνεια των χυτών αντικειμένων.
- Ρήγματα: οφείλονται στην ανώμαλη συστολή και την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων.
- Ασυνέχειες: προέρχονται από στιγμιαίες διακοπές εκχύσεως του μετάλλου.
- Ψυχρές σταγόνες: Προκύπτουν λόγω απόψυξης, στερεοποίησης και οξειδωσης σταγόνων μετάλλου κατά την εκτίναξή τους μέσα στο αποτύπωμα.
- Διογκώσεις : εμφανίζονται εκεί όπου το αποτύπωμα δεν είναι ικανοποιητικά συμπιεσμένο.
- Παραμορφώσεις : εμφανίζονται λόγω κακής τοποθέτησης του καλουπιού ή πολυπλοκότητας της μορφής του αντικειμένου.

Δεδομένου, ότι συχνά, το ίδιο ελάττωμα περιγράφεται στην έγκυρη τεχνική βιβλιογραφία με διαφορετικό όνομα, έχει αναπτυχθεί από την “International Committee of Foundry Technical Associations” ένα τυποποιημένο σύστημα ταυτοποίησης και ονοματολογίας των ελαττωμάτων χύτευσης που τα κατατάσσει σε 7 κύριες κατηγορίες: metallic projections, cavities, discontinuities, defective surface, incomplete casting, incorrect dimensions or shape inclusions [1-2].

1.5.9. Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] Δρ. Ν.Μ. Βαξεβανίδης. (2013). ΧΥΤΕΥΣΗ [Pdf διαφάνειες]. Λήφθηκε από https://eclass.aspete.gr/modules/document/file.php/EML117/6_casting_supplament.pdf



- [2] About Aluminium. (2018 Ιανουάριος 15)
Λήφθηκε από <http://www.elval.gr/default.asp?pid=177&la=1>



1.6. Διαμορφωσιμότητα

1.6.1. Εισαγωγή

Η διαμορφωσιμότητα είναι ένας όρος που εφαρμόζεται συχνά στην διαμόρφωση ελασμάτων. Κατεργασίες ελασμάτων όπως βαθιά κοίλανση, κάμψη και έλαση συνεπάγονται εκτεταμένη εφελκυστική παραμόρφωση.

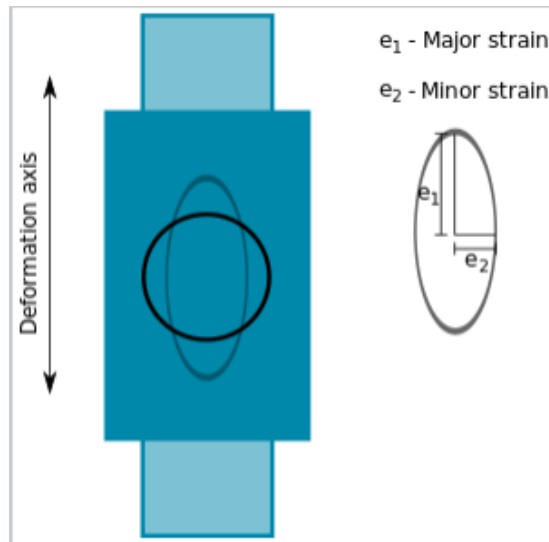
Η διαμορφωσιμότητα είναι η ευκολία με την οποία ένα φύλλο μετάλλου μπορεί να διαμορφωθεί στο απαιτούμενο σχήμα χωρίς να οδηγηθεί στην δημιουργία λαιμού ή ρωγμάτωσης.

Από μεταλλουργική άποψη, η διαμορφωσιμότητα ενός συγκεκριμένου μετάλλου εξαρτάται από την επιμήκυνση του μετάλλου, η οποία είναι η συνολική ποσότητα της παραμόρφωσης που μετράται κατά τη διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού. Ένα μέταλλο με μεγάλη επιμήκυνση έχει καλή διαμορφωσιμότητα επειδή το μέταλλο είναι δυνατό να υποβληθεί σε ένα μεγάλο ποσό παραμόρφωσης.

Η απλή μονοαξονική δοκιμή εφελκυσμού είναι περιορισμένης χρήσης όταν ασχολούμαστε με τη διαμορφωσιμότητα ελασμάτων. Αυτό οφείλεται στην διαξονική ή τριξονική φύση της τάσης που επενεργεί στο φύλλο μετάλλου κατά τη διάρκεια των κατεργασιών σχηματισμού. Ως εκ τούτου, έχουν αναπτυχθεί ειδικές δοκιμές διαμόρφωσης, κατάλληλες για ελάσματα. Οι προσανατολισμοί φόρτισης θα μπορούσαν επίσης να αλλάξουν κατά τη διαμόρφωση του φύλλου μετάλλου. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη γεωμετρία των εργαλείων ή τη μεταλλογραφική υφή [1-4].

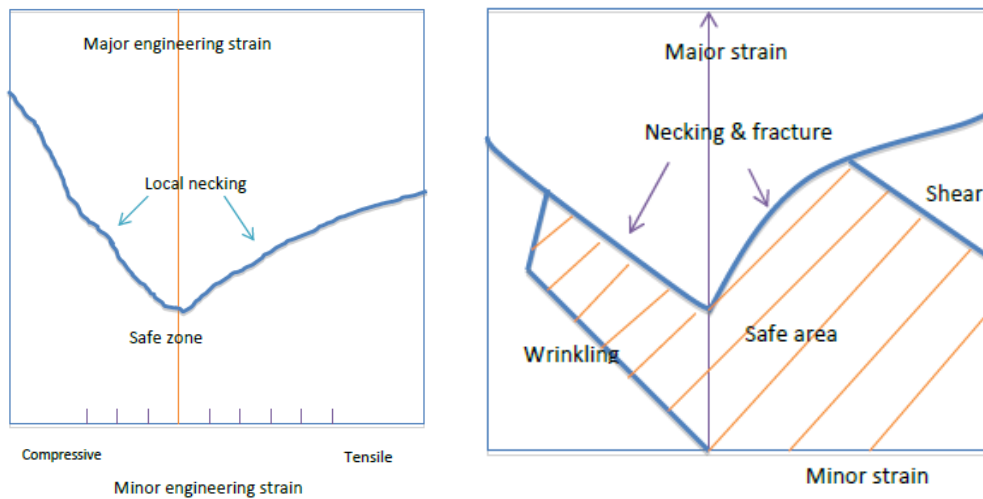
1.6.2. FLD (forming limit diagram-διάγραμμα επιτρεπόμενης διαμόρφωσης)

Το FLD είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος βελτιστοποίησης των κατεργασιών διαμόρφωσης ελασμάτων. Ένα πλέγμα κύκλων χαράσσεται στην επιφάνεια ενός μεταλλικού φύλλου. Στη συνέχεια το φύλλο μετάλλου υποβάλλεται σε παραμόρφωση. Συνήθως το φύλλο παραμορφώνεται με τέντωμα πάνω σε μια μήτρα σχήματος θόλου. Για τη δοκιμή μπορούν να ληφθούν ταινίες διαφορετικού πλάτους, προκειμένου να προκληθεί κατάσταση μονοαξονικής ή διαξονικής καταπόνησης. Οι κύκλοι παραμορφώνονται σε ελλειπτικά σχήματα. Η καταπόνηση κατά μήκος δύο κύριων κατευθύνσεων θα μπορούσε να εκφραστεί ως η εκατοστιαία μεταβολή του μήκους των κυρίων και δευτερευόντων αξόνων.



Εικόνα 35 : Μέτρηση παραμορφώσεων

Οι παραμορφώσεις όπως μετριοούνται κοντά στους λαιμούς ή τις ρωγματώσεις είναι οι παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε αστοχία. Στη συνέχεια, γίνεται μια γραφική παράσταση της μεγάλης παραμόρφωσης έναντι της μικρής παραμόρφωσης. Αυτό το διάγραμμα ονομάζεται Keeler-Goodwin και δίνει τις επιτρεπόμενες παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε ασφαλείς διαμορφώσεις. Το FLD είναι γενικά μια γραφική παράσταση των συνδυασμών κυρίων και δευτερευόντων παραμορφώσεων που οδηγούν σε αστοχία. Ο συνδυασμός παραμορφώσεων που αντιπροσωπεύονται πάνω από τις οριακές καμπύλες στο διάγραμμα Keeler-Goodwin αντιπροσωπεύει αστοχία, ενώ εκείνες κάτω από τις καμπύλες αντιπροσωπεύουν ασφαλείς διαμορφώσεις. Ένα τυπικό διάγραμμα Keeler-Goodwin παρουσιάζεται παρακάτω. Η ασφαλής ζώνη στην οποία δεν αναμένεται αποτυχία εμφανίζεται ως σκιασμένη περιοχή. Εκτός αυτής της ζώνης υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι αποτυχίας που εκπροσωπούνται σε διαφορετικούς συνδυασμούς παραμορφώσεων.

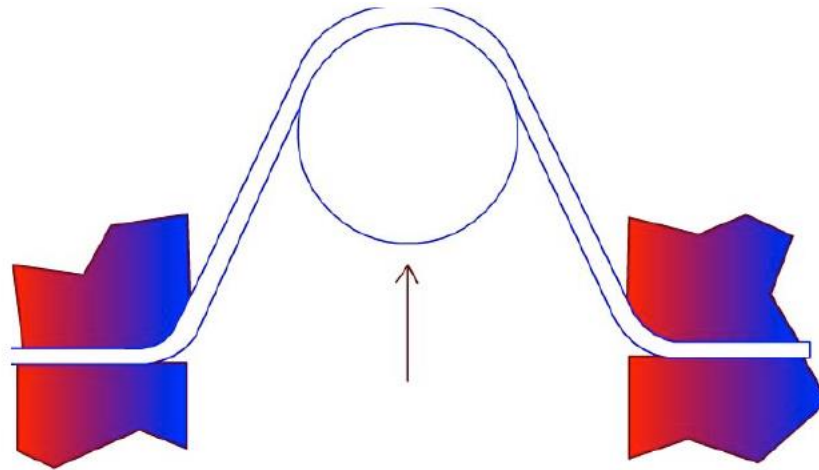


Εικόνα 36 : FLD διάγραμμα

Διακυμάνσεις στο πάχος του φύλλου, τη σύνθεση και το μέγεθος των κόκκων διαφοροποιούν τις κλίσεις του διαγράμματος.

1.6.3. Δοκιμές μορφοποίησης

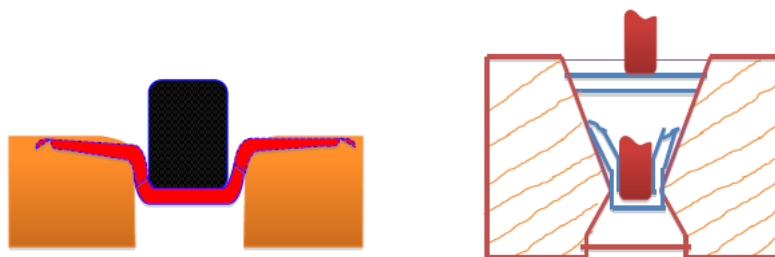
Στη διαδικασία βαθιάς κοίλανσης κυπέλλου, είναι πολύ χρήσιμη μια παράμετρος διαμορφώσεως γνωστή ως οριακός λόγος κοίλανσης (limiting draw ratio-LDR). Το LDR ορίζεται ως η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή που μπορεί να λάβει ο λόγος κοίλανσης. Σε βαθιά κοίλανση κύπελλου με επίπεδη βάση γίνονται διαμορφώσεις σε κυκλικά ελάσματα. Κάθε φορά αυξάνεται η διάμετρος του φύλλου. Η μέγιστη διάμετρος του φύλλου που μπορεί να κοιτανθεί επιτυχώς προσδιορίζεται με αυτό τον τρόπο, έτσι μπορεί να βρεθεί ο LDR.



Εικόνα 37 : Δοκιμή μορφοποίησης

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται μια τυπική μέθοδος προσδιορισμού της διαμορφωσιμότητας. Στο τεστ Olsen και Erichsen, το φύλλο τεντώνεται πάνω από ένα ημισφαιρικό εργαλείο για να σχηματίσει ένα κύπελλο σχήματος θόλου. Το ύψος του θόλου θεωρείται δείκτης διαμορφωσιμότητας. Στη δοκιμή Fukui το φύλλο τραβιέται και τεντώνεται σε ένα κύπελλο κωνικού σχήματος. Τόσο κοίλανση όσο και εφελκυσμός συμβαίνουν. Το κυκλικό έλασμα τραβιέται διαμέσω μιας κωνικής μήτρας με ένα κυκλικό διάτρητο εργαλείο χωρίς τη χρήση κάποιου συγκρατητή. Η αναλογία ελάχιστης διαμέτρου στην οποία η ρωγμή δεν εμφανίζεται στην αρχική διάμετρο του δοκιμίου λαμβάνεται ως μέτρο διαμόρφωσης του φύλλου μετάλλου'.

Σε μια άλλη δοκιμή που είναι γνωστή ως δοκιμή μορφοποίησης OSU, χρησιμοποιούνται κυλινδρικά έμβολα τριών διαφορετικών γεωμετριών κορυφής για να διεισδύσουν στο φύλλο το οποίο συγκρατείται και στις δύο άκρες. Στη συνέχεια πρέπει να μετρηθεί το ύψος του φύλλου που υπόκειται σε κοίλανση σε περίπτωση αποτυχίας.



Εικόνα 38 : Βαθεία κοίλανση



Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων μπορούν να ληφθούν για να προσδιοριστεί η κατάσταση στην οποία έγινε αστοχία.

Συμπέρασμα : υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι προσδιορισμού της διαμορφωσιμότητας

1.6.4. Ανιστροπία

Η ανισοτροπία είναι η μεταβολή των ιδιοτήτων σε σχέση με τις κατευθύνσεις, λόγω διακυμάνσεων στις μικροδομές που εισάγονται στις κατεργασίες διαμόρφωσης. Τέτοιες κατεργασίες είναι για παράδειγμα η βαθιά κοίλανση, η έλαση, η κάμψη και η ηλεκτρομαγνητική διαμόρφωση. Κατά την έλαση, οι κόκκοι επιμηκύνονται κατά μήκος της κατεύθυνσης κύλισης. Ως αποτέλεσμα, οι ιδιότητες εφελκυσμού διαφέρουν κατά μήκος διαφορετικών κατευθύνσεων. Το έλασμα μπορεί να υποβληθεί σε μονοαξονική δοκιμή εφελκυσμού. Μπορούν να προσδιοριστούν παραμορφώσεις κατά μήκος των διευθύνσεων πάχους και πλάτους. Εάν το w είναι το πλάτος του φύλλου και το t είναι το πάχος του φύλλου, η κανονική ανισοτροπία R ορίζεται ως:

$$R = \frac{\ln \frac{w_f}{w_i}}{\ln \frac{t_f}{t_i}}$$

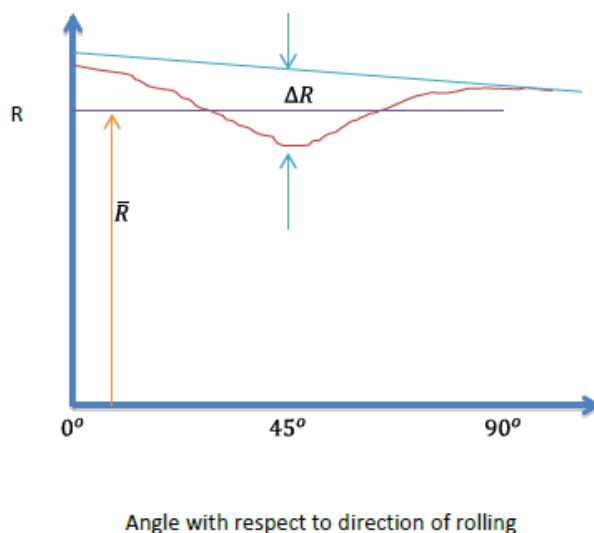
Αν $R = 1$, τότε οι παραμορφώσεις ύψους και πλάτους είναι ίσες. Αυτό αντιστοιχεί σε ιστροπικό υλικό. Η ανισοτροπία R εξαρτάται επίσης από τον προσανατολισμό του υλικού σε σχέση με την κατεύθυνση κυλίσεως. Μπορεί να εκτιμηθεί κατά μήκος της κατεύθυνσης της έλασης υπό γωνία 0° , υπό γωνία 45° ως προς την κατεύθυνση της έλασης και κάθετη προς την κατεύθυνση της έλασης. Μπορούμε να ορίσουμε την κανονική ανισοτροπία ως:

$$\bar{R} = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4}$$

Σημείωση: Μια τιμή R πολύ μεγάλη προκύπτει αν η παραμόρφωση πάχους είναι ίση με μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι δεν θα υπάρξει αποτέλεσμα αραίωσης σε ένα φύλλο που υπόκειται σε εφελκυστική παραμόρφωση. Ως εκ τούτου, κατά το σχηματισμό φύλλων, ειδικά σε βαθιά κοίλανση, προτιμούμε υψηλή τιμή του R (3 έως 5) για να εξασφαλίσουμε μικρή αραίωση. Ομοίως, η επίπεδη ανισοτροπία ορίζεται ως:

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90} - 2R_{45}}{2}$$

Η κανονική ανισοτροπία αντιπροσωπεύει τον μέσο όρο της ανισοτροπίας σε όλες τις κατευθύνσεις. Η επίπεδη ανισοτροπία δίνει την παραλλαγή της ανισοτροπίας με την κατεύθυνση.



Εικόνα 39 : Γραφικά παράσταση ανισοτροπίας

Το σχήμα παραπάνω απεικονίζει την παραλλαγή της ανισοτροπίας σε σχέση με την κατεύθυνση της έλασης [2, 4].

1.6.5. Εργοσκλήρυνση

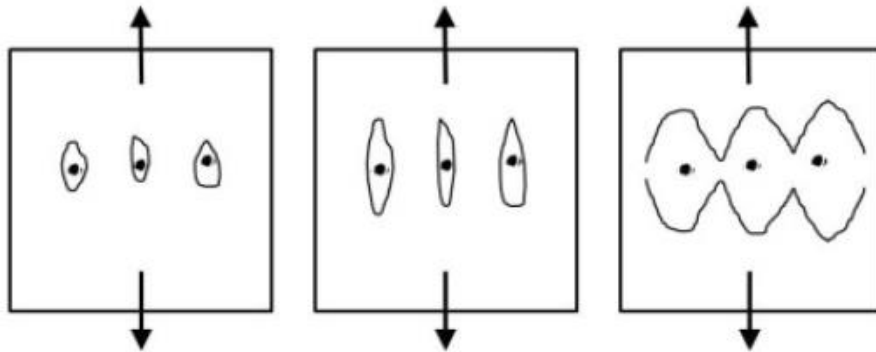
Η εργοσκλήρυνση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ικανότητας παραλαβής φορτίου ενός μετάλλου καθώς παραμορφώνεται. Εμποδίζει επίσης παραμορφώσεις από το να συγκεντρωθούν κατά τη διάρκεια διαμόρφωσης, οπότε η παραμόρφωση είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε ολόκληρο το τμήμα του υλικού που εκτίθεται στις τάσεις που το διαμορφώνουν. Ως αποτέλεσμα, κάθε εντοπισμένη περιοχή του μέσου αραιώνει ομοιόμορφα κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης .

Η ικανότητα παραλαβής φορτίου του μετάλλου καθώς παραμορφώνεται αντιτίθεται στην μείωση της διατομής του μετάλλου καθώς λεπταίνει. Υπάρχει μια μέγιστη τιμή όπου η αύξηση της τάσης λόγω της μείωσης της μεταλλικής διατομής γίνεται μεγαλύτερη από την αύξηση της ικανότητας φόρτωσης φορτίου του μετάλλου λόγω της εργοσκλήρυνσης. Ο λαιμός αρχίζει σε

αυτό το σημείο, καθώς το μέταλλο αρχίζει να αραιώνει περισσότερο σε μια τοπική περιοχή. Οποιαδήποτε επιπλέον παραμόρφωση συγκεντρώνεται στην περιοχή του λαιμού, ενώ τα φορτία στις γύρω περιοχές μειώνονται.

1.6.6. Σηματισμός ρωγμής

Οι ρωγμές που σχηματίζονται κατά τη διαμόρφωση μετάλλων συμβαίνουν με μια διαδικασία θραύσης που περιλαμβάνει το σχηματισμό και την ανάπτυξη κενών γύρω από σωματίδια δεύτερης φάσης που περιλαμβάνονται στο μέταλλο. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα κενά σχηματίζονται, αναπτύσσονται και ενώνονται για να σχηματίσουν μια ρωγμή. Έτσι, η παρουσία δευτερευόντων σωματιδίων και εγκλεισμάτων μειώνει τη διαμορφωσιμότητα ενός μετάλλου επειδή είναι τοποθεσίες όπου οι ρωγμές δημιουργούνται.



Εικόνα 40 : Σχηματισμός ρωγμής

Στα κράματα αλουμινίου, ο σίδηρος και το πυρίτιο, που θεωρούνται ως ακαθαρσίες αντιδρούν με τα άλλα στοιχεία και σχηματίζουν σκληρά σωματίδια. Για ένα κράμα που περιέχει εγκλείσματα, η μείωση της περιεκτικότητας σε ακαθαρσίες θα συμβάλει στη μείωση του αριθμού των εγκλεισμάτων και στη βελτίωση της δυνατότητας σχηματισμού [1, 3-4].

1.6.7. Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] Richard Gendey. (2002), Sheet Metal Formability, advanced materials and processes, *Advanced Materials and Processes*, 172, 33-37
- [2] R.Chandramouli. (2014). Formability [Pdf διαφάνειες]. Λήφθηκε από http://nptel.ac.in/courses/112106153/Module%2010/Lecture%203/Module_10_Lecture_3_Formability.pdf



- [3] Michael Pfeifer. (2014). Sheet Metal Formability. *Industrial Metallurgista LLC*. Λήφθηκε από <https://www.imetllc.com/author/mpfeifer/>
- [4] WogasoWollaaM.J.DavidsonaA.K.Khanrab. (2014). Studies on the formability of powder metallurgical aluminum–copper composite, *Materials and Design*, 59, 151-159.



1.7. Ψυχρές κατεργασίες

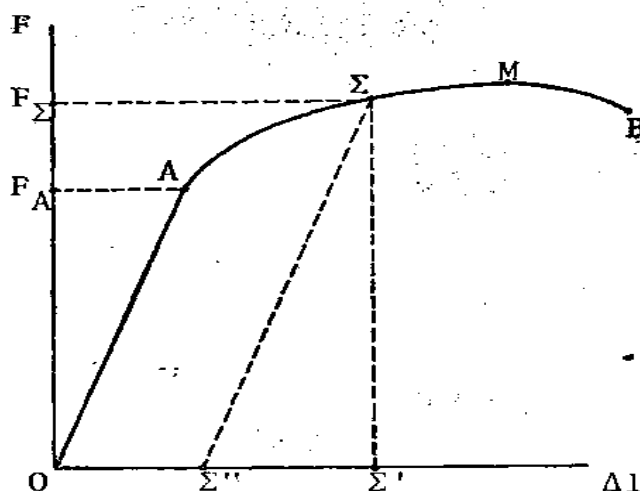
1.7.1. Γενικά για τις ψυχές κατεργασίες

Οι βασικές ψυχρές κατεργασίες διαμόρφωσης μετάλλων είναι η ψυχρή έλαση, η σφυρηλάτηση, η έλξη, η περιδίνηση, οι κατεργασίες πρέσας, η τάνυση κ.ά. Πολλές από τις κατεργασίες αυτές παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά με τις θερμές κατεργασίες και είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν στις ίδιες μηχανές.

Η βασική ιδιομορφία των ψυχρών κατεργασιών είναι η διαφορετική συμπεριφορά των μετάλλων στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Τα κύρια, κοινά χαρακτηριστικά των ψυχρών κατεργασιών μετάλλων συνοψίζονται ώς εξής:

1. Μεγάλες δυνάμεις παραμόρφωσης.
2. Έντονη φθορά εργαλείων.
3. Διαδοχικές θερμικές κατεργασίες για την απαλοιφή των εσωτερικών τάσεων και την αύξηση της ολκιμότητας του υλικού.
4. Σχετικά μεγάλος αριθμός αχρήστων κομματιών.
5. Σχετικά μεγάλος όγκος άχρηστου υλικού.
6. Ικανοποιητική ακρίβεια διαστάσεων.
7. Καλή εξωτερική επιφάνεια.
8. Βελτιωμένη κρυσταλλική δομή και μηχανική αντοχή.
9. Μικρό κόστος παραγωγής για μεγάλη ποσότητα κομματιών.
10. Ειδικευμένο προσωπικό και εκτεταμένη μηχανουργική υποδομή.

Τα χαρακτηριστικά αυτά υπαγορεύονται σε μικρό ή μεγάλο βαθμό από τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού που είναι ο καθοριστικός παράγοντας στις ψυχρές κατεργασίες.



Εικόνα 41 : Συμπεριφορά όλκιμων μετάλλων σε εφελκυσμό

Οι ψυχρές κατεργασίες γενικά εφαρμόζονται στα όλκιμα υλικά. Η τυπική συμπεριφορά των όλκιμων μετάλλων φαίνεται στην εικόνα 34, στο διάγραμμα δύναμης επιμήκυνσης για στατικά φορτία.

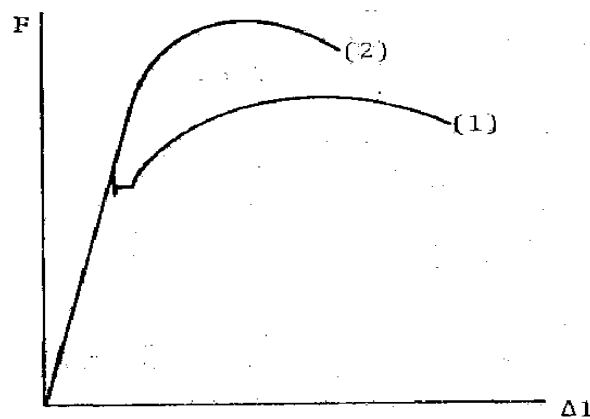
Με την αύξηση του φορτίου F το υλικό παραμορφώνεται στην αρχή αναλογικά μέχρι το σημείο A , και στη συνέχεια πλαστικά από το σημείο A έως το σημείο B όπου και έχουμε θραύση του υλικού. Η παραμόρφωση του υλικού όταν το φορτίο F είναι μικρότερο του φορτίου F_A , είναι προσωρινή και μετά την απομάκρυνση του φορτίου το σώμα επανέρχεται στις αρχικές του διαστάσεις.

Αντίθετα για φορτία μεγαλύτερα από το σημείο αναλογίας A μέχρι και το μέγιστο φορτίο F_M , η παραμόρφωση είναι μόνιμη. Έτσι εάν φορτίσουμε το υλικό με δύναμη F_S το σώμα θα παραμορφωθεί πλαστικά επιμηκυνόμενο μέχρι του σημείου Σ' . Μετά την απομάκρυνση του φορτίου το σώμα δεν επανέρχεται στις παλιές του διαστάσεις, αλλά διατηρεί το μέρος της παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στο σημείο Σ'' . Το σημείο Σ'' βρίσκεται αν φέρουμε από το σημείο Σ την παράλληλο προς την OA . Εάν το φορτίο υπερβεί το μέγιστο φορτίο F_M επέρχεται έντονη παραμόρφωση του υλικού, εμφάνιση ρωγμών και τελική θραύση του υλικού.

Τα φορτία που χρησιμοποιούνται κατά τις ψυχρές κατεργασίες είναι συνήθως μικρότερα του μέγιστου φορτίου F_M και φυσικά μεγαλύτερα από το φορτίο αναλογίας F_A . Η συμπεριφορά των μετάλλων σε δυναμικά φορτία είναι σε πολλές περιπτώσεις διαφορετική με γενικό χαρακτηριστικό τη μεγαλύτερη πλαστικότητα του υλικού. Είναι λοιπόν δυνατό να γίνει εκμετάλλευση των διαφορών που παρουσιάζονται, για την καλύτερη διαμόρφωση των υλικών στην ψυχρή κατάσταση με δυναμικές μεθόδους ανάλογες των αντιστοίχων για τις θερμές κατεργασίες. Τις μεθόδους αυτές θα εξετάσουμε στο τέλος του κεφαλαίου αυτού.

Η συμπεριφορά των μετάλλων δεν είναι διαφορετική μόνο κατά τη διάρκεια των ψυχρών κατεργασιών αλλά και το τελικό προϊόν παρουσιάζει σημαντικά βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες συγκρινόμενο με προϊόντα θερμής κατεργασίας. Ιδιαίτερα αισθητή είναι η διαφορά στην περίπτωση του χάλυβα, όπως δείχνει η εικόνα 35, όπου φαίνεται το διάγραμμα φορτίου παραμόρφωσης για το ίδιο κράμα χάλυβα μετά θερμή έλαση (1), και ψυχρή έλξη (2).

Είναι σαφής η αύξηση της μέγιστης αντοχής του υλικού σε φορτίο και η μείωση της ολκιμότητας του μετά την ψυχρή κατεργασία.



Εικόνα 42 : Φορτίο παραμόρφωσης μετά από κατεργασία

Ένα σημείο που πρέπει επίσης να τονισθεί στην περίπτωση των ψυχρών κατεργασιών είναι η τάση του υλικού μετά την πλαστική παραμόρφωση να αποκτήσει τις παλιές του διαστάσεις. Η τάση αυτή δημιουργεί όπως είναι φυσικό, προβλήματα ακρίβειας διαστάσεων του τελικού προϊόντος και πρέπει να λαμβάνεται προκαταβολικά υπόψη κατά τον σχεδιασμό των εργαλείων και μήτρων της ψυχρής κατεργασίας. Στη συνέχεια θα εξετασθούν οι βασικοί τρόποι επεξεργασίας μετάλλων στην ψυχρή κατάσταση, τα συναφή μηχανήματα που χρησιμοποιούνται και οι μορφές των προϊόντων που παράγονται με κάθε μία μέθοδο.

Γενικό χαρακτηριστικό σχεδόν όλων των μεθόδων ψυχρής κατεργασίας είναι ο μεγάλος όγκος παραγωγής ο οποίος απαιτεί εκτεταμένο μηχανικό εξοπλισμό, ειδικευμένο προσωπικό έλεγχο ποιότητας πρώτων υλών και τελικών προϊόντων και οργάνωση εργοστασίου σε βιομηχανικό επίπεδο [1].

1.7.2. Βιβλιογραφία κεφαλαίου

[1] Π.Ν. Μπότσαρης, Π.Δ. Σπάρης. (2011). *Τεχνολογία παραγωγής Ι*. Αθήνα : Εκδόσεις Τζιόλα

1.8. Έλαση

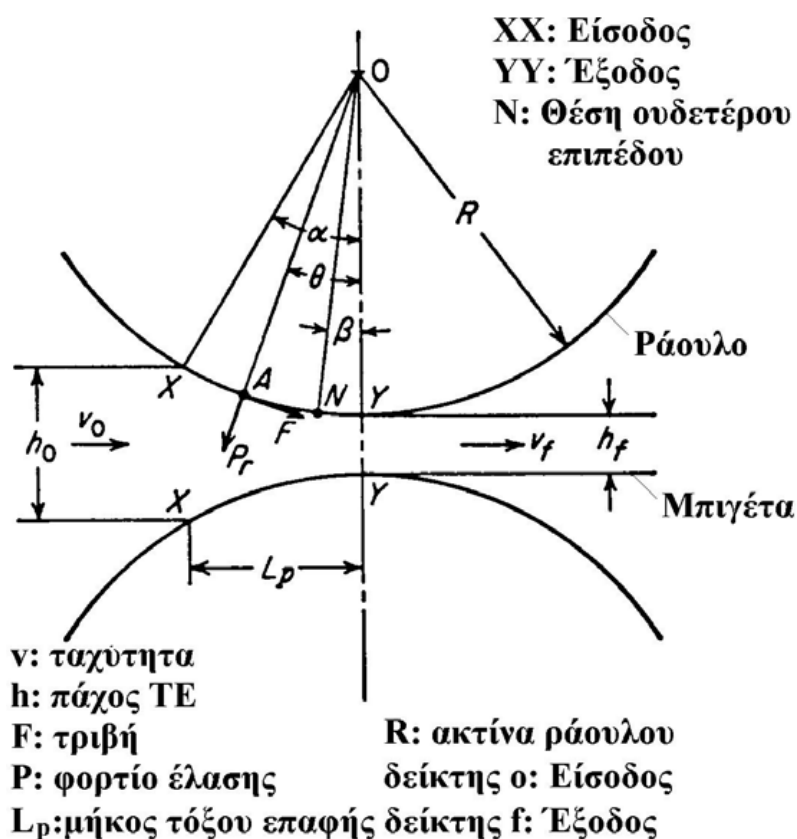
1.8.1. Εισαγωγή

Κατά την έλαση (rolling), το τεμάχιο υπό τη μορφή ράβδου ή πλάκας υφίσταται πλαστική παραμόρφωση διερχόμενο μέσα από το άνοιγμα μεταξύ δύο αντίθετα περιστρεφόμενων ράουλων. Αποτέλεσμα της έλασης είναι η παραγωγή αντίστοιχου προϊόντος με μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος.

Η έλαση αναπτύχθηκε περί τα τέλη του 16^{ου} αιώνα. Διακρίνεται σε:

- Έλαση μπιγέτας, όπου σημειώνεται μεταβολή και στο πλάτος του παραγόμενου προϊόντος, γνωστό και ως πλευρική διόγκωση (spreading).
- Έλαση πλάκας, κατά την οποία δεν παρατηρείται μεταβολή στο πλάτος του παραγόμενου προϊόντος.

Η έλαση μπορεί να πραγματοποιηθεί και ως ψυχρή και ως θερμή κατεργασία [1].



Εικόνα 43 : Σχηματική αναπαράσταση της έλασης

1.8.2. Διαδικασία παραγωγής προϊόντων έλασης αλουμινίου

Από την διαδικασία της έλασης παράγονται προϊόντα αλουμινίου, όπως φύλλα, ταινίες, Foil κλπ. Η παραγωγή των προϊόντων έλασης γίνεται, συνήθως, σε δύο στάδια: την θερμή έλαση και την ψυχρή έλαση.

1.8.3. Θερμή έλαση αλουμινίου

Η πρώτη ύλη αλουμινίου της θερμής έλασης είναι μια ορθογωνική πλάκα με πάχος 200-600mm και με βάρος από 500-10000 κιλά. Οι δύο όψεις της πλάκας торνάρονται



Εικόνα 44 : Θερμή έλαση αλουμινίου

ώστε να αφαιρεθεί το επιφανειακό επίστρωμα που λόγω της διαδικασίας της χύτευσης παρουσιάζει μια ιδιαίτερη και ανεπιθύμητη δομή από την υπόλοιπη μάζα της πλάκας. Οι πλάκες αλουμινίου προθερμαίνονται σε θερμοκρασία 455 ως 525 °C εξαρτώμενη από τη φύση του κράματος. Η διεργασία της έλασης γίνεται σε προκαθορισμένη ελεγχόμενη θερμοκρασία. Η διαδικασία της έλασης συνεχίζεται μέχρι του επιθυμητού πάχους που μπορεί να φθάσει μέχρι 3-5 mm. Τα προϊόντα της θερμής έλασης μπορεί να βρίσκονται είτε σε μορφή μεγάλων πλακών είτε περιτυλιγμένα σε ρολλούς (μπομπίνες).

1.8.4. Ψυχρή έλαση αλουμινίου

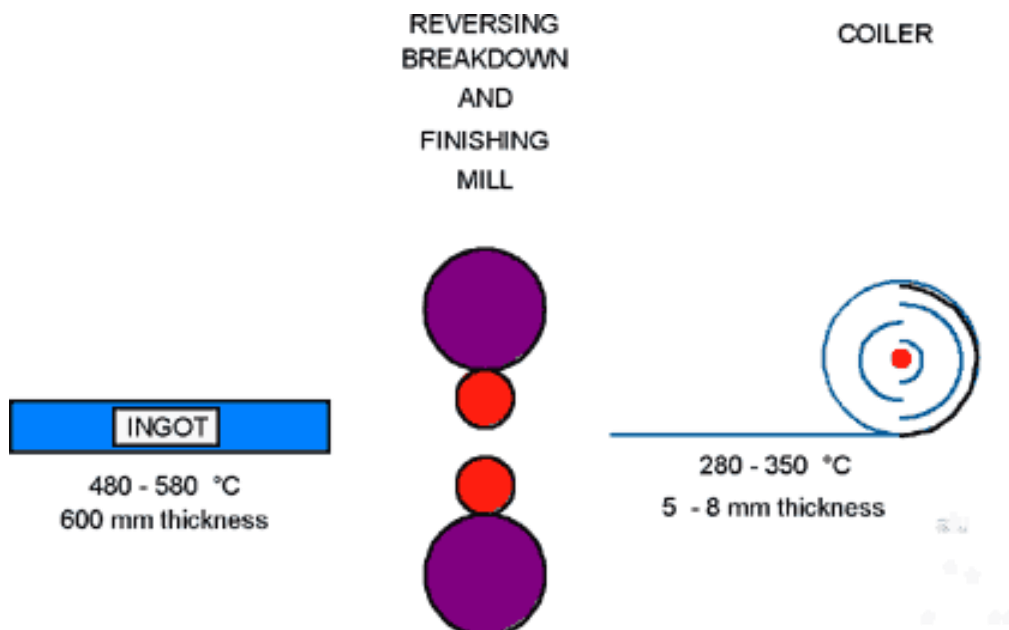
Η διαδικασία αυτή ακολουθείται για την παραγωγή λεπτότερων φύλλων αλουμινίου. Η ψυχρή έλαση γίνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Γίνεται σε μια διάταξη πολλαπλών ελάστρων. Κάθε ένα έλαστρο μειώνει το πάχος της επίπεδης πλάκας ή του ρολλού όπως αυτά παράγονται από την διαδικασία της θερμής έλασης.

Με την ψυχρή έλαση κραμάτων αλουμινίου μπορεί να φθάσει ως και 0,05mm. Το καθαρό αλουμίνιο μπορεί να φθάσει σε πάχη κάτω των 0,003mm. Καθώς προχωρεί ο βαθμός έλασης (συνεχής μείωση του πάχους), το αλουμίνιο σκληραίνει με συνέπεια την απαίτηση μεγαλύτερων δυνάμεων. Έτσι απαιτούνται ενδιάμεσες θερμικές επεξεργασίες προκειμένου να μαλακώνει το μέταλλο.

1.8.5. Προϊόντα έλασης αλουμινίου

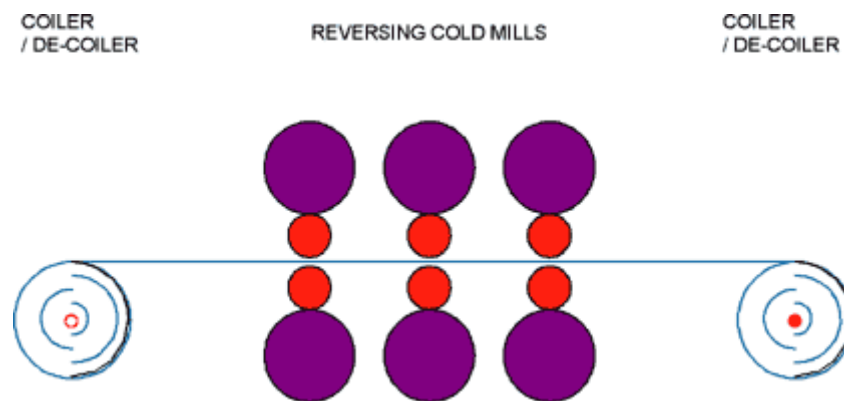
Τα προϊόντα της έλασης μπορούν να χωριστούν σε αρχικό επίπεδο στα :

- Φύλλα: Επίπεδα προϊόντα έλασης, ορθογωνικής εγκάρσιας διατομής, με πάχος, μεγαλύτερο από 0,20mm που παραδίνονται σε ευθύγραμμα ή δίσκους με ψαλιδισμένα (ξακρισμένα) ή πριονισμένα άκρα. Φύλλα με πάχος μεγαλύτερο από 6 m.m. ονομάζονται "χοντρά φύλλα



Εικόνα 45 : Έλαση φύλλων

- Ταινίες: Επίπεδα προϊόντα έλασης, ορθογωνικής εγκάρσιας διατομής με πάχος πάνω από 0,2mm και μέχρι 6mm που παραδίνονται σε ρόλους.
- Λεπτά φύλλα (foil): Επίπεδα προϊόντα έλασης, πάχους 0,6mm που παραδίνονται σε ρολούς.
- Βαμμένα φύλλα: Τα έτοιμα βαμμένα φύλλα αλουμινίου έχουν μια σειρά εφαρμογών εξ αιτίας της υψηλής αντοχής στη διάβρωση, την εύκολη μορφοποίησή τους σε διάφορα σχήματα, την ποικιλία και την αντοχή των χρωματικών επικαλύψεων, τον εύκολο καθαρισμό. Κατάλληλα διαμορφωμένα σε λωρίδες χρησιμοποιούνται για την κάλυψη οροφών, για την κατασκευή ρολών, κατασκευή πορτοπααραθύρων, για την κάλυψη προσόψεων, για την κάλυψη στεγών, για την κατασκευή τεντών και στόρς. Τα φύλλα αλουμινίου μπορούν να συνδυασθούν με πολυουρεθάνη για την δημιουργία προϊόντων με αυξημένες θερμομονωτικές και ηχομονωτικές ιδιότητες.



Εικόνα 46 : Έλαση βαμμένων φύλλων

Σε όλες τις εφαρμογές των βαμμένων φύλλων αλουμινίου απαιτείται πολύ καλή πρόσφυση των των χρωματικών επικαλύψεων, καλή εμφάνιση, και σταθερότητα των χρωμάτων στο χρόνο. Για τους λόγους αυτούς η βαφή των φύλλων αλουμινίου γίνεται σε ειδικές κατάλληλα εξοπλισμένες μονάδες.

Η έλαση εκτελείται σε διάφορες φάσεις (πάσα). Το πρωτογενές υλικό είναι πλίνθωμα (ingot), προϊόν χύτευσης, ενώ τα προϊόντα των επόμενων φάσεων διακρίνονται σε επιμήκη (ράβδοι, μπιγέτες, μορφοδοκοί) και σε πλατιά προϊόντα (πλάκες, ελάσματα, ταινίες) [2-3].



1.8.6. Τυποποίηση

Τα προϊόντα της έλασης χωρίζονται σε :

a) Ημι-κατεργασμένα προϊόντα (semi-finished products)

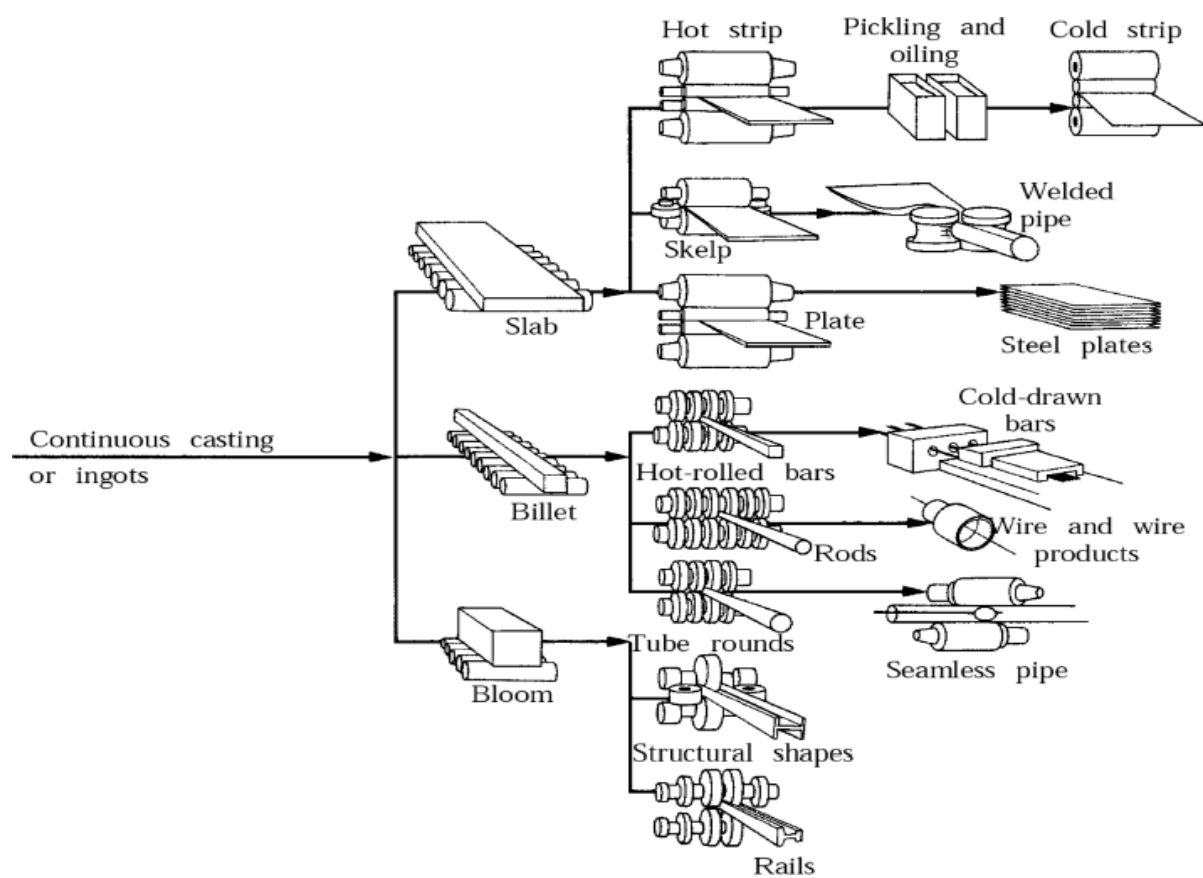
- Μπιγέτα πρώτης έλασης (bloom) – τετραγωνικής διατομής με εμβαδόν $A \geq 15 \times 15 \text{ cm}^2$
- Περαιτέρω μείωση του πάχους μπορεί να οδηγήσει σε:
 - Μπιγέτα (billet) τετραγωνικής διατομής με μικρότερο εμβαδόν ($A \geq 4 \times 4 \text{ cm}^2$) ή σε
 - Πλάκα (slab) ορθογωνικής διατομής με εμβαδόν μεγαλύτερο των 100 cm^2 και πλάτος τουλάχιστον διπλάσιο του πάχους της.

b) Τελικά προϊόντα (finished products)

Περαιτέρω διαμόρφωση των ημι-κατεργασμένων προϊόντων οδηγεί σε:

- Επιμήκη προϊόντα μορφής που προέρχονται από την έλαση μπιγетών (μορφοδοκοί, ήλοι με σπείρωμα, δακτύλιοι κλπ.) με ειδικές μεθόδους έλασης.
- Πλατιά προϊόντα που προέρχονται από την έλαση πλακών και διακρίνονται ανάλογα με το πάχος και το πλάτος τους σε:
 - Ελάσματα (plates) με πάχος μεγαλύτερο ή ίσο των 6 mm .
 - Λεπτά ελάσματα (sheets) με πάχος μικρότερο από 6 mm και πλάτος μεγαλύτερο ή ίσο των 600 mm .
 - Λεπτές λωρίδες (strips) με πάχος μικρότερο από 6 mm και πλάτος μικρότερο από 600 mm .

Προϊόντα έλασης φαίνονται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 40).

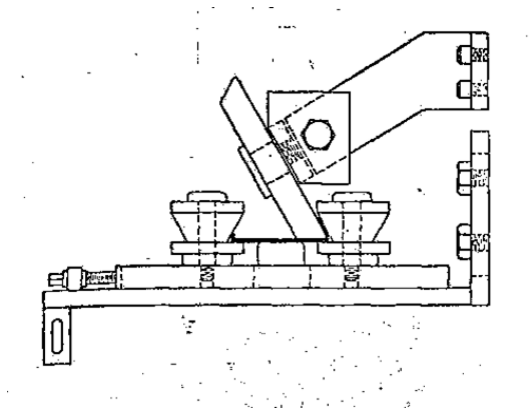


Εικόνα 47 : Προϊόντα έλασης

1.8.7. Διαμόρφωση ελασμάτων με έλαση

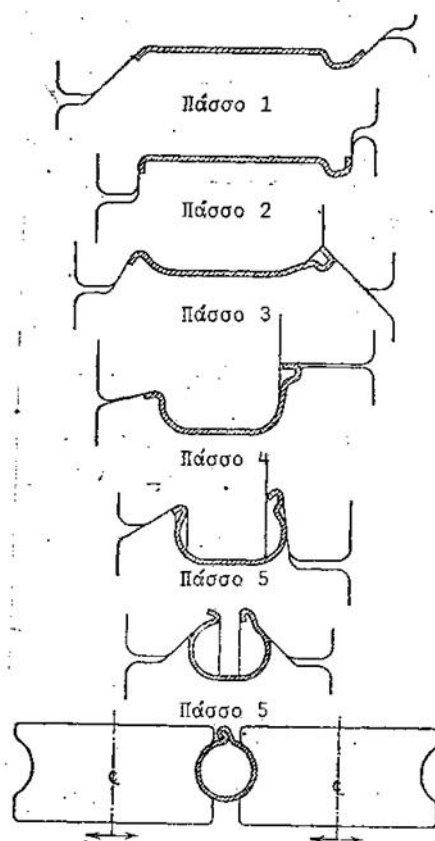
Η διαμόρφωση των ελασμάτων πραγματοποιείται σε διαδοχικές ελάσεις του υλικού από έλαστρα με κυλίνδρους κατάλληλης μορφής. Η εικόνα 8 δείχνει τις απαιτούμενες διαδοχικές φάσεις έλασης που χρειάζονται για το σχηματισμό της διατομής Z.

Για απλούστερες διατομές και κάμψεις ελασμάτων χρησιμοποιούνται διαδοχικά έλαστρα της μορφής που παρουσιάζονται στην εικόνα 42.



Εικόνα 48 : Κάμψεις ελασμάτων

Στην περίπτωση της διαμόρφωσης κλειστών διατομών, σωλήνων κλπ. είναι δυνατός ο σχηματισμός κατάλληλων χειλέων τα οποία συμπιεζόμενα δίνουν στεγανότητα, διαφορετικά χρησιμοποιείται ραφή με ηλεκτροσυγκόλληση. Τα διαδοχικά στάδια σχηματισμού σωλήνα με έλαση δείχνει η εικόνα 43.

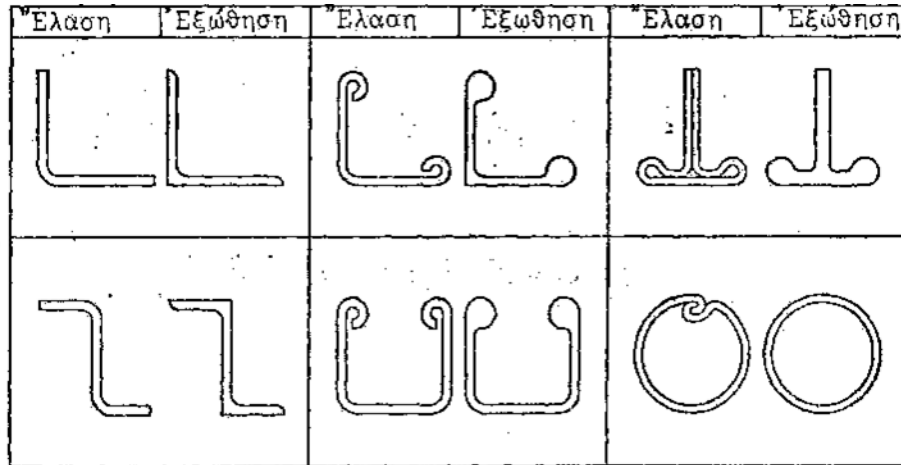


Εικόνα 49 : Διαδοχικά στάδια σχηματισμού σωλήνα

Όπως είναι γνωστό, διατομές κατασκευάζονται και με τη μέθοδο της εξώθησης. Στην εικόνα 10 παρουσιάζονται οι κυριότερες μορφές διατομών που παράγονται με τις δύο μεθόδους και οι βασικές διαφορές τους.

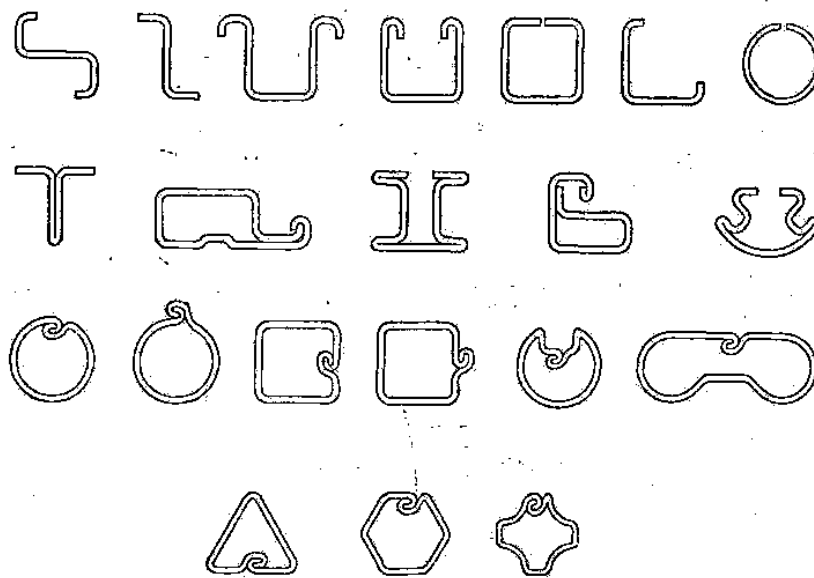
Η μέθοδος της ψυχρής έλασης παρουσιάζει μεγάλη παραγωγικότητα και καλή ποιότητα προϊόντων από άποψη ακρίβειας και εμφάνισης. Η μεγάλη ταχύτητα περιστροφής των ελαστρων, που φθάνει τα 70 m/min επιτρέπει την παραγωγή και 20.000 m ελασμάτων ημερησίως.

Τα ελάσματα αυτά κόβονται σε καθορισμένα μήκη και σε διάφορα μεγέθη με ελάχιστο όριο τα 30 cm. Το πάχος των ελασμάτων κυμαίνεται από 0.1 mm έως 20 mm, και φυσικά είναι ανάλογες και οι ακτίνες καμπυλότητας των ελασμάτων στα σημεία κάμψης. Η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας πρέπει να υπερβαίνει πάντοτε το πάχος του ελάσματος. Η μέθοδος της διαμόρφωσης ελασμάτων με ψυχρή έλαση χρησιμοποιείται σε μεγάλη έκταση για την παραγωγή χαλύβδινων σωλήνων με ραφή.



Εικόνα 50 : Μορφή προϊόντων με έλαση και εξώθηση

Η έλαση μετάλλων στη θερμοκρασία περιβάλλοντος χρησιμοποιείται κυρίως για τη διαμόρφωση φύλλων, ράβδων, ελασμάτων και διατομών. Τα χρησιμοποιούμενα μηχανήματα έχουν πολλά κοινά σημεία με τα αντίστοιχα των θερμών κατεργασιών και δεν θα χρειασθεί να τα εξετάσουμε λεπτομερειακά. Αρκεί μόνο να υπογραμμισθεί η γενικά βαρύτερη κατασκευή τους και ενδιάμεσες θερμικές κατεργασίες, κυρίως ανόπτηση, που υφίσταται το προϊόν ώστε να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση από πλευράς μηχανικών ιδιοτήτων και ιδίως ολκιμότητας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον από άποψη εφαρμογών και όγκου παραγωγής παρουσιάζει η έλαση διαμορφώσεως ελασμάτων και διατομών.



Εικόνα 51 : Έλαση διαμορφώσεως ελασμάτων κι διατομών

Με τη μέθοδο αυτή διαμορφώνονται διατομές διαφόρων σχημάτων, σωλήνες, προφίλ κλπ. χρησιμοποιώντας σαν πρώτη ύλη ελάσματα ορθογωνικής διατομής. Οι μορφές διατομών που παράγονται με τη μέθοδο αυτή παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία, όπως δείχνει η εικόνα 45.

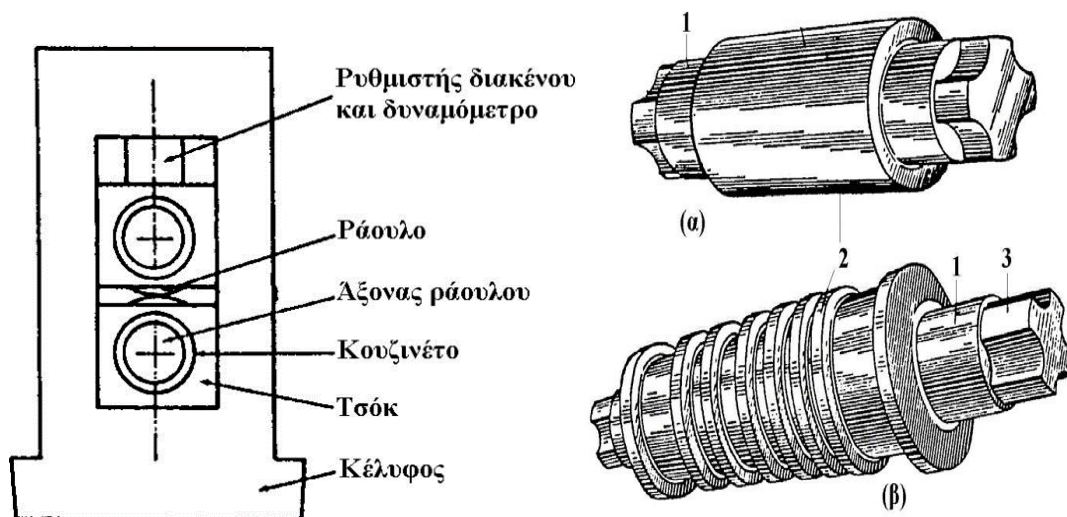
1.8.8. Εργαλειομηχανές έλασης

Η εργαλειομηχανή της έλασης ονομάζεται έλαστρο (mill). Τα δομικά μέρη ενός ελάστρου φαίνονται στην εικόνα 45. Αποτελείται από τα ράουλα (rolls), οι άξονες των οποίων στρέφονται μέσα σε κουζινέτα (bearings), ενώ όλα μαζί είναι εγκατεστημένα σε ειδικό κέλυφος (housing). Τα άκρα των αξόνων είναι κατάλληλα διαμορφωμένα ώστε να συνδέονται μέσω σταυροειδών συνδέσμων με το αξονικό σύστημα της εγκατάστασης, το οποίο με τη σειρά του μεταδίδει κίνηση στα ράουλα (ανεξάρτητη για κάθε ράουλο) παραλαμβάνοντας ισχύ από σύστημα ηλεκτροκινητήρα/μειωτήρα.

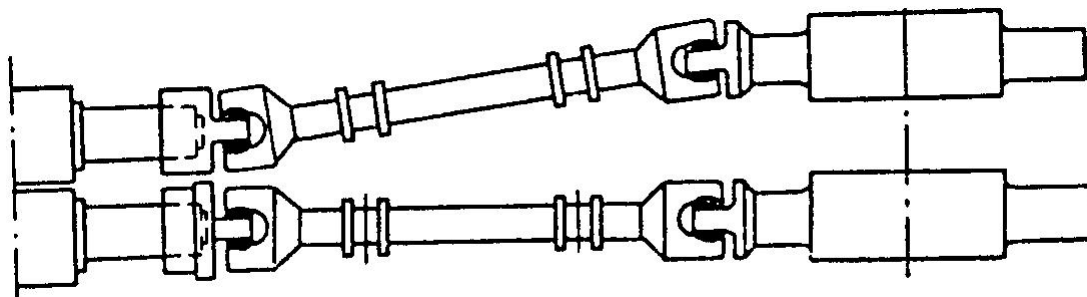
Τα ράουλα είναι χαλύβδινα κυλινδρικά τύμπανα με ομοιόμορφη διατομή ή έχουν διαμορφωθεί κατάλληλα (ράουλα μορφής), ώστε να αποδίδουν το αντίστοιχο γεωμετρικό σχήμα στο τελικό προϊόν. Τα ράουλα που επιτελούν την πλαστική παραμόρφωση τοποθετούνται με οριζόντιους άξονες το ένα πάνω στο άλλο, ενώ κατακόρυφα ράουλα χρησιμοποιούνται βοηθητικά για τον έλεγχο του πλάτους του τελικού προϊόντος.

Τα έλαστρα, ανάλογα με την εργασία που έχουν να επιτελέσουν και τα φορτία που δέχονται κατασκευάζονται σε ανάλογες διατάξεις. Οι διάφορες μορφές ελάστρων είναι οι ακόλουθες :

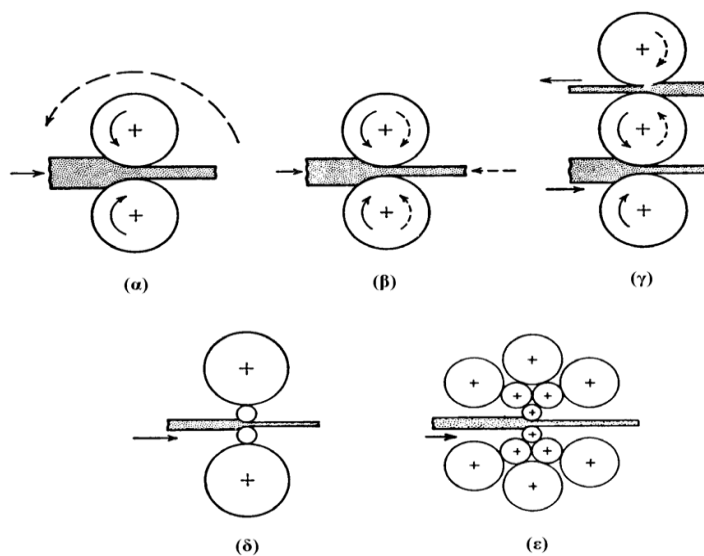
- Έλαστρο δύο ραούλων (2-high mill): Πρόκειται για την απλούστερη κατασκευή ελάστρου.
- Έλαστρο δύο ραούλων με αναστρεφόμενη κίνηση (2-high reversing mill): Εξασφαλίζει περαιτέρω μείωση του πάχους με αναστροφή της περιστροφής των ραούλων, αποφεύγοντας έτσι την μεταφορά του τεμαχίου σε άλλη θέση (εξοικονόμηση χρόνου κατεργασίας).
- Έλαστρο τριών ραούλων (3-high mill): Στρέφονται τα άνω και κάτω ράουλα ενώ των μεσαίο στρέφεται μέσω της αναπτυσσόμενης τριβής. Πρόκειται για εναλλακτική λύση της προηγούμενης μορφής.
- Έλαστρο τεσσάρων ραούλων (4-high mill): Τα ενεργά ράουλα είναι μικρότερης διαμέτρου και στηρίζονται σε δύο ράουλα αντιστήριξης μεγαλύτερης διαμέτρου για να αποφευχθεί ο κίνδυνος κάμψης τους από τα φορτία έλασης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας και μεγαλύτερη μείωση πάχους ανά πάσο.
- Έλαστρο τύπου cluster (cluster mill), στο οποίο κάθε ενεργό ράουλο στηρίζεται από δύο ράουλα αντιστήριξης και κάθε ράουλο αντιστήριξης από δύο άλλα αντιστήριξης, και κάθε ράουλο αντιστήριξης από δύο άλλα μεγαλύτερης διαμέτρου. Παραλλαγή του τύπου αυτού είναι το έλαστρο Sendzimir (εικόνα 48). Τα έλαστρα αυτά χρησιμοποιούνται για την κατεργασία πολύ λεπτών ελασμάτων (foils).



Εικόνα 52: Αριστερά : δομικά μέρη ελάστρου. Δεξιά : Τύποι ραούλων: (α) Κοινό ράουλο, (β) ράουλο μορφής 1: Άξονας έδρασης, 2: Κύριο σώμα ραούλου, 3: Άκρο σύνδεσης

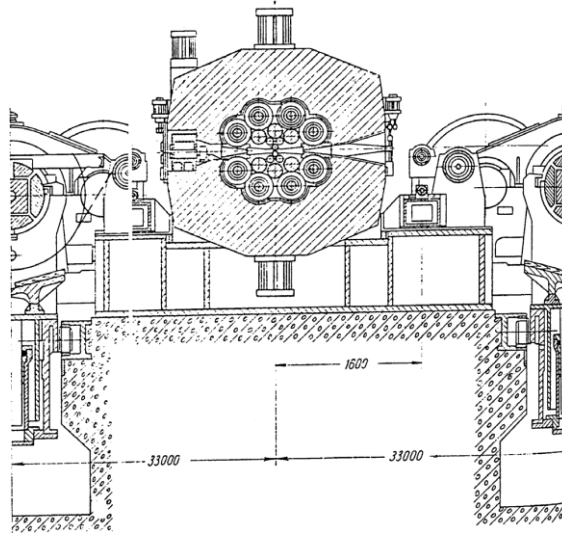


Εικόνα 53 : Αξονικό σύστημα ελάστρο

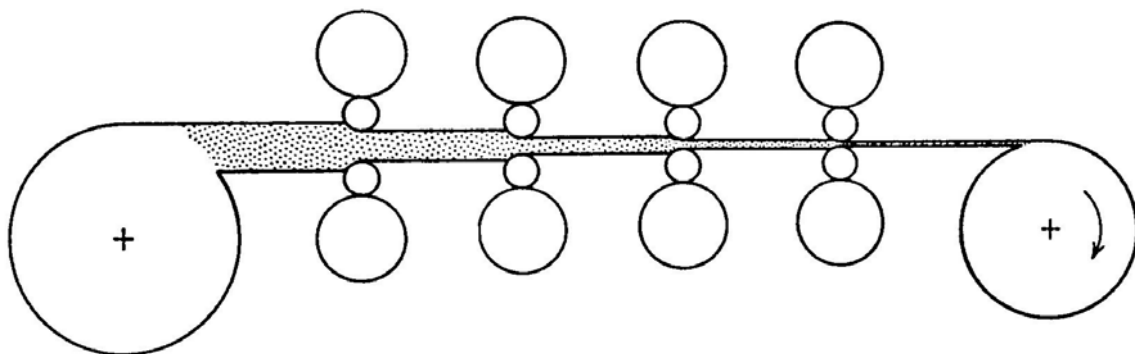


Εικόνα 54 : Τύποι ελαστρων: (α) 2-ραούλων, (β) 2-ράουλων με αναστρεφόμενη κίνηση, (γ) 3-ράουλων, (δ) 4-ράουλων, (ε) τύπου Cluster ή Sendzimir

Όταν απαιτείται μεγάλη παραγωγή, προτιμάται η έλαση εν σειρά, κατά την οποία τα έλαστρα τοποθετούνται το ένα μετά το άλλο (Εικόνα 50) και το κατεργαζόμενο τεμάχιο διέρχεται και κατεργάζεται συγχρόνως από όλα τα έλαστρα αποκτώντας έτσι βαθμιαία μείωση του πάχους του. Στην περίπτωση αυτή δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο συγχρονισμό των επιμέρους ελάστρων με ρύθμιση των ταχυτήτων περιστροφής τους, ώστε το τεμάχιο να εξέρχεται από κάθε θέση με την αντίστοιχη ταχύτητα εισόδου της επόμενης βαθμίδας ώστε να γίνει αποφυγή ολίσθησης του τεμαχίου στην εργαλειομηχανή.

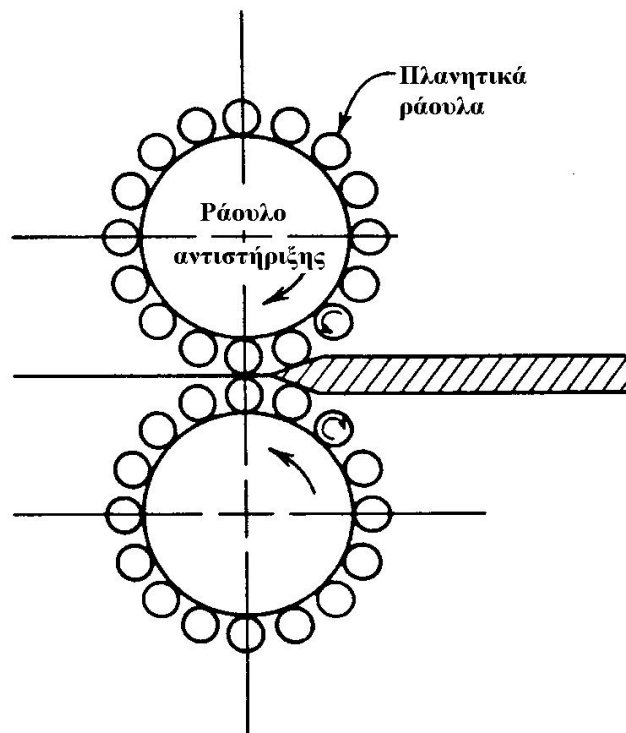


Εικόνα 55 : Εγκατάσταση ελάστρου Sendzimir



Εικόνα 56 : Διάταξη έλασης σε σειρά

Ειδική διάταξη ελάστρου είναι το έλαστρο με πλανητικά ράουλα (planetary mill). Αποτελείται από δύο ράουλα αντιστήριξης μεγάλης διαμέτρου που περιβάλλονται από μεγάλο αριθμό μικρών περιφερειακών (πλανητικών) ραούλων. Ο κύριος ρόλος των πλανητικών ραούλων είναι η απευθείας μείωση (εν θερμώ) του πάχους ελάσματος σε ένα πάσο. Καθένα απ' αυτά εξασφαλίζει σχεδόν ομοιόμορφη μείωση πάχους και είναι διαταγμένα έτσι ώστε, μόλις παύει την επενέργεια του ένα ζεύγος πλανητικών ραούλων, να αναλαμβάνει δράση το επόμενο ζεύγος. Η συνολική δράση με τη χρήση πλανητικών ραούλων προσιδιάζει περισσότερο με την διαδικασία σφυρηλάτησης [1].

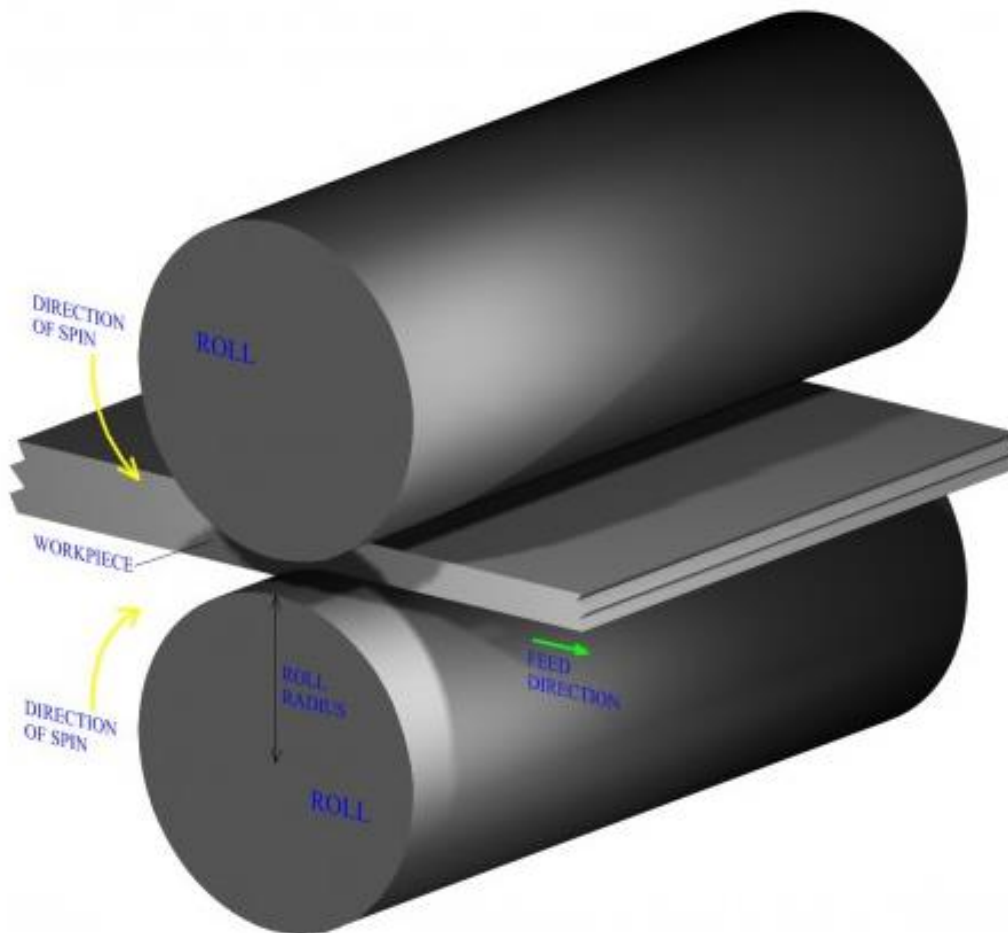


Εικόνα 57 : Έλαστρο με πλανητικά ράουλα

1.8.9. Αρχές της έλασης

Οι περισσότερες εργασίες έλασης μετάλλων έχουν κοινό το κομμάτι της πλαστικής παραμόρφωσης από συμπιεστικές δυνάμεις μεταξύ δύο συνεχώς περιστρεφόμενων κυλίνδρων. Αυτές οι δυνάμεις δρουν για να μειώσουν το πάχος του μετάλλου και να επηρεάσουν τη δομή των κόκκων. Η μείωση του πάχους μπορεί να μετρηθεί με τη διαφορά πάχους πριν και μετά τη μείωση, αυτή η τιμή ονομάζεται βύθισμα. Εκτός από τη μείωση του πάχους του τεμαχίου, οι κύλινδροι δρουν επίσης για να τροφοδοτούν το υλικό καθώς στρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις μεταξύ τους. Επομένως, η τριβή αποτελεί απαραίτητο μέρος της διαδικασίας κύλισης, αλλά η υπερβολική τριβή μπορεί να αποβεί επιζήμια για διάφορους λόγους. Είναι σημαντικό ότι σε μια διεργασία έλασης το επίπεδο τριβής μεταξύ των

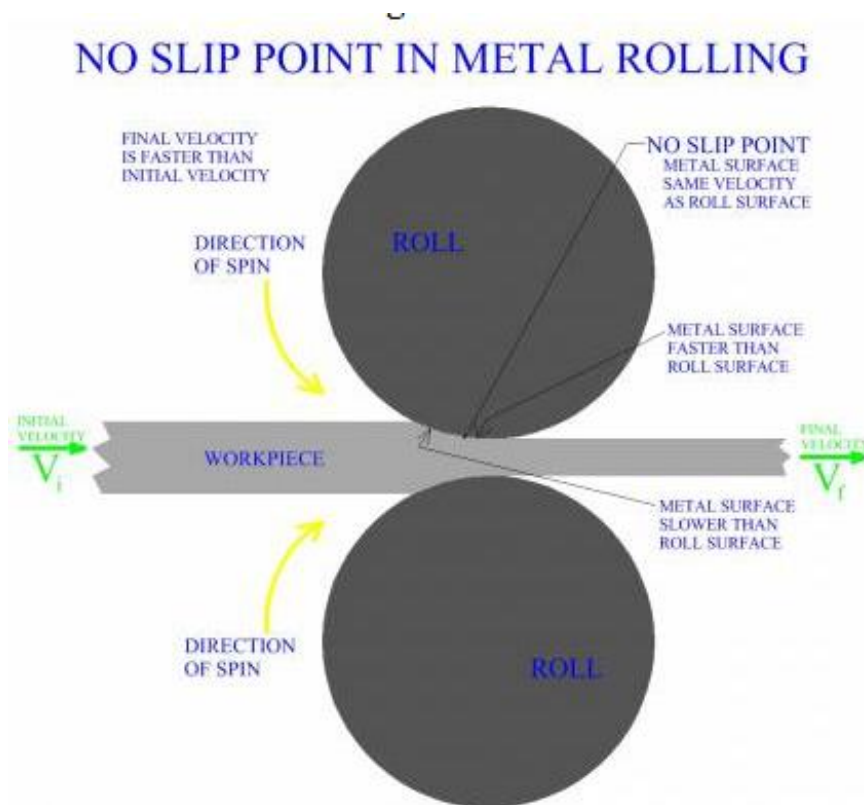
κυλίνδρων και του υλικού εργασίας ελέγχεται, τα λιπαντικά μπορούν να βοηθήσουν σε αυτό. Μια βασική επίπεδη διαδικασία κύλισης παρουσιάζεται στο σχήμα, αυτή η διαδικασία κατασκευής χρησιμοποιείται για τη μείωση του πάχους ενός τεμαχίου εργασίας.



Εικόνα 58 : Έλαση

Κατά τη διάρκεια μιας κατεργασίας έλασης, αλλάζει το γεωμετρικό σχήμα του τεμαχίου υπό επεξεργασία, αλλά ο όγκος του παραμένει ουσιαστικά ο ίδιος. Η ζώνη κύλισης είναι η περιοχή πάνω από την οποία οι κύλινδροι επενεργούν πάνω στο υλικό, εδώ γίνεται η πλαστική παραμόρφωση της κατεργασίας. Ένας σημαντικός παράγοντας στην έλαση μετάλλων είναι ότι λόγω της διατήρησης του όγκου του υλικού με τη μείωση του πάχους, το μέταλλο που εξέρχεται από τη ζώνη κύλισης θα κινείται γρηγορότερα από το μέταλλο που εισέρχεται. Οι ίδιοι οι κύλινδροι περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα, οπότε σε κάποιο σημείο της ζώνης κύλισης η επιφανειακή ταχύτητα των κυλίνδρων και εκείνη του υλικού είναι ακριβώς η ίδια.

Αυτό ονομάζεται σημείο μηδενικής ολίσθησης . Πριν από αυτό το σημείο τα ρολά κινούνται ταχύτερα από το υλικό, μετά από αυτό το σημείο το υλικό κινείται γρηγορότερα από τα ρολά.



Εικόνα 59 : Ουδέτερο σημείο έλασης

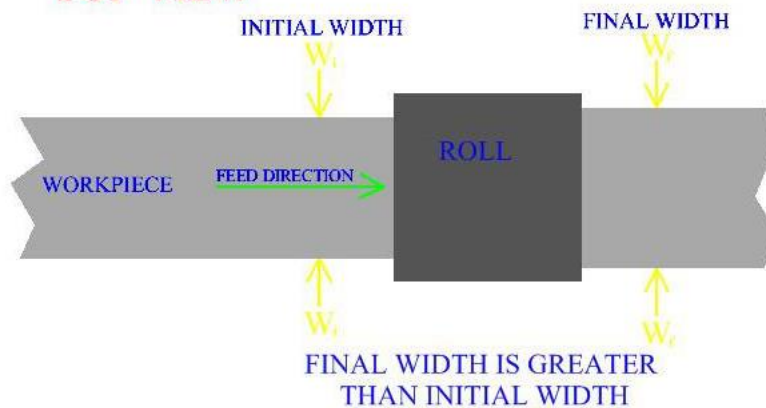
Μερικές φορές στην έλαση, εφαρμόζεται τάση σε ένα τμήμα του τεμαχίου καθώς κυλιέται, ώστε να υποβοηθήσει την διεργασία. Αυτή η τάση μπορεί να εφαρμοστεί στο μπροστινό μέρος (μπροστινή τάση), στο πίσω (πίσω τάση) ή και στις δύο πλευρές. Αυτή η τεχνική θα βοηθήσει τις δυνάμεις που είναι απαραίτητες για τη διαμόρφωση του τεμαχίου και συνήθως χρησιμοποιείται σε δύσκολα για να ελαστούν υλικά.

1.8.10. Πλάτυνση τεμαχίου

Στις εργασίες έλασης μετάλλων, η πλαστική παραμόρφωση που προκαλεί μείωση του πάχους θα προκαλέσει επίσης αύξηση του πλάτους του τμήματος, αυτό ονομάζεται πλάτυνση.

SPREADING IN METAL ROLLING

TOP VIEW

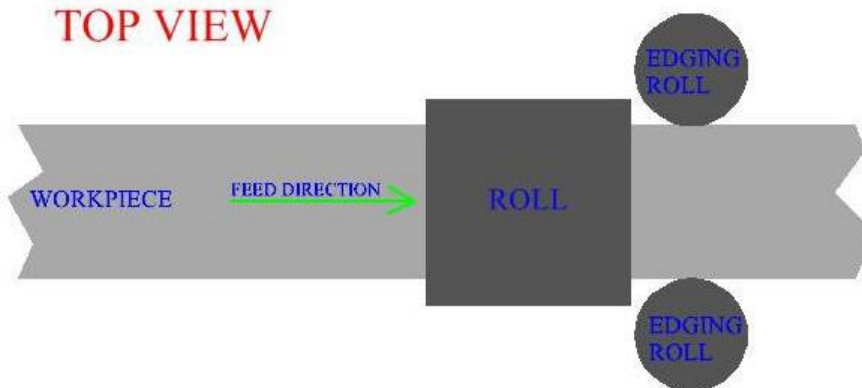


Εικόνα 60 : πλάτυνση τεμαχίων κατά την έλαση

Όταν το τεμάχιο προς κατεργασία έχει μεγάλη αναλογία πλάτους προς πάχος, η αύξηση του πλάτους είναι σχετικά μικρή και συνήθως δεν προκαλεί ανησυχίες στη βιομηχανική πρακτική παρασκευής. Σε περιπτώσεις μικρού λόγου πλάτους προς πάχος, όπως ράβδος με τετραγωνική διατομή, η πλάτυνση μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα. Κάθετοι κύλινδροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μειώσουν την πλάτυνση του υλικού και να διατηρήσουν σταθερό πλάτος.

EDGING ROLLS USED TO MAINTAIN WIDTH

TOP VIEW

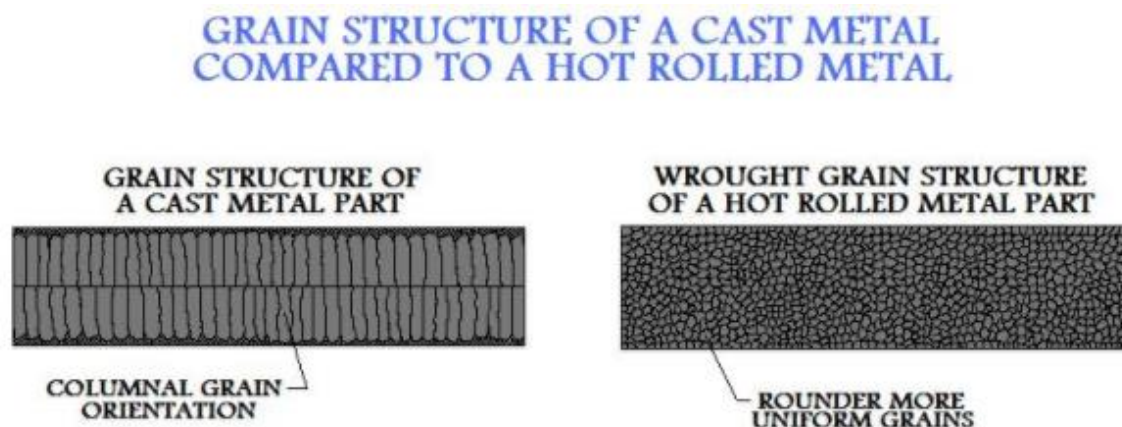


Εικόνα 61 : Μείωση πλάτυνσης κατά την έλαση

1.8.11. Δομή κόκκων

Στην συνήθη βιομηχανική πρακτική, η συνεχής χύτευση ακολουθείται από θερμή έλαση σε πλάκα. Εκτός από την παραγωγή ενός χρήσιμου τεμαχίου για περαιτέρω επεξεργασία, η διαδικασία θερμής έλασης μετατρέπει τη δομή χυτευμένου κόκκου σε δομή σφυρήλατου κόκκου. Το αρχικό υλικό χύτευσης θα έχει μια μη ομοιόμορφη δομή κόκκων, τυπικά μεγάλους κιονοειδείς κόκκους που αναπτύσσονται προς την κατεύθυνση της στερεοποίησης. Αυτές οι δομές είναι συνήθως εύθραυστες με περιορισμένα όρια κόκκων. Η δομή χύτευσης χαρακτηρίζεται περιέχει πολλά ελαττώματα όπως πορώδες που προκαλείται από αέρια, κοιλότητες συρρίκνωσης και στερεά εγκλείσματα ξένου υλικού που παγιδεύεται στο μέταλλο, όπως μεταλλικά οξείδια.

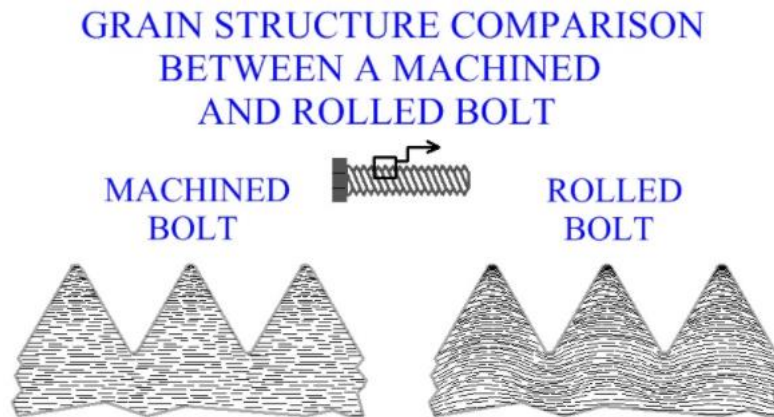
Η έλαση ενός μετάλλου πάνω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης διαχωρίζει την παλιά δομή κόκκων και μετατρέπει μια νέα. Τα όρια των κόκκων καταστρέφονται και δημιουργούνται νέα σκληρότερα, μαζί με μια πιο ομοιόμορφη δομή κόκκων. Η έλαση μετάλλων ωθεί το υλικό, κλείνοντας τις κενές θέσεις και τις κοιλότητες μέσα στο μέταλλο. Επιπλέον, η θερμή έλαση διασπά τα εγκλείσματα και διανέμει το υλικό τους καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας.



Εικόνα 62 : Δομή κόκκων στην έλαση

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα πλεονεκτήματα της διαμόρφωσης μετάλλου δεν είναι μόνο στη δημιουργία χρήσιμων γεωμετρικών μορφών, αλλά και στη δημιουργία επιθυμητών ιδιοτήτων του υλικού. Οι μέθοδοι ψυχρής έλασης, όπως συζητήθηκε προηγουμένως, είναι χρήσιμες για την απόδοση αντοχής και ευνοϊκού προσανατολισμού κόκκων. Δεδομένου ότι η έλαση μετάλλων επηρεάζει τον προσανατολισμό του κόκκου, ένα τμήμα μπορεί να ελάσσεται κατά τρόπο ώστε να δημιουργούνται κόκκοι προσανατολισμένοι προς μία κατεύθυνση έτσι ώστε να δίνουν κατευθυντική αντοχή σε ένα τμήμα χρήσιμο στην ειδική εφαρμογή αυτού του μέρους. Ένα παράδειγμα αυτού μπορεί να είναι η διαφορά στη δομή κόκκων ανάμεσα στα σπειρώματα ενός κοχλία παραγόμενου από κοπή και ενός κοχλία παραγόμενου από

έλαση. Ο ευνοϊκός προσανατολισμός του κοχλία με ψυχρή έλαση θα δώσει μια κατευθυντική δύναμη ωφέλιμη για την εφαρμογή του.



Εικόνα 63 : Σύγκριση δομής κόκκων κοχλία προερχόμενου από έλαση και κοπή

1.8.12. Ράουλα των εργαλειομηχανών έλασης

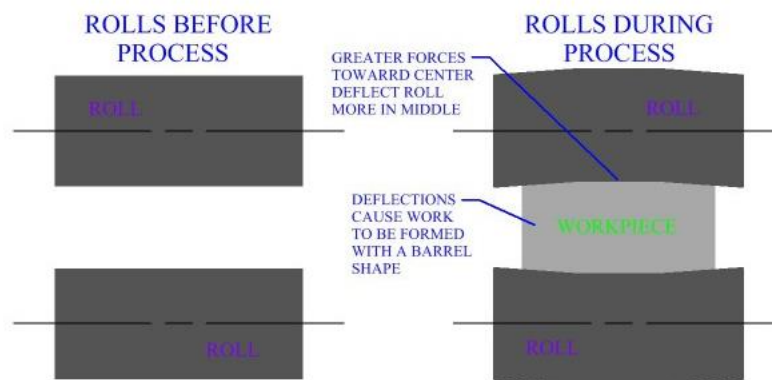
Η έλαση μετάλλων μπορεί να παράγει ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών προϊόντων. Το πλάτος της έλασης μπορεί να είναι μέχρι και αρκετά μέτρα, ή μικρότερο από ένα χιλιοστό της ίντσας. Η έλαση μετάλλων δημιουργεί επίσης τεμάχια σε ένα ευρύ φάσμα πάχους. Οι μεταλλικές πλάκες για ορισμένους λέβητες μπορούν να κυλιούνται σε πάχος 12 ιντσών, ενώ το φύλλο για το περιτύλιγμα τσιγάρων και καραμελών μπορεί να είναι .0003 ίντσες παχύ. Οι κύλινδροι που χρησιμοποιούνται για την έλαση μετάλλων είναι διαφόρων μεγεθών και γεωμετριών. Στις διεργασίες επίπεδης έλασης, κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής κατασκευής, οι κύλινδροι μπορεί τυπικά να έχουν διάμετρο 24 έως 54 ίντσες. Σε ορισμένες μεταλλικές εργασίες κύλισης, στο σχηματισμό πολύ λεπτών εργασιών, οι κύλινδροι(ράουλα) μπορεί να είναι τόσο μικροί όσο 1/4 ίντσας.

Τα ράουλα υπόκεινται σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας κατά τη διαδικασία έλασης μετάλλου. Οι συνθήκες περιλαμβάνουν, τεράστιες δυνάμεις, ροπές κάμψης, θερμικές καταπονήσεις και φθορά. Τα υλικά των ράουλων επιλέγονται για αντοχή, ακαμψία και αντοχή στη φθορά. Τα υλικά κυλίνδρων ποικίλουν ανάλογα με την ειδική διαδικασία έλασης μετάλλου. Τα συχνά υλικά των ράουλων είναι χυτοσίδηρος, χυτός χάλυβας και σφυρήλατος χάλυβας. Οι σφυρήλατοι κύλινδροι είναι πιο ισχυροί και πιο άκαμπτοι από τους κυλίνδρους χύτευσης, αλλά είναι πιο δύσκολο να κατασκευαστούν. Σε βιομηχανικές μεθόδους κατασκευής μετάλλων, οι κύλινδροι είναι συνήθως κατασκευασμένοι από κράματα χάλυβα νικελίου ή κράματος χάλυβα μολυβδαινίου.

1.8.13. Εκτροπή ράουλου

Η αντοχή και η ακαμψία είναι σημαντικά χαρακτηριστικά των κυλίνδρων (ράουλων) που χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό προϊόντων στην έλαση μετάλλων. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των κυλίνδρων θα επηρεάσουν την ακρίβεια των διαστάσεων καθώς και άλλους παράγοντες στη λειτουργία. Κατά τη διάρκεια της έλασης οι μεγάλες δυνάμεις επενεργούν επί των κυλίνδρων. Τα ρολά θα υπόκεινται σε διαφορετικούς βαθμούς εκτροπής. Σε κάθε συγκεκριμένη διαδικασία έλασης μετάλλων, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε πώς αυτές οι εκτροπές θα επηρεάσουν τους κυλίνδρους και, συνεπώς, τις εργασίες που γίνονται. Οι κύλινδροι ξεκινούν αρχικά επίπεδοι. Κατά τη διάρκεια μίας βασικής επίπεδης διαδικασίας κύλισης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι το υλικό εργασίας θα ασκήσει μεγαλύτερη δύναμη στους κυλίνδρους προς το κέντρο του υλικού από ό, τι στα άκρα του. Αυτό θα προκαλέσει την εκτροπή των κυλίνδρων στο κέντρο και, ως εκ τούτου, θα δώσει στο τεμάχιο μεγαλύτερο πάχος στη μέση.

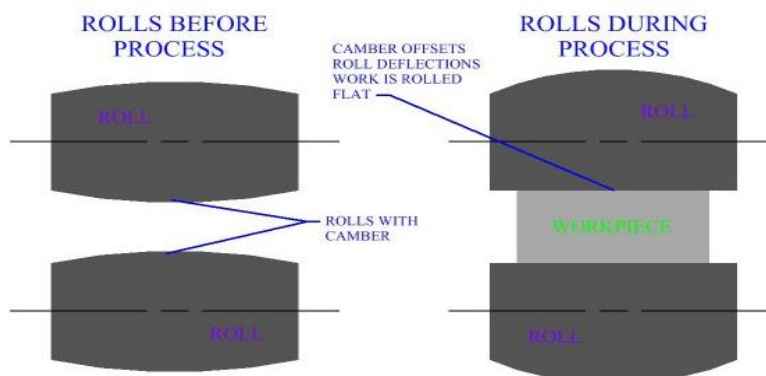
ROLL DEFLECTIONS IN FLAT ROLLING CAUSING A BARRELING EFFECT



Εικόνα 64 : Παραμόρφωση ράουλων στην έλαση

Για την επίλυση αυτού του προβλήματος στην βιομηχανική βιομηχανία έλασης μετάλλων, οι κύλινδροι συχνά κατασκευάζονται έτσι ώστε να είναι παχύτεροι προς το κέντρο με τέτοιο τρόπο ώστε να αντισταθμίζουν ακριβώς την εκτροπή που θα προκύψει κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Αυτό το επιπλέον πάχος ονομάζεται *camber*.

ROLLS WITH CAMBER PRECISELY ELIMINATE ROLL DEFLECTIONS



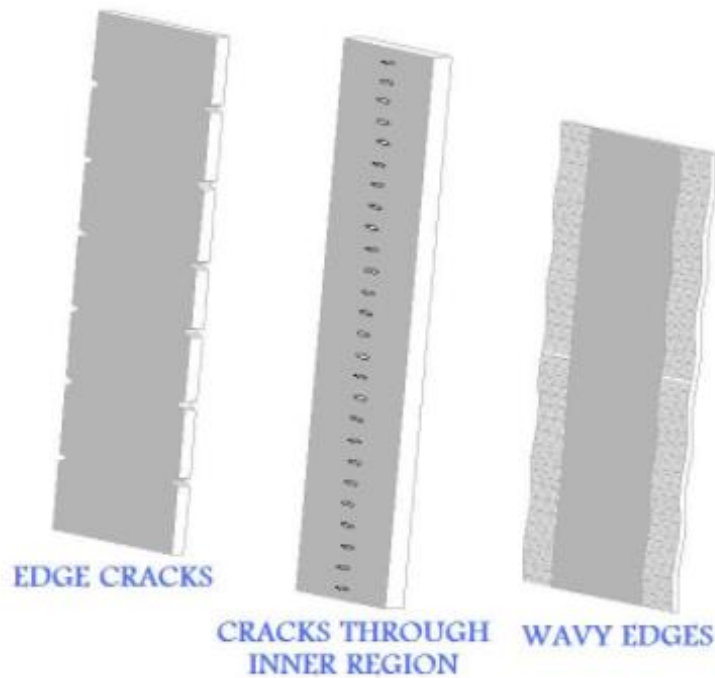
Εικόνα 65 : Ράουλα με αντιστάθμιση camber

Η καμπύλη που πρέπει να αποδωθεί σε ένα ράουλο είναι πολύ συγκεκριμένη για ένα συγκεκριμένο πλάτος τεμαχίου, υλικού και φορτίου. Ένα ράουλο πρέπει συνήθως να κατασκευάζεται μόνο για μία διαδικασία έλασης μετάλλου. Σε ορισμένες βιομηχανικές διεργασίες έλασης μετάλλων, στα ράουλαδίνεται προσωρινή καμπύλωση με την εφαρμογή δυνάμεων μέσω των εδράνων τους. Ένας άλλος τρόπος με τον οποίο οι κύλινδροι εκτρέπονται είναι η μείωση της ακτίνας τους κατά την επαφή του τεμαχίου. Με άλλα λόγια, θα ισοπεδωθούν σαν ένα λάστιχο πάνω σε ένα αυτοκίνητο. Αυτός ο τύπος εκτροπής είναι σημαντικός για να ληφθεί υπόψη στην πρακτική κατασκευής, καθώς θα επηρεάσει τους υπολογισμούς ακτίνας κυλίνδρου και την τριβή.

1.8.14. Ελαττώματα

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία ελαττωμάτων στην έλαση μετάλλων. Οι επιφανειακές ατέλειες εμφανίζονται συνήθως λόγω ακαθαρσιών στο υλικό, τη σκουριά ή τη βρωμιά. Επαρκής προετοιμασία της επιφάνειας πριν από τη λειτουργία έλασης μετάλλων μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή αυτών. Τα πιο σοβαρά εσωτερικά ελαττώματα οφείλονται σε ακατάλληλη διανομή υλικού στο τελικό προϊόν. Ελαττώματα, όπως οι ρωγμές άκρων, οι κεντρικές ρωγμές και οι κυματιστές άκρες, είναι όλα συνηθισμένα με αυτή τη μέθοδο κατασκευής μετάλλων.

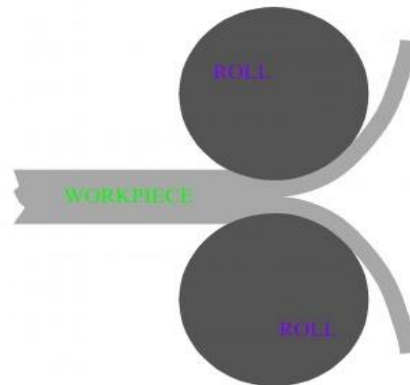
ROLLING DEFECTS



Εικόνα 66 : Ελαττώματα κατά την έλαση

Συχνά ένα φύλλο δεν είναι ελαττωματικό, δεν είναι απλά αρκετά επίπεδο. Στην βιομηχανική πρακτική των μεταλλικών φύλλων, ένα φύλλο μπορεί να διέλθει μέσω μιας σειράς κυλίνδρων ισοπέδωσης που λυγίζουν το φύλλο σε αντίθετες κατευθύνσεις για να το ισοπεδώσουν. Ένα άλλο ενδιαφέρον ελαττώμα που μπορεί να παρουσιαστεί στην επίπεδη τροχαλία είναι ο διαχωρισμός (alligatoring), όπου το τεμάχιο που υπόκειται σε έλαση χωρίζεται στα δύο κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Τα δύο μέρη του υλικού ταξιδεύουν σε αντίθετες κατευθύνσεις σε σχέση με τους αντίστοιχους κυλίνδρους τους.

ALLIGATORING



Εικόνα 67 : Διαχωρισμός του ελάσματος

Στην έλαση σχήματος, ένα τεμάχιο θα εμφανίζει συχνά διαφορετικές ποσότητες μείωσης σε διάφορες περιοχές της διατομής του. Ένας από τους στόχους του σχεδιασμού είναι ο σωστός σχεδιασμός μιας σειράς μειώσεων κατά τρόπο που να μετριάξει τις σχετικές διαφορές στη μεταβολή του σχήματος μεταξύ των περιοχών, προκειμένου να αποφεύγονται ελαττώματα. Οι ακατάλληλες μειώσεις του προϊόντος μπορεί να προκαλέσουν στρέβλωση ή ρωγμές του υλικού. Η πρακτική που εφαρμόζεται δεν είναι πάντα η αιτία στρέβλωσης ή ρωγμών, μερικές φορές ελαττώματα του μετάλλου μπορεί να είναι ο λόγος [4].

1.8.15. Μηχανική της έλασης

Αν εφαρμοσθεί η εξίσωση συνεχείας στη ροή του υλικού στην είσοδο, έξοδο και σε τυχούσα θέση

μέσα στην πλαστική ζώνη προκύπτει η σχέση :

$$b_o \cdot h_o \cdot u_o = b \cdot h \cdot u = b_f \cdot h_f \cdot u_f$$

όπου b το πλάτος της μπιγέτας, h το πάχος της, u η ταχύτητα, ενώ οι δείκτες o και f αναφέρονται στην είσοδο και την έξοδο, αντίστοιχα.

Επειδή ισχύει $h_o > h > h_f$, θα είναι προφανώς :

$$u_o < u < u_f$$

Συνεπώς αρχικά η γραμμική ταχύτητα στην περιφέρεια του ραούλου θα είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του τεμαχίου στην είσοδο του ανοίγματος για να μπορεί να εισαχθεί τούτο στην πλαστική ζώνη, στη συνέχεια υπάρχει βαθμιαία αύξηση της ταχύτητας μέσα στην πλαστική ζώνη μέχρις ότου αυτή εξισωθεί με την γραμμική ταχύτητα του ραούλου στη θέση ουδετέρου



επιπέδου (σημείο N) και στη συνέχεια μέχρι την έξοδο η ταχύτητα της μπιγέτας θα υπερβαίνει την γραμμική ταχύτητα του ραούλου. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μέσα στην πλαστική ζώνη θα υφίσταται ροή του υλικού προς την είσοδο (ροή αριστερά του ουδετέρου επιπέδου) και προς την έξοδο (ροή δεξιά του ουδετέρου επιπέδου), αντίστοιχα.

1.8.16. Μήκος τόξου επαφής

Η επιφάνεια επαφής TE/ραούλου εκτείνεται κατά μήκος του τόξου επαφής XY, το οποίο έχει προβεβλημένο μήκος L_p κατά τον άξονα του τεμαχίου (projected length of the arc of contact) ίσο με :

$$L_p = \left(R \cdot (h_o - h_f) - \frac{(h_o - h_f)^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \approx (R \cdot (h_o - h_f))^{\frac{1}{2}} = (R \cdot \Delta h)^{\frac{1}{2}}$$

1.8.17. Δυνάμεις

Οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο υλικό σε τυχόν σημείο μέσα στην πλαστική ζώνη είναι το ακτινικό φορτίο έλασης P (rolling load, separating load) και η τριβή F που αντιτίθεται στη ροή του υλικού. Προφανώς συνδέονται με τη σχέση :

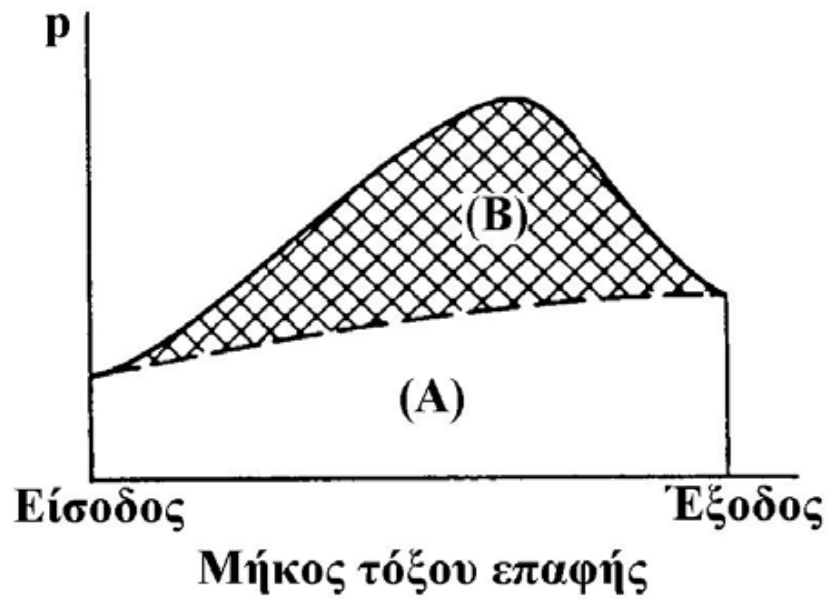
$$F = \mu P$$

Όπου μ ο συντελεστής τριβής στην διεπιφάνει εργαλείου και τεμαχίου.

1.8.18. Κατανομή της πίεσης ραούλων

Η κατανομή της πίεσης p των ραούλων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Αρχικά σημειώνεται αύξηση της πίεσης μέχρι μια μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί στη θέση του ουδετέρου επιπέδου και στη συνέχεια

μειώνεται εκ νέου. Διακρίνονται δύο χαρακτηριστικές περιοχές, η περιοχή A που αντιπροσωπεύει το πλαστικό έργο που απαιτείται για την ομογενή παραμόρφωση του τεμαχίου και η περιοχή B που αντιστοιχεί στο πρόσθετο έργο για την υπερνίκηση των τριβών. Η μορφή της καμπύλης κατανομής της πίεσης ραούλων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, δεδομένου ότι εξασφαλίζει τον προσδιορισμό του σημείου εφαρμογής της συνισταμένης δύναμης έλασης και διευκολύνει έτσι τον προσδιορισμό της απαιτούμενης ροπής στρέψης και της ισχύος κατεργασίας.



Εικόνα 68 : Κατανομή της πίεσης στην πλαστική ζώνη

1.8.19. Συνθήκη έναρξης της έλασης

Το τόξο επαφής αντιστοιχεί σε επίκεντρη γωνία α (angle of contact, angle of bite), μετρούμενη στο ράουλο. Για να επιτευχθεί η είσοδος της κατεργαζόμενης μπιγέτας μέσα στο άνοιγμα μεταξύ ραούλων θα πρέπει η συνολική οριζόντια συνιστώσα στην είσοδο να είναι θετική, δηλαδή θα ισχύει :

$$F \cos \alpha - P r \sin \alpha \geq 0 \Rightarrow \frac{F}{P r} > \tan \alpha$$



και δεδομένου ότι ο πρώτος όρος ισούται με τον μέσο συντελεστή τριβής μ , η οριακή συνθήκη έναρξης της έλασης γράφεται :

$$\mu = \tan \alpha$$

1.8.20. Μέγιστη μείωση πάχους ανά πάσο

Από την εικόνα 1 μπορούμε να γράψουμε :

$$\tan \alpha = \frac{L_p}{R - \frac{\Delta h}{2}}$$

Από την εξίσωση του μήκους τόξου επαφής γίνεται :

$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{R - \Delta h}}{R - \frac{\Delta h}{2}} = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$

Από την συνθήκη έναρξης της έλασης, λαμβάνοντας την ως ανισότητα, δηλαδή $\mu \geq \tan \alpha$ βρίσκουμε :

$$\Delta h_{\max} = \mu^2 R$$

1.8.21. Φορτίο Έλασης

Το φορτίο της έλασης ,πορεί να βρεθεί κάνοντας παραδοχές. Δυο διαφορετικές είναι οι παρακάτω :

1. Ομοιογενής παραμόρφωση

Το φορτίο P προκύπτει από τη μέση πίεση ραούλου πολλαπλασιασμένη με την προβεβλημένη επιφάνεια επαφής, δηλαδή

$$P = p \cdot b \cdot L_p = \sigma_0' \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h}$$

, όπου η τάση διαρροής σ_0' ισούται με το όριο διαρροής Y σε μονοαξονικό εφελκυσμό στην έλαση ορθογωνικής μπιγέτας και με $2Y/\sqrt{3}$ στην περίπτωση έλασης πλάκας (επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση



2. Ανομοιογενής παραμόρφωση

Θεωρώντας το πρόβλημα ως σφυρηλάτηση ορθογωνικής μπιγιέτας με μέσο πάχος $h_{\text{μέσο}} = (h_o + h_f)/2$, προκύπτει ο προσεγγιστικός τύπος :

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} \text{σομέσο} \left[\frac{1}{Q} (e^Q - 1) \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \right]$$

, όπου $\text{σομέσο} = (Y_o + Y_f)/2$ και $Q = \mu \cdot L_p / h_{\text{μέσο}}$

1.8.22. Ροπή στρέψης και ισχύς

- Η ροπή στρέψης T είναι $T = 2 \cdot P \cdot (\lambda \cdot L_p)$, όπου ο συντελεστής λ ισούνται με 0,5 για θερμή έλαση και 0,45 για ψυχρή.
- Το απαιτούμενο έργο της κατεργασίας W είναι $W = 2 (2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L_p) \cdot P$
- Η ισχύς της κατεργασίας είναι $\dot{W} = 4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L_p \cdot P \cdot N$, όπου N η συχνότητα περιστροφής των ράουλων [1].

1.8.23. Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] Δ. Μανωλάκος. (2015). Κατεργασίες I [Pdf διαφάνειες]. Λήφθηκε από <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26065/>
- [2] About Aluminium. (2018 Ιανουάριος 15)
Λήφθηκε από <http://www.elval.gr/default.asp?pid=177&la=1>
- [3] Κατασκευές αλουμινίου-σιδήρου επεξεργασία μετάλλου. (2017 Νοέμβριος 3)
<http://www.atem-oe.gr/>
- [4] Metal rolling. (2018 Ιούνιος 2). Λήφθηκε από http://thelibraryofmanufacturing.com/metal_rolling.html



2. Πειραματικό μέρος

2.1. Στοιχειομετρική ανάλυση του αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε

Τα αποτελέσματα της στοιχειομετρικής ανάλυσης του αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Ti (%)	Cr (%)
1	0,18501	0,47493	0,22643	1,08582	1,08432	0,03921	0,02347	0,01811
2	0,18006	0,44683	0,21734	1,04802	1,06101	0,03844	0,02296	0,01755
MO	0,18253	0,46088	0,22189	1,06692	1,07267	0,03883	0,02321	0,01793
	Ni (%)	Pb (%)	Sn (%)	Na (%)	Ca (%)	B (%)	Bi (%)	Zr (%)
1	0,00417	0,00000	0,00059	0,00000	0,00073	0,00043	0,00032	0,00115
2	0,00415	0,00000	0,00061	0,00000	0,00082	0,00038	0,00032	0,00112
MO	0,00416	0,00000	0,00060	0,00000	0,00077	0,00040	0,00032	0,00113
	V (%)	Be (%)	Co (%)	Cd (%)	Sb (%)	Ga (%)	P(%)	Li(%)
1	0,00762	0,00002	0,00027	0,00035	0,00000	0,01215	0,00077	0,00003
2	0,00753	0,00002	0,00025	0,00038	0,00000	0,01212	0,00092	0,00003
MO	0,00757	0,00002	0,00026	0,00037	0,00000	0,01214	0,00084	0,00003
	Ag (%)	As (%)	Hg (%)	In(%)	Se(%)	Hf (%)	Sc (%)	AL (%)
1	0,00059	0,00097	0,00039	0,00015	0,00072	0,06195	0,00008	96,7748
2	0,00057	0,00091	0,00051	0,00013	0,00099	0,05147	0,00008	96,8897
MO	0,00058	0,00094	0,00045	0,00014	0,00085	0,05671	0,00008	96,8322
	HeavyMet (%)	FeMn (%)	FeSi (%)	MgMn (%)	CrMn (%)	FedivSi (%)	T_400604 (%)	
1	0,00000	1,561	0,660	2,170	1,104	2,567	0,08429	
2	0,00000	1,495	0,627	2,109	1,066	2,482	0,07428	
MO	0,00000	1,528	0,643	2,140	1,085	2,524	0,07928	

Πίνακας 12 : Στοιχειομετρική ανάλυση χρησιμοποιούμενου αλουμινίου

Τα βασικά κραματικά στοιχεία θεωρούνται ότι είναι αυτά με περιεκτικότητα μεγαλύτερη του 1 %. Αυτά είναι [1, 3] :

1. Mg (μαγνήσιο) με περιεκτικότητα 1,07267 %
2. Mn (μαγγάνιο) με περιεκτικότητα 1,06692 %



2.2. Υπολογισμός αριθμού πάσων

Έχοντας της σχέση μέγιστης μείωσης πάχους ανά πάσο :

$$\Delta h_{\max} = \mu^2 R$$

Θέλουμε να υπολογίσουμε τον αριθμό πασών που θα χρειαστεί έλαση από πάχος h_0 σε h_f . Η ποσοστιαία μείωση πάχους σε σχέση με το αρχικό πάχος h_0 είναι :

$$x_i = \frac{\Delta h_i}{h_0}$$

, όπου Δh_i είναι η μείωση διατομής ανά πάσο και ισχύει :

$$\Delta h_i = (h_{0i} - h_{fi})$$

Πρέπει η ποσοστιαία μείωση πάχους να είναι μικρότερη της μέγιστης επιτρεπτής, δηλαδή :

$$x_i < x_{i\max} = \frac{\Delta h_{\max}}{h_0} = \frac{\mu^2 R}{h_0}$$

Αν η ποσοστιαία μείωση πάχους είναι ίση για όλα τα πάσα, τότε θα ισχύει :

$$x_i = x_{i+1} = x_{i+2} = \dots = x \Rightarrow h_0(1 - x)^n = h_f \Rightarrow x = 1 - \left(\frac{h_f}{h_0}\right)^{\frac{1}{n}}$$

, όπου n ο αριθμός των πασών. Προφανώς πρέπει $x < x_{\max}$

Η ακτίνα των ραουλων μετρήθηκε $R=98,68$ mm και ο συντελεστής τριβής λαμβάνεται αρχικά $\mu=0,15$. Το πάχος των δοκιμίων μετρήθηκε στα 5 και 6 mm. Εξετάζουμε τις περιπτώσεις μείωσης του πάχους από τα 6 στα 3 mm και από τα 5 στα 3 ή 2,5 mm. Για τις τιμές αυτές έχουμε :

	6->3 mm	5->3 mm	5->2,5 mm
x_{\max}	0,370	0,444	0,444

Πίνακας 13 : Μέγιστη επιτρεπτή μείωση ανά πάσο



Οπότε δοκιμάζουμε για διαφορετικό αριθμό πασών στην τελευταία εξίσωση :

Για 6->3 mm	x
1	0,5
2	0,2929
3	0,2063
4	0,1591
5	0,1294
6	0,1091

Πίνακας 14 : Μείωση ανά πάσο

Για 5->3 mm	x
1	0,4
2	0,2254
3	0,1566
4	0,1199
5	0,0971
6	0,0816

Πίνακας 15 : Μείωση ανά πάσο

Για 5->2,5 mm	x
1	0,5
2	0,2929
3	0,2063
4	0,1591
5	0,1294
6	0,1091

Πίνακας 16 : Μείωση ανά πάσο

Συγκρίνοντας τους πίνακες 14, 15 και 16 με τον πίνακα 13 βλέπουμε ότι θα χρειαστούν παραπάνω από 2 πάσα για να μπορεί να εισέλθει ασφαλώς το δοκίμιο στην έλαση. Εάν επιλεγθεί μέσος συντελεστής τριβής, από την βιβλιογραφία για επαφή αλουμινίου-χάλυβα, ίσος με :

$$\mu = \frac{0,61 + 0,47}{2} = 0,54$$

Τότε ο πίνακας 13 μετασχηματίζεται σε :



	6->3 mm	5->3 mm	5->2,5 mm
x_{max}	0,4796	0,5755	0,5755

Πίνακας 17 Μέγιστη επιτρεπτή μείωση ανά πάσο

Έτσι όλοι οι αριθμοί πασών είναι επιτρεπτοί. Οπότε κριτήριο επιλογής πασών θα είναι η μηχανική αντοχή των επιμέρους κομματιών της μηχανής έλασης. Επιλέχθηκε τελικά η σταθερή μείωση του πάχους 0,2 mm ανά πάσο. Οπότε είναι :

Για 4->2 mm	x
1	0,5
5	0,293
10	0,067

Πίνακας 18 : Μείωση ανά πάσο

Δηλαδή για αρχικό πάχος δοκιμίου 4mm και τελικό 2mm, τα 10 πάσα ή ισοδύναμα το $\Delta h=0,2$ mm ανά πάσο είναι ασφαλής τιμή. Το ελάχιστο x_{max} (για $\mu=0,15$) είναι 0,555 για αρχικό πάχος 4mm, οπότε η κατεργασία είναι ασφαλής για οποιαδήποτε τιμή του συντελεστή τριβής [4-5].

2.3. Έλαση καθαρού αλουμινίου έως σταθερό τελικό πάχος

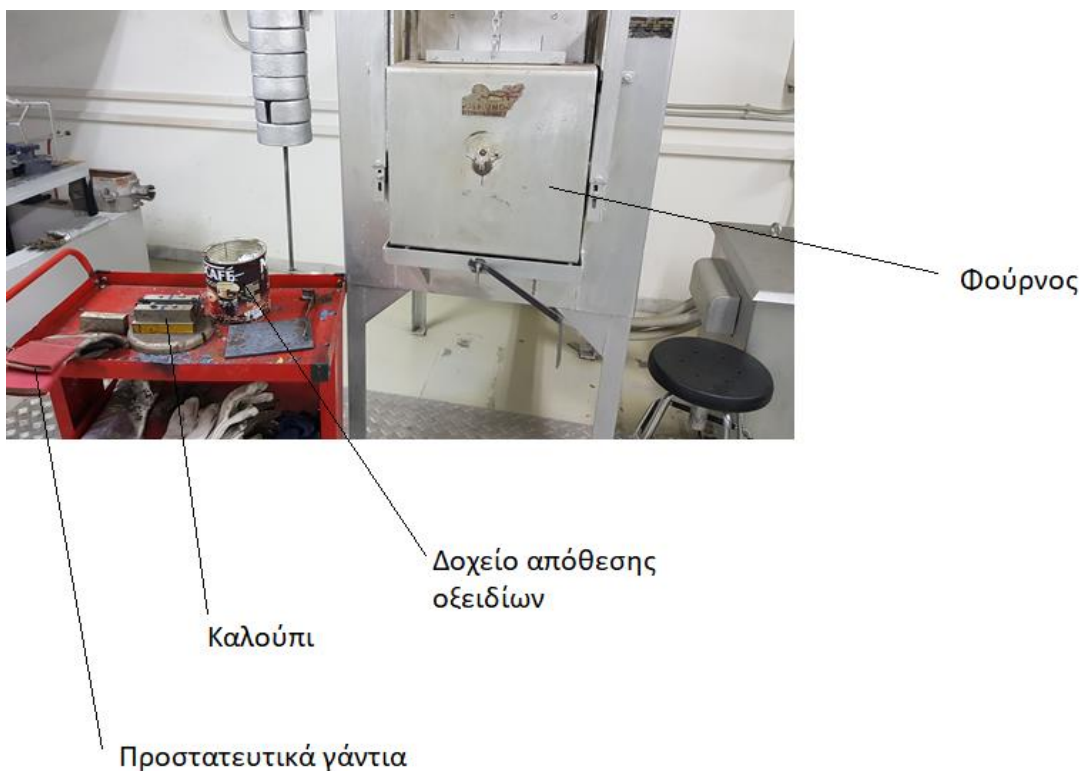
2.3.1. Χύτευση

Αρχικά έγιναν χυτεύσεις στον φούρνο με χαρακτηριστικά :

Τύπος-Όνομα	FABRIKS A-B OSMUND UPPSALA SWEDEN
Τάση	4,6 V
Ισχύς	9,5 KW
Ρεύμα	120 A
Μέγιστη θερμοκρασία	1200°C

Πίνακας 19 : Χαρακτηριστικά φούρνου

Η πειραματική διάταξη φαίνεται στην παρακάτω εικόνα :



Εικόνα 69 : Πειραματική διάταξη

Το εσωτερικό του φούρνου φτάνει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Η διαδικασία της χύτευσης γίνεται πολύ προσεκτικά για την αποφυγή ατυχημάτων τόσο λόγω της του φούρνου αλλά και λόγω του τήγματος αλουμινίου.



Εικόνα 70 : Το εσωτερικό του φούρνου

Πριν από κάθε χύτευση γίνεται αφαίρεση του επιφανειακού στρώματος οξειδίων του αλουμινίου, με τρόπο που φαίνεται στις παρακάτω 2 εικόνες :



Εικόνα 71 : Αφαίρεση οξειδίων

Η θερμοκρασία του φούρνου κρατήθηκε στους 748 °C. Μετά από την χύτευση κάθε δοκιμίου ο φούρνος χρειάζεται μικρό χρονικό διάστημα ώστε να φέρει την θερμοκρασία ξανά σε αυτή την τιμή.



Εικόνα 72 : Η θερμοκρασία του φούρνου

Ακριβώς μετά την χύτευση, το καλούπι έχει την δυνατότητα να κλείσει από την πάνω πλευρά, με σκοπό να υπάρχει ομοιόμορφη αγωγή θερμότητας σε όλες τις πλευρές του δοκιμίου.



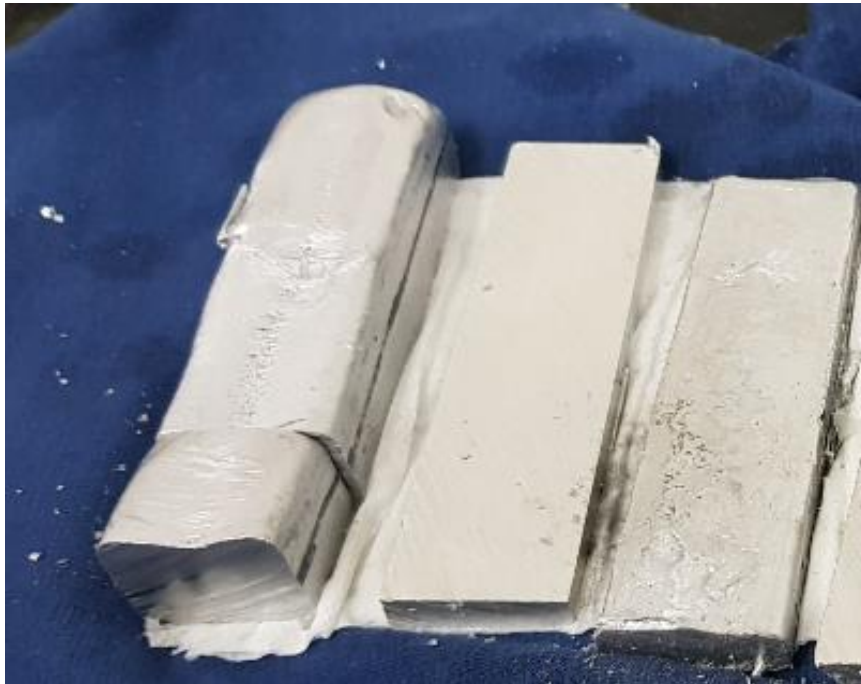
Εικόνα 73 : Το μεταλλικό καλούπι

Μετά την χύτευση γίνεται αποσυναρμολόγηση του καλουπιού και λήψη του τεμαχίου.



Εικόνα 75 : Αφαίρεση του χυτευμένου τεμαχίου

Τα τελικά τεμάχια έχουν την μορφή της παρακάτω εικόνας :



Εικόνα 76 : Τεμάχια που λαμβάνονται

Αριστερά είναι τα τεμάχια αμέσως μετά την χύτευση, ενώ δεξιά το κομμάτι που λαμβάνεται για την έλαση. Στο χυτευμένο τεμάχιο υπάρχει μία μαύρη γραμμή, εκεί που αργότερα γίνεται κοπή για την λήψη του επιθυμητού.

2.3.2. Κοπή των χυτών τεμαχίων

Στη συνέχεια γίνεται κοπή των δοκιμίων. Τα δοκίμια σημαδεύτηκαν, ώστε να κοπούν σε πάχος 6 mm. Λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων συγκράτησης του τροχού κοπής, το τελικό πάχος των δοκιμίων ήταν μικρότερο της παραπάνω τιμής, καθώς και διέφερε ανά δοκίμιο.



Εικόνα 77 : Κοπή τεμαχίων στον τροχό

Τα χαρακτηριστικά του κοπτικού τροχού είναι :

Τύπος-Όνομα	MEP PERGOLA (MADE IN ITALY)
Τάση	220 V
Ισχύς	0,8 KW
Ρεύμα	6,6 A
Στροφές	1100 rpm

Πίνακας 20 : Χαρακτηριστικά κοπτικού τροχού

2.3.3. Προετοιμασία τεμαχίων για έλαση

Η ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας δεν είναι καλή, οπότε με σκοπό να μην οδηγήσει σε εσφαλμένες τιμές φορτίων κατά την έλαση, τα δοκίμια λειαίνονται στη συνέχεια.



Εικόνα 78 : Γραμμές του κοπτικού τροχού

Τα λειαντικά χαρτιά που χρησιμοποιούνται φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 79 : Λειαντικά χαρτιά

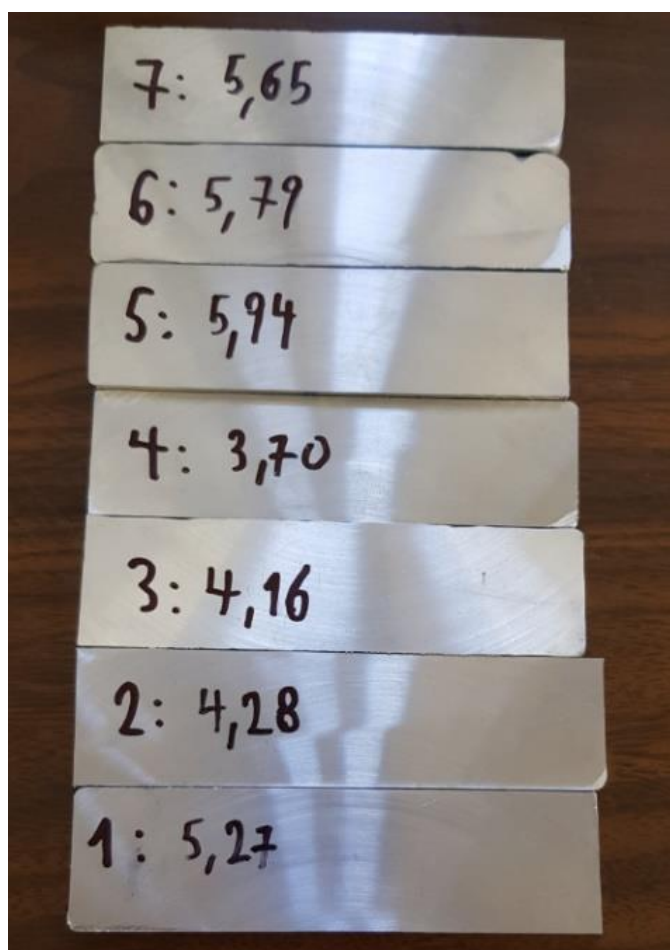
Υπάρχει επιλογή πολλών μεγεθών όπως 120, 380, 500, 800, 1200, 200 και 4000. Τα τεμάχια επεξεργάστηκαν με τα τρία πρώτα μεγέθη.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η επιφάνεια μετά από μικρό χρονικό διάστημα λείανσης με το μέγεθος 500.



Εικόνα 80 : Λείανση με χαρτί 500

Υπάρχουν εμφανείς χαραγές στην επιφάνεια, οπότε λειαίνονται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, έως ότου να παραχθεί η επιφάνεια της παρακάτω εικόνας



Εικόνα 81 : τελική μορφή τεμαχίων

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, το χαρτί μεγέθους 500 αφαιρεί όλες τις επιφανειακές ατέλειες. Η επιφάνεια που έχουν τα δοκίμια είναι καλύτερης ποιότητας από την επιφάνεια του ράουλου.

2.3.4. Έλαση

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η μέτρηση της διάστασης του ράουλου και η έλαση ενός δοκιμίου.



Εικόνα 82 : Μέτρηση ράουλου

Τα δοκίμια έχουν αρχική διάσταση έως και 6mm, οπότε γίνονται έως και 20 πάσα ανά δοκίμιο, μέχρι η τελική διάσταση όλων των δοκιμίων να είναι 2mm.

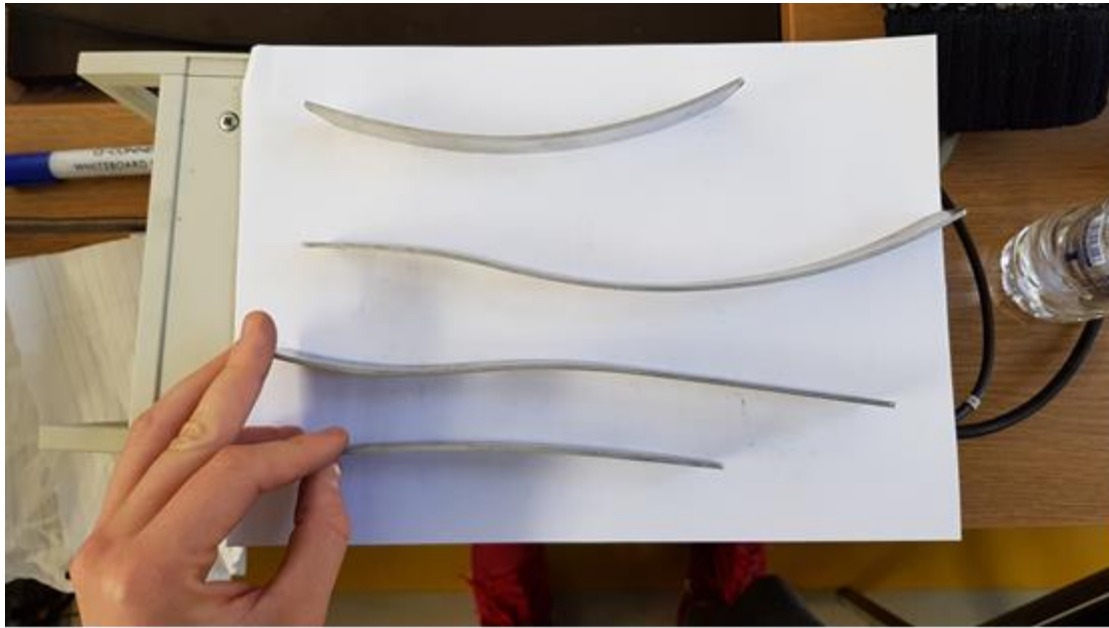


Εικόνα 83 : Εισαγωγή του δοκιμίου στο έλαστρο

Στις παρακάτω 2 εικόνες φαίνεται η μορφή των δοκιμίων μετά την έλαση :



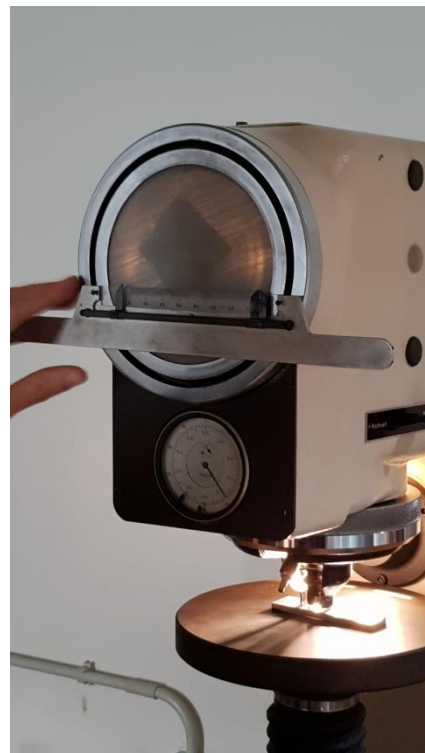
Εικόνα 84 : Τα δοκίμια μετά την έλαση



Εικόνα 85 : Τα δοκίμια μετά την έλαση (πλάι)

2.3.5. Σκληρομέτρηση

Τα δοκίμια σκληρομετρήθηκαν στη συνέχεια, με την μέθοδο Vickers.



Εικόνα 86 : Η μηχανή μέτρησης σκληρότητας



Τα χαρακτηριστικά της μηχανής σκληρομέτρησης είναι :

Τύπος-Όνομα	Dia Testor 2Rc (Made in Western Germany)
Τάση	220 V
Χρονολογία κατασκευής	1986
Ρεύμα	0,5 A
Μέγιστη θερμοκρασία	1200°C

Πίνακας 21 : Χαρακτηριστικά μηχανής σκληρομέτρησης

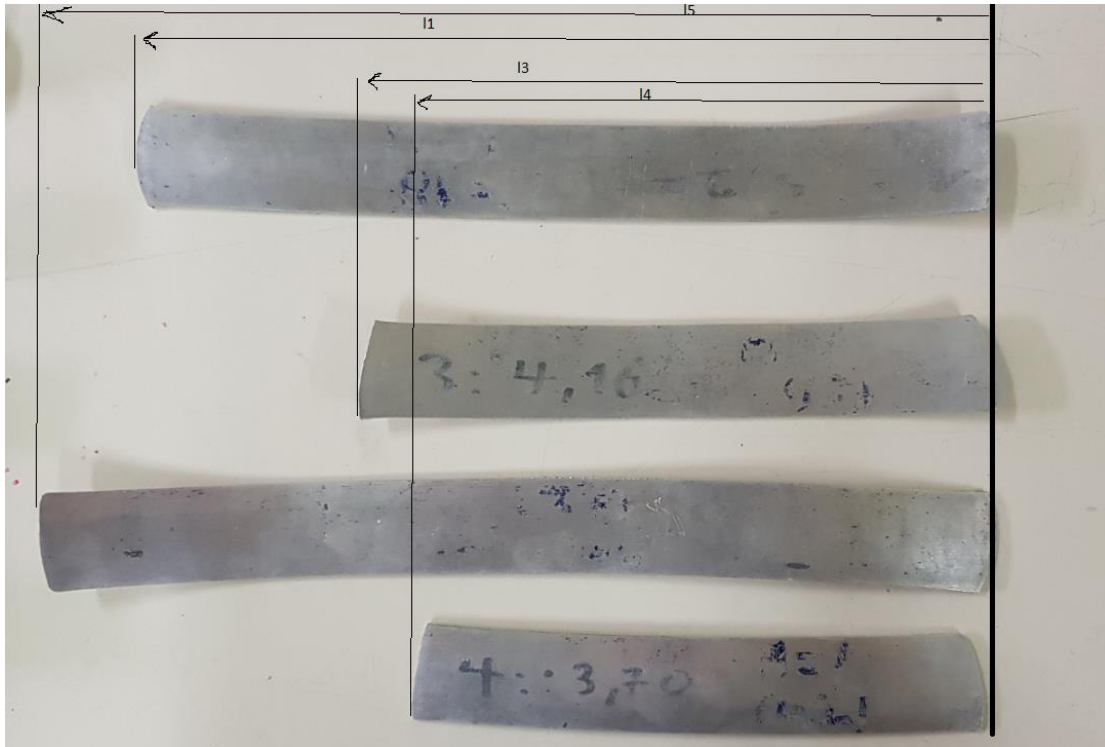
Το βάρος που χρησιμοποιήθηκε είναι 5 kr, οπότε η σκληρότητα Vickers υπολογίζεται από την μέτρηση των δυο διαγώνιων με το ακόλουθο τύπο :

$$HV = 2 * F * \frac{\sin\left(\frac{136}{2}\right)}{(d_1^2 + d_2^2)} = 7,4176 * \frac{10^7}{d_1^2 + d_2^2}, \text{ όπου } d_1 \text{ και } d_2 \text{ σε } \mu\text{m}.$$

Τα δοκίμια τοποθετούνται στην βάση, γίνεται εστίαση και στην συνέχεια γίνεται η κάθοδος της ακίδας. Αφού περάσουν 15 sec μετά την επαφή της ακίδας με την επιφάνεια του δοκιμίου, αυτή αφαιρείται και μετρώνται οι δύο διαγώνιοι του αποτυπώματος. Στην συνέχεια υπολογίζεται η τιμή της σκληρότητας Vickers. Στα τεμάχια με καμπυλότητα χρησιμοποιείται στήριξη για την μέτρηση της σκληρότητας.

2.3.6. Αποτελέσματα :

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα μήκη των δοκιμίων μετά την έλαση :



Εικόνα 87 : Μήκη δοκιμίων μετά την έλαση

2.4. Έλαση σε διαφορετικό αριθμό πασών για καθαρό αλουμίνιο

2.4.1. Χύτευση

Όπως και στην προηγούμενη σειρά πειραμάτων, γίνεται αρχικά χύτευση δοκιμίων.



Εικόνα 88 : Διάταξη φούρνου στην χύτευση

Η θερμοκρασία του καλουπιού κρατήθηκε σταθερή στους 100 °C. Αυτό έγινε με τη βοήθεια θερμομέτρου laser/υπερύθρων, όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 89 : Μέτρηση θερμοκρασίας

Έτσι παράχθηκαν 16 χυτά δοκίμια.



Εικόνα 90 : τεμάχια μετά την χύτευση

2.4.2. Κοπή Χυτευμένων τεμαχίων

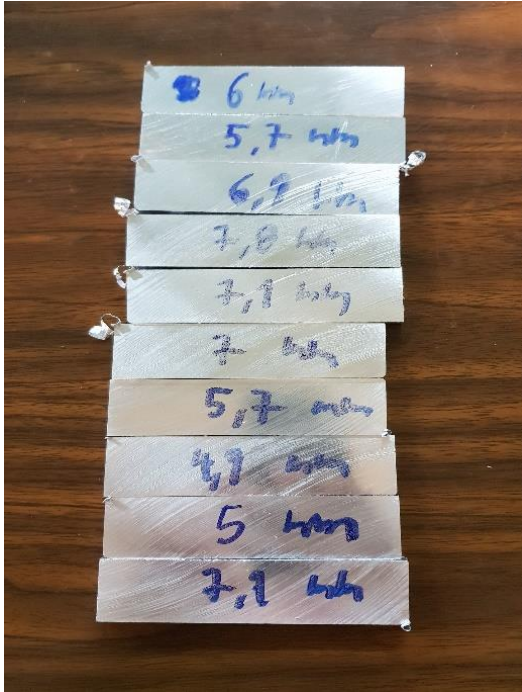
Από αυτά, τα 9 με το μεγαλύτερο πάχος κοπήκαν στον τροχό και στην συνέχεια, μέσω φρεζαρίσματος και λείανσης οδηγήθηκαν σε τελικό πάχος 4mm με απόκλιση όσο το δυνατόν πιο μικρή.



Εικόνα 91 : Κοπή τεμαχίων στον τροχό

Παραπάνω φαίνεται η διαδικασία της κοπής με τον τροχό.

Στις παρακάτω 2 εικόνες φαίνονται τα πάχη πριν το φρεζάρισμα και η κοπτική ακμή της φρέζας :



Εικόνα 92 : κοπή τεμαχίων στην φρέζα

2.4.3. Προετοιμασία τεμαχίων για έλαση

Στις παρακάτω 2 εικόνες φαίνεται η ποιότητα της επιφάνειας πριν και μετά την λείανση.



Εικόνα 93 : Ποιότητα επιφάνειας που επιτυγχάνεται με την λείανση (δεξιά). Ποιότητα επιφάνειας πριν (αριστερά)

2.4.4. Έλαση

Στην συνέχεια τα δοκίμια υπόκεινται σε έλαση. Ο αριθμός των πάσων διαφέρει. Απο το δοκίμιο 1 έως 9 ο αριθμός είναι 9 έως 1, δηλαδή το δοκίμιο 1 περνά από 9 πάσα, το δοκίμιο 2 από 8 κ.ο.κ. Η μορφή των δοκιμίων μετά την έλαση φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 94 : Μορφή δοκιμίων μετά την έλαση

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα μήκη των δοκιμίων μετά την έλαση :



Εικόνα 95 : Μήκη δοκιμίων μετά την έλαση

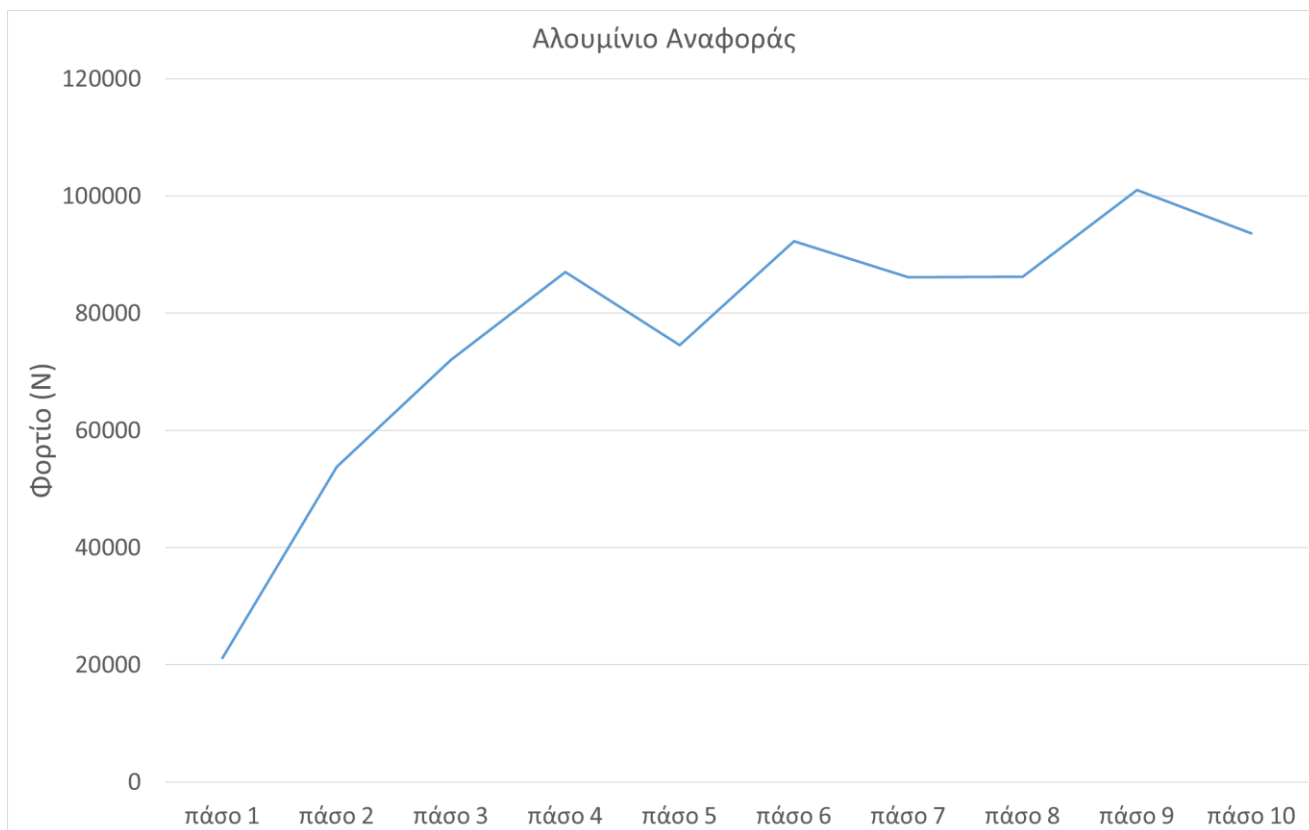
Η σειρά ελάσεων αυτή έγινε με περίτεχνο τρόπο, ώστε να αποφευχθεί η χρονοβόρα διαδικασία ρύθμισης της εργαλειομηχανής. Αρχικά περνάνε όλα τα δοκίμια από το πρώτο πάσο, στη συνέχεια ρυθμίζεται το βύθισμα του ράουλου κατά 0,2 mm, ενώ το δοκίμιο 9 αφήνεται στην άκρη. Το ίδιο γίνεται και για τα υπόλοιπα πάσα, αφήνοντας στην άκρη το δοκίμιο 8, μετά το 7 κ.ο.κ.

2.4.5. Αποτελέσματα

Από το έλαστρο καταγράφονται το φορτίο κατά τον άξονα Y και η ροπή στα ράουλα. Ρυθμίζεται ο αριθμός των δειγμάτων που λαμβάνεται, καθώς και το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας. Η σειρά εισχώρησης των δοκιμίων στην εργαλειομηχανή είναι πρώτο το 1, μετά το 2 κ.ο.κ.. Τα δεδομένα συλλέγονται και μετά επεξεργάζονται.



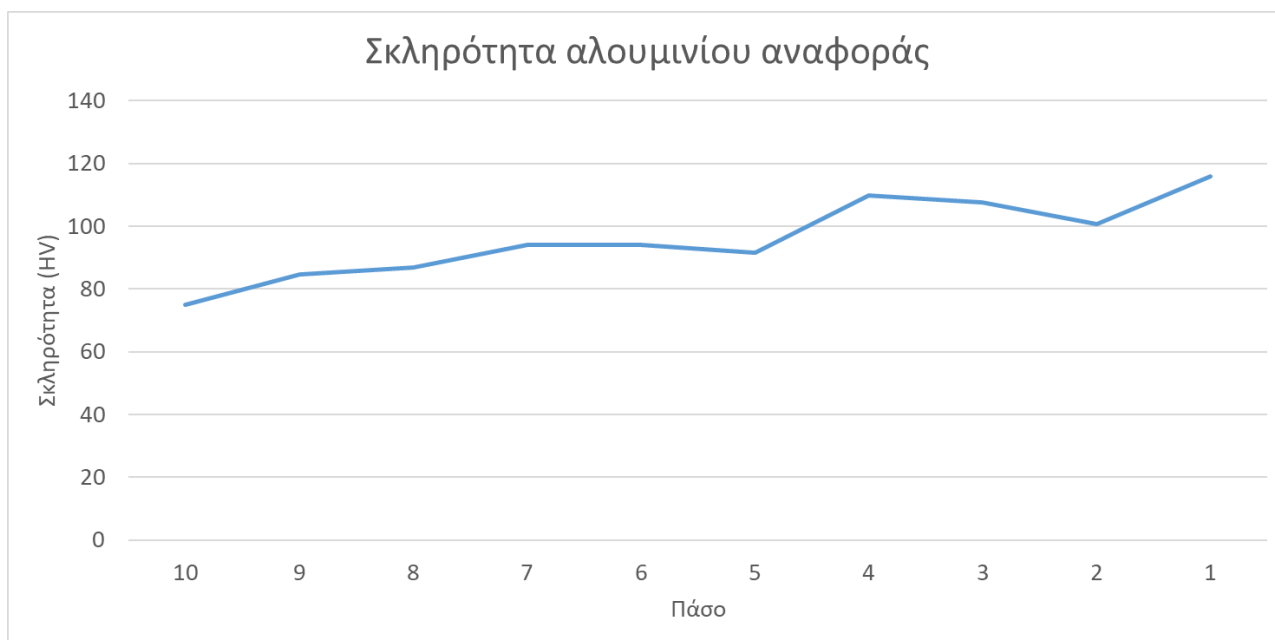
Ύστερα από την συλλογή των δεδομένων για όλα τα δοκίμια και πάσα, υπολογίζεται ο μέσος όρος του φορτίου ανά πάσο. Ο μέσος όρος προκύπτει από όλα τα δοκίμια. Αυτός παρίσταται στο παρακάτω διάγραμμα :



Διάγραμμα 1 : Φορτίο αλουμινίου αναφοράς



Τα αποτελέσματα της σκληρομέτρησης του αλουμινίου παρίστανται στο παρακάτω διάγραμμα :



Διάγραμμα 2 : Σκληρότητα αλουμινίου αναφοράς



2.5. Έλαση σε διαφορετικό αριθμό πασών για τα δοκίμια 0,1%, 0,2% και 0,3% σε GNPs

2.5.1. Πειραματική διαδικασία

Η επιθυμία για σωστή εισαγωγή των νανοδομών στο τήγμα του αλουμινίου επέβαλλε αυστηρή πειραματική διαδικασία. Τα βήματα της διαδικασίας είναι τα εξής :

- Αρχικά γίνονται χυτεύσεις στον φούρνο. Το αλουμίνιο που θα χρησιμοποιηθεί ζυγίζεται, ώστε να υπολογιστεί πόσο γραφένιο θα χρησιμοποιηθεί. Το γραφένιο ζυγίζεται στην συνέχεια.
- Χρησιμοποιούνται γάντια και μάσκες, ώστε να αποτρεπτεί μόλυνση από επαφή με τα γραφένια. Το αλουμίνιο θερμαίνεται στον φούρνο έως την τήξη του (730-750 °C για 55 min).
- Στην συνέχεια γίνεται εισαγωγή του γραφενίου μέσα στο τήγμα.
- Πριν την εισαγωγή του γραφενίου γίνεται αφαίρεση του επιφανειακού στρώματος οξειδίων που σχηματίζεται στο τηγμένο αλουμίνιο.
- Μετά την εισαγωγή γίνεται καλή ανάδευση. Το τήγμα ξανατοποθετείται στον φούρνο για 10 με 15 λεπτά.
- Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται 5 φορές συνολικά.
- Μετά το τέλος της διαδικασίας γίνεται η χύτευση των δοκιμών.
- Το καλούπι και το καπάκι διατηρούνται σε θερμοκρασία 100°C.
- Μετά την χύτευση τοποθετείται το καπάκι του καλουπιού στο πάνω μέρος, ώστε να υπάρχει ομοιόμορφος ρυθμός απόψυξης, και το τεμάχιο αφήνεται για 2-5 min μέχρι να απομακρυνθεί.
- Τα χυτευμένα τεμάχια παραμένουν για 24 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου.
- Μετά το πέρας του χρόνου αυτού γίνεται κοπή τους έως τελικό πάχος λίγο μεγαλύτερου των 4 mm και αποπεράτωση σε λείανση.
- Τα τεμάχια είναι έτοιμα για έλαση.
- Η έλαση πραγματοποιείται εισάγοντας όλα τα τεμάχια για κάθε πάσο και στην συνέχεια αφαιρώντας 1. Έτσι το δοκίμιο 1 έχει ελαστεί από 10 πάσα, το 2 από 9 και το 10 από 1 πάσο. Τα φορτίο και η ροπή που αναπτύσσεται μετρώνται. Επίσης μετρώνται οι διαστάσεις των τεμαχίων μετά από κάθε πάσο. Το κάθε πάσο είναι 0,2 mm.
- Τέλος γίνεται σκληρομέτρηση των δοκιμών [2].

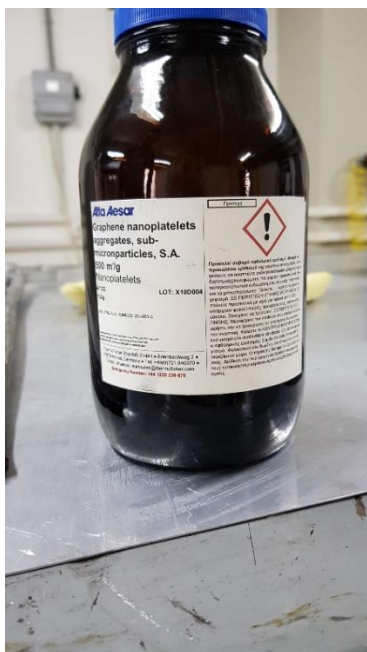
2.5.2. Μέτρα ασφαλείας και οι νανοδομές

Τα μέτρα ασφαλείας που λαμβάνονται είναι επίσης αυστηρά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διάσταση των νανοδομών τα κάνει δύσκολα να φιλτραριστούν από το ανθρώπινο σώμα. Παρά το γεγονός ότι δεν έχουν πραγματοποιηθεί πολλές ιατρικές έρευνες, υπάρχει υποψία ότι οι νανοδομές μπορούν να αιωρηθούν με κίνδυνο κανείς να τις εισπνεύσει. Είναι άγνωστες ακόμα οι επιπλοκές στην υγεία του ανθρώπινου οργανισμού.



Εικόνα 96 : Μέτρα ασφαλείας κατά την χύτευση

Στις παρακάτω δύο εικόνες φαίνονται οι νανοδομές στην μορφή που παρέχονται, καθώς και μετά το ζύγισμά τους. Το γραφένιο, Alfa Aesar Graphene nanoplatelets aggregates submicronparticles, S.A. 500 m²/g



Εικόνα 97 : Οι νανοδομές

2.5.3. Προετοιμασία για χύτευση

Παρακάτω φαίνεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε.



Εικόνα 98 : Ζύγισμα των κυαθίων

Στην συνέχεια ζυγίζονται μαζί με το αλουμίνιο, ώστε να ευρεθεί το βάρος του αλουμινίου και να υπολογιστεί η απαιτούμενη ποσότητα γραφενίου.



Εικόνα 99 : Ζύγισμα του γραφενίου



Εικόνα 100 : Σε κάθε κυάθιο αντιστοιχεί συγκεκριμένη ποσότητα γραφενίου

2.5.4. Χύτευση

Ακολουθούνται τα βήματα που περιγράφηκαν παραπάνω. Το τήγμα είναι έτοιμο για χύτευση μετά την σειρά των αναδεύσεων και επαναθερμάνσεων που περιγράφηκαν παραπάνω.



Εικόνα 101 : Χύτευση του τήγματος αλουμινίου-γραφενίου

Τα παραγόμενα τεμάχια έχουν ίδια μοφή με των προηγούμενων, οπότε η προετοιμασία τους για την έλαση ακολουθεί την ίδια διαδικασία.



Εικόνα 102 : Τα χυτευμένα 0,1% σε γραφένιο

2.5.5. Κοπή χυτευμένων τεμαχίων

Η κοπή των δοκιμίων έγινε με 3 εναλλακτικούς τρόπους :

1. Στον τροχό
2. Στην πριονοκορδέλα
3. Στην φρέζα

Μετα την κοπή πρέπει να γίνει λείανση, ώστε τα δοκίμια να έχουν πάχος 4 mm, με πολύ μικρή απόκλιση ($\pm 0,1$ mm εύρος για 4 mm). Για τα δοκίμια 0,2% έχουμε για παράδειγμα μετά την λείανση τις τελικές διαστάσεις :

Δοκίμιο	Πάχος (mm)
1	4,063333
2	4,09
3	4,0833
4	4,09
5	4,0567
6	4,0367
7	4,0633
8	4,0833
9	4,02
10	4,0033

Πίνακας 22 : Πάχος δοκιμίων

Οπότε από την μέση τιμή τους (4,058993 mm) τα δοκίμια είχαν απόκλιση μικρότερη του $\pm 0,05$ (+0,031007 , -0,055693)



Εικόνα 103 : Η πριονοκορδέλα και ο τρόπος συγκράτησης ορισμένων δοκιμίων με μικρό πάχος

Χαρακτηριστικά πριονοκορδέλλας :

Κτασκευαστής	Rich Young
Όνομα	CY350
Ισχύς Κινητήρα	1,9 Kw
Τάση κινητήρα	400 V
Μέγιστο μέγεθος συγκράτησης	350x240 mm

Πίνακας 23 : Χαρακτηριστικά πριονοκορδέλλας

2.5.6. Προετοιμασία των τεμαχίων για έλαση

Ο τρόπος λείανσης είναι ίδιος με προηγουμένως, όπως και το μέγεθος του χαρτιού που χρησιμοποιείται. Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος που εξελίσσεται η επιφάνεια ενός τεμαχίου κατά την λείανση.



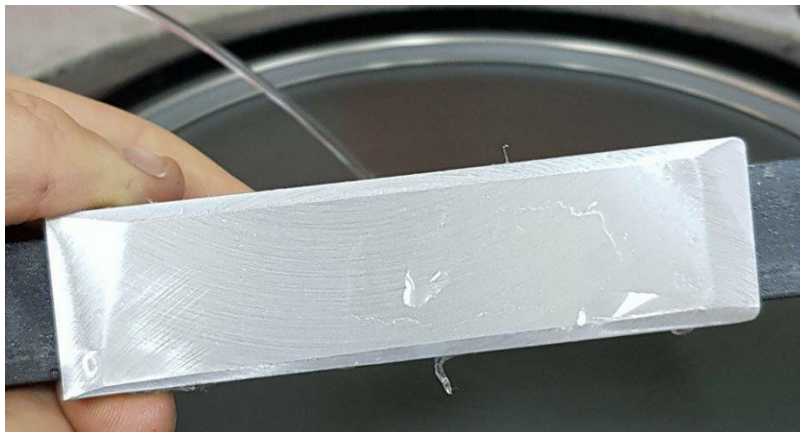
Εικόνα 104 :Η σταδιακή βελτίωση της επιφάνειας κατά την λείανση

Η αφαίρεση πάχους έως και 2 χιλιοστών απαιτεί πολύ χρόνο, οπότε τα δοκίμια συγκρατήθηκαν με τον παρακάτω τρόπο :



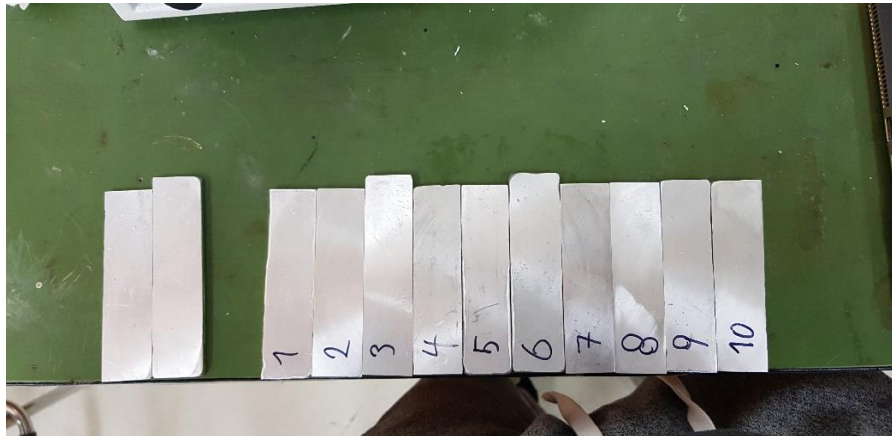
Εικόνα 105 : Αφαίρεση μεγάλου πάχους με λείανση

Για τον έλεγχο του πάχους μπορούν να λειανθούν οι 4 πλευρές του δοκιμίου, έως το επιθυμητό πάχος, και στην συνέχεια αφαιρείται υλικό από το κέντρο.

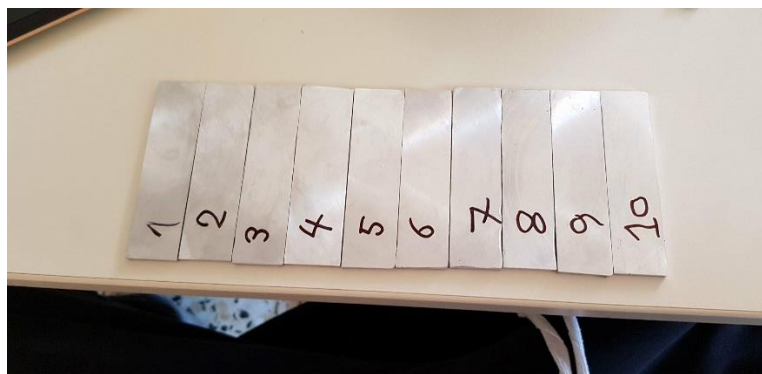


Εικόνα 106 : Έλεγχος πάχους κατά την λείανση

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι τελικές μορφές των δοκιμίων πριν την έλαση



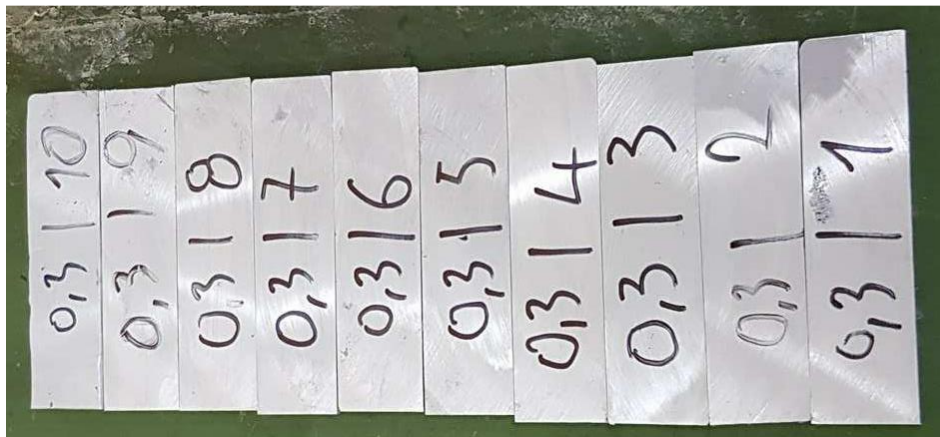
Εικόνα 107 : Η τελική μορφή των δοκιμίων πριν την έλαση (0,1%)



Εικόνα 108 : Η τελική μορφή των δοκιμίων πριν την έλαση (0,2%)

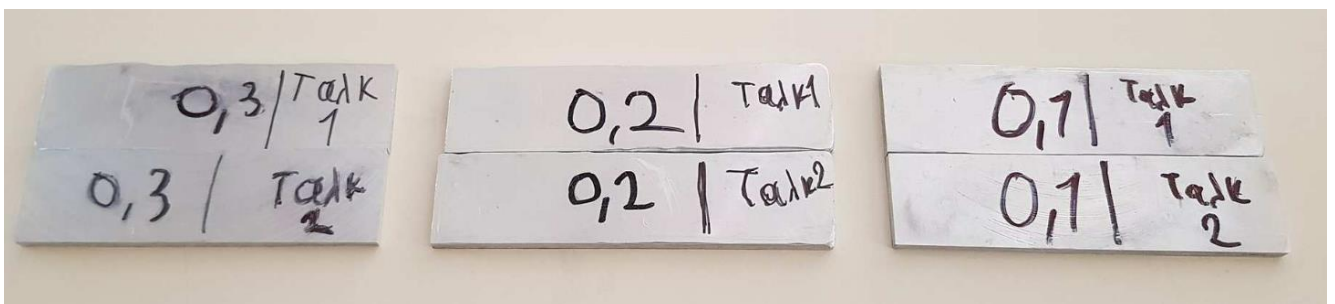
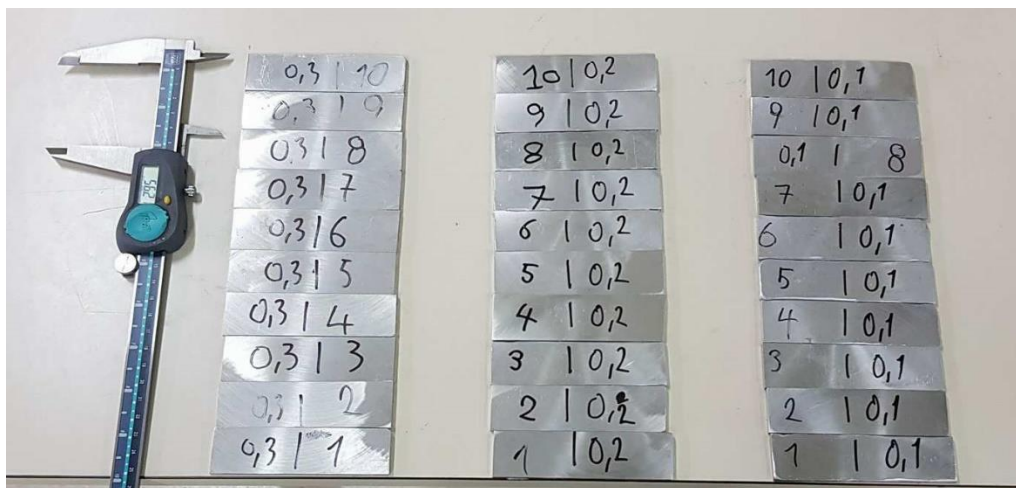


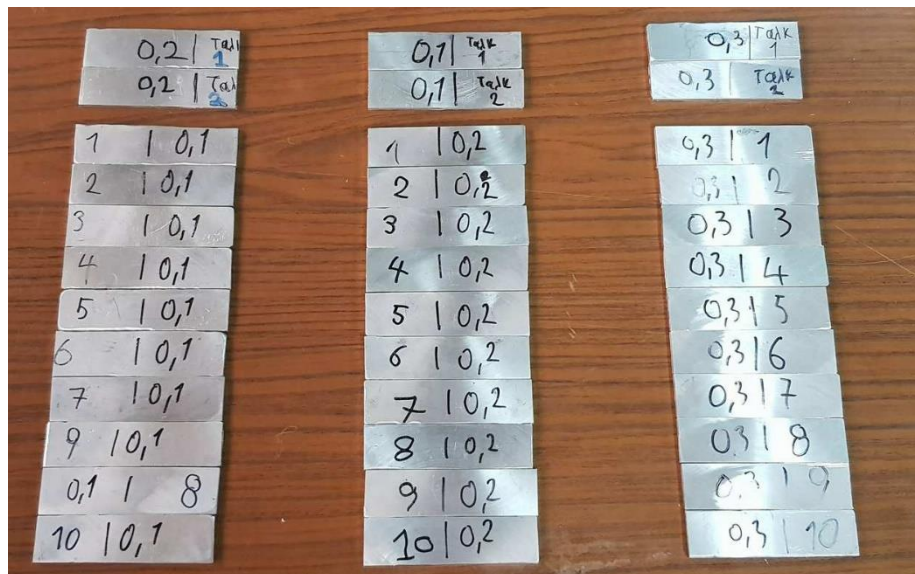
Εικόνα 109 : Η ομοιομορφία του πάχους των δοκιμίων



Εικόνα 110 : Η τελική μορφή των δοκιμίων πριν την έλαση (0,3%)

Παρακάτω φαίνονται τα δοκίμια από όλα τα ποσοστά γραφενίου :





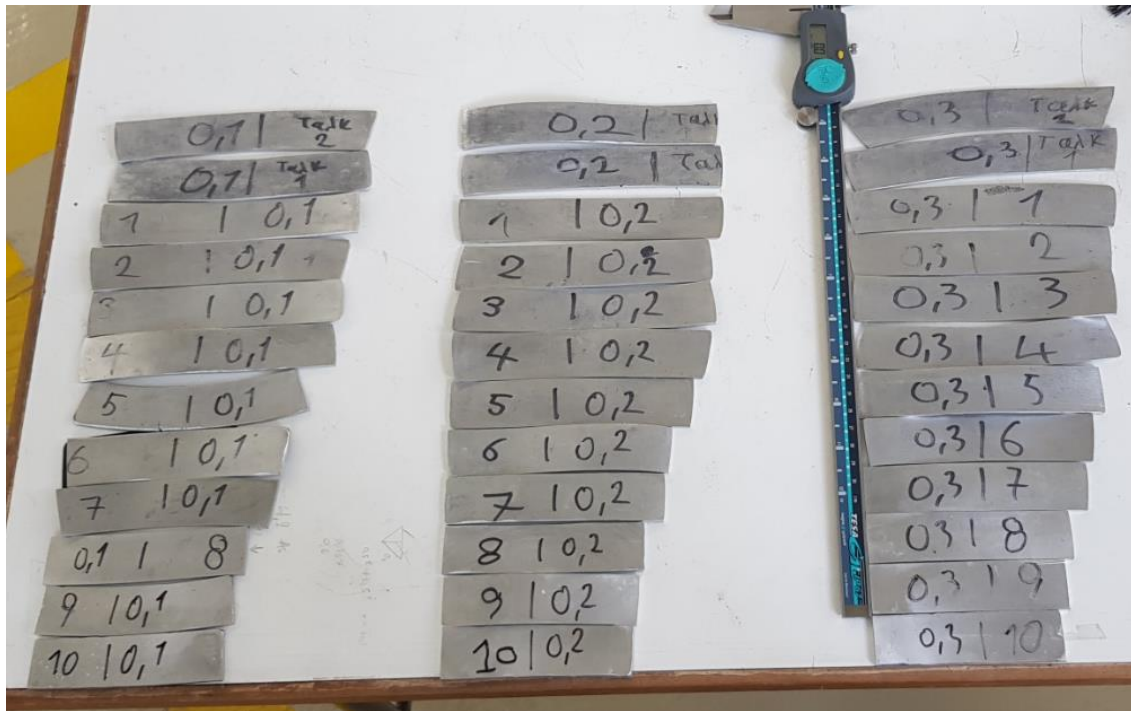
Εικόνα 111 : Τα δοκίμια σε όλα τα ποσοστά γραφενίου είναι έτοιμα για έλαση

2.5.7. Έλαση

Τα δοκίμια ελάσσονται με την μείωση να είναι στα 0,2 mm ανά πάσο, όπως προηγουμένως. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται, δηλαδή το δοκίμιο 10 ελάσσεται για 1 πάσο, το 9 για 2 κ.ο.κ., ενώ τα δοκίμια ταλκ ελάσσονται για 10 πάσα. Παρακάτω παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, καθώς και όλα τα δοκίμια μετά την έλαση.



Εικόνα 112 : Διάταξη της έλασης



Εικόνα 113 : Μορφή δοκιμίων μετά την έλαση

Όλα τα δοκίμια περνούσαν από κάθε πάσο. Γνωρίζοντας με ποιά σειρά πέρασαν τα δοκίμια έγινε στη συνέχεια η ανάγνωση των φορτίων, όπως περιγράφεται παρακάτω στην εικόνα 117.

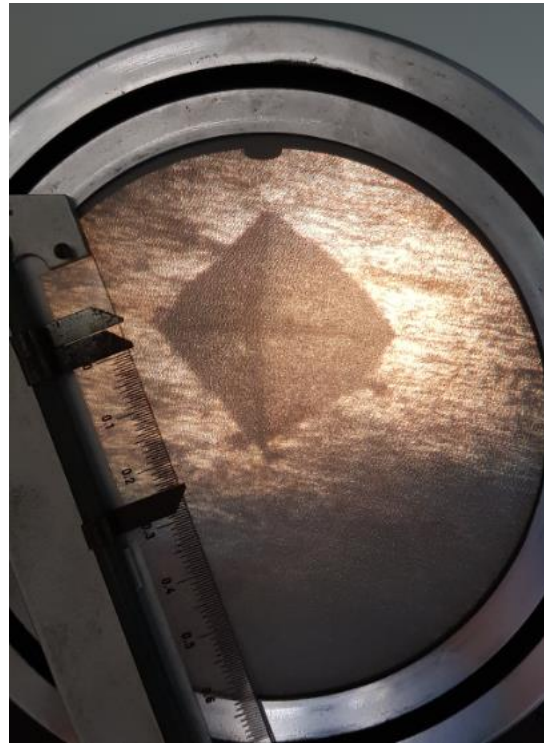
Ορισμένα δοκίμια εμφάνισαν ρωγμές, όπως το δοκίμιο της παρακάτω εικόνας.



Εικόνα 115 : Ρωγμές σε μερικά από τα δοκίμια αλουμινίου-γραφενίου

2.5.8. Σκληρομέτρηση

Όλα τα δοκίμια σκληρομετρήθηκαν σε 3 σημεία, όπου με την δοκιμή Vickers μετρώνται τα μήκη των 2 διαγωνίων του ρομβοειδούς αποτυπώματος, όπως στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 116 : Μέτρηση διαγωνίων

2.5.9. Αποτελέσματα

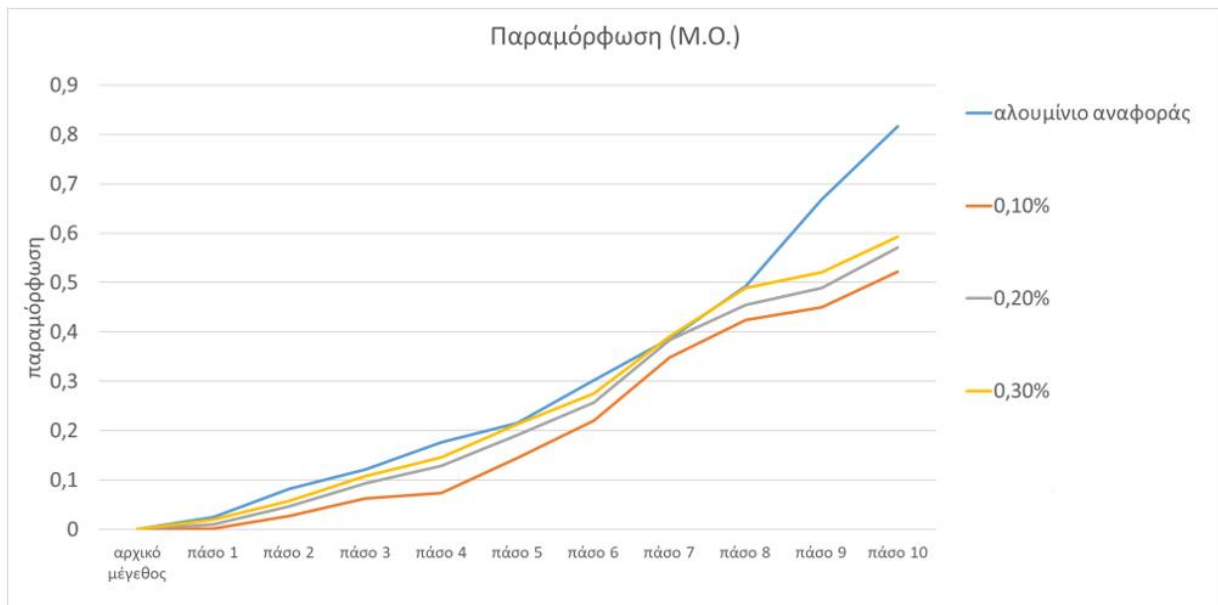
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων γίνεται συλλογή των δεδομένων για το φορτίο, το μήκος, το πλάτος, το πάχος και τη σκληρότητα των δοκιμίων. Αυτά παρουσιάζονται παρακάτω. Η δύναμη(φορτίο) κατά τον άξονα Υ λαμβάνεται στο μέγιστο της λαμβανόμενης καμπύλης. Αυτό είναι το φορτίο που υπάρχει στο ουδέτερο σημείο και δεν περιέχει συνιστώσες λόγω τριβής κατά τον Χ άξονα.



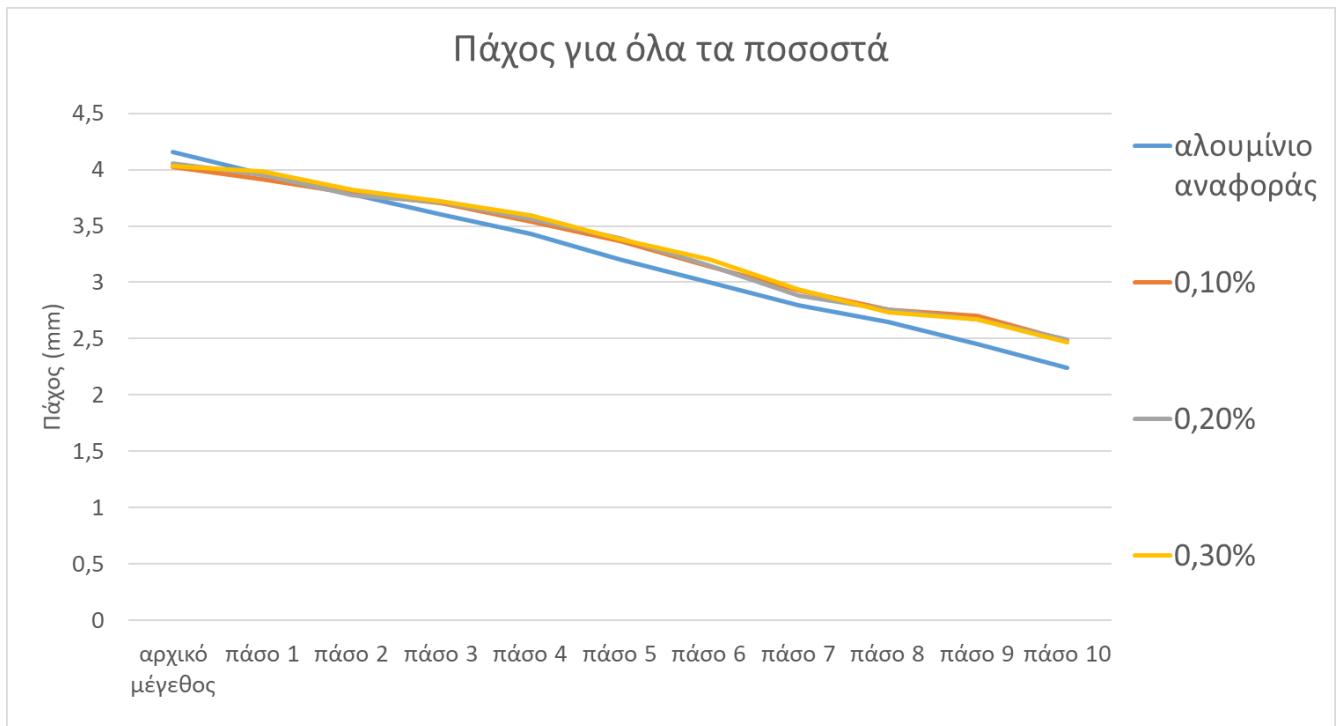
Εικόνα 117 : Ανάγνωση του φορτίου



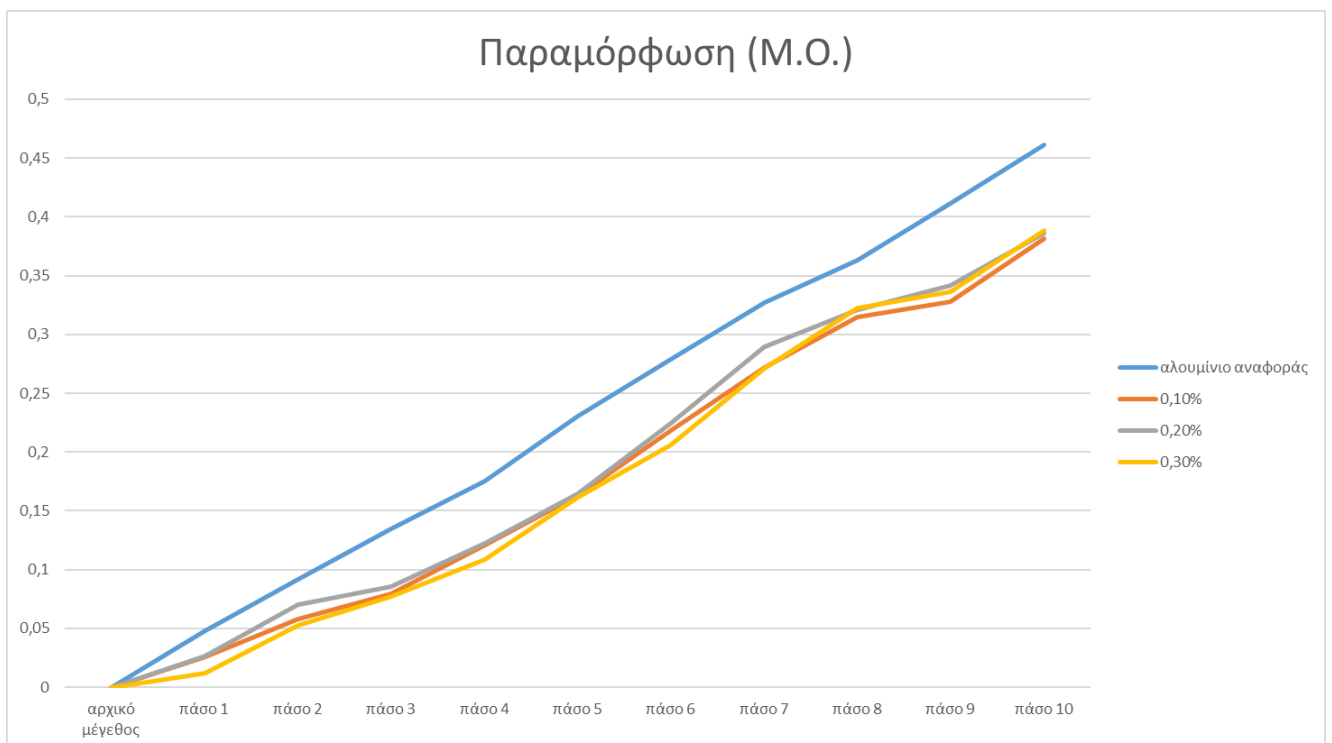
Διάγραμμα 3 : Μήκος για όλα τα ποσοστά



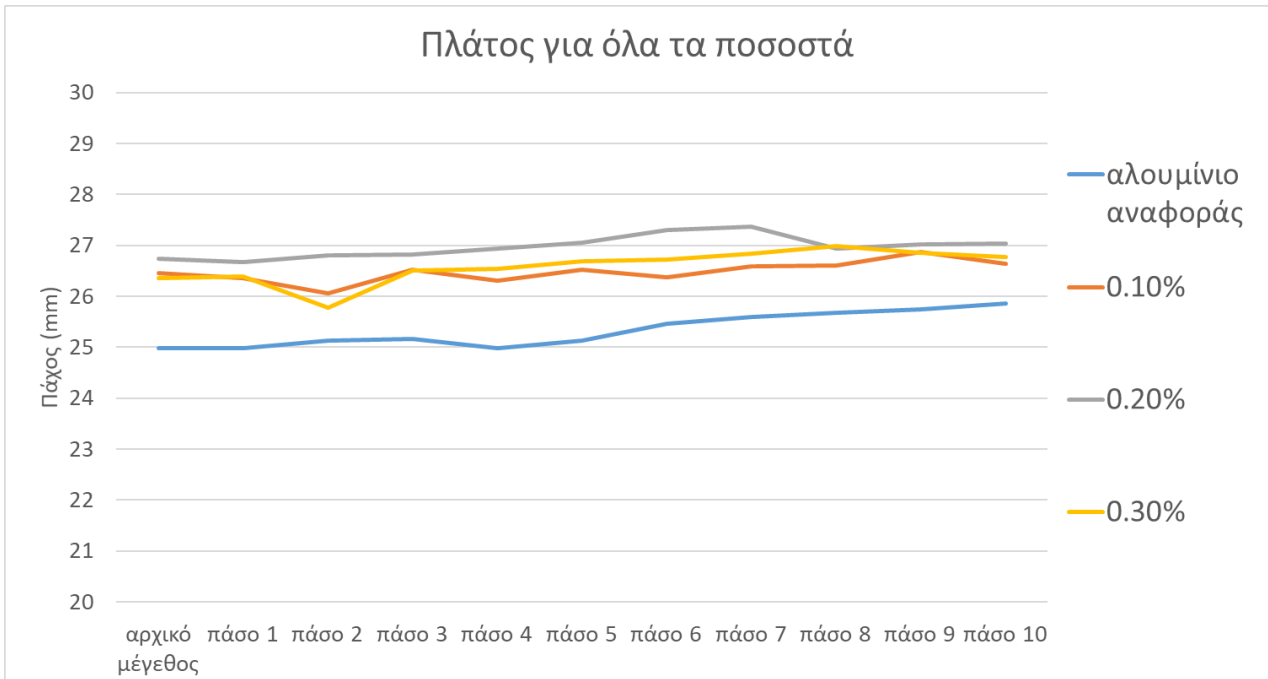
Διάγραμμα 4 : παραμόρφωση κατά το μήκος για όλα τα ποσοστά



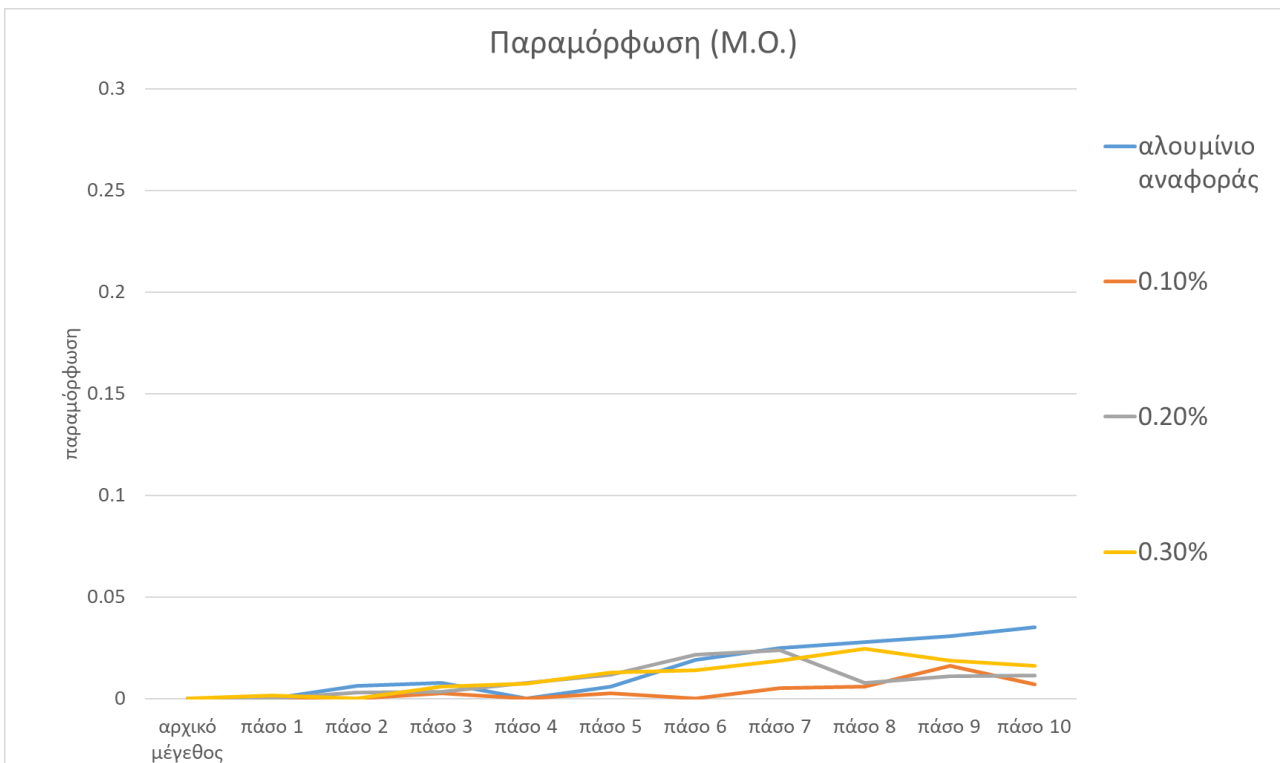
Διάγραμμα 5 : Πάχος για όλα τα ποσοστά



Διάγραμμα 6 : Παραμόρφωση κατά το πάχος για όλα τα ποσοστά

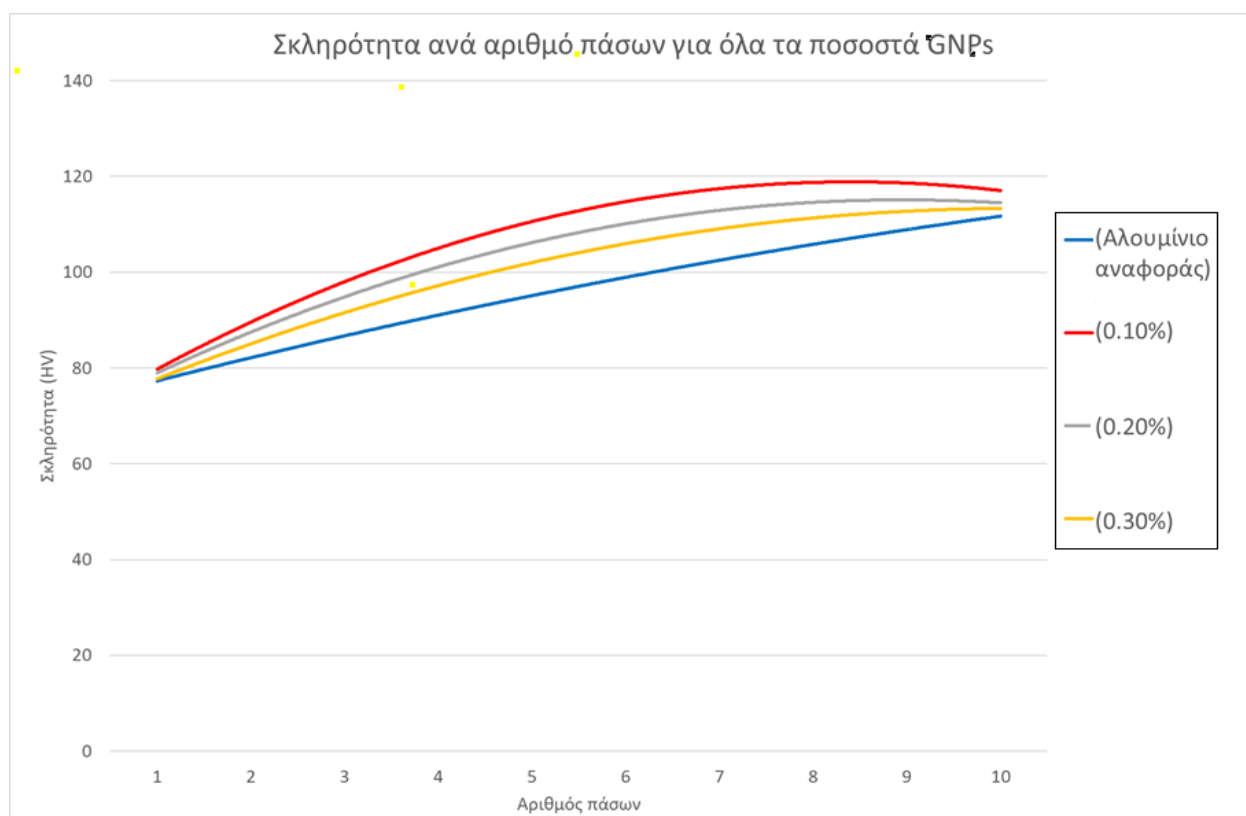


Διάγραμμα 7 : Πλάτος για όλα τα ποσοστά



Διάγραμμα 8 : Παραμόρφωση κατά το πλάτος για όλα τα ποσοστά

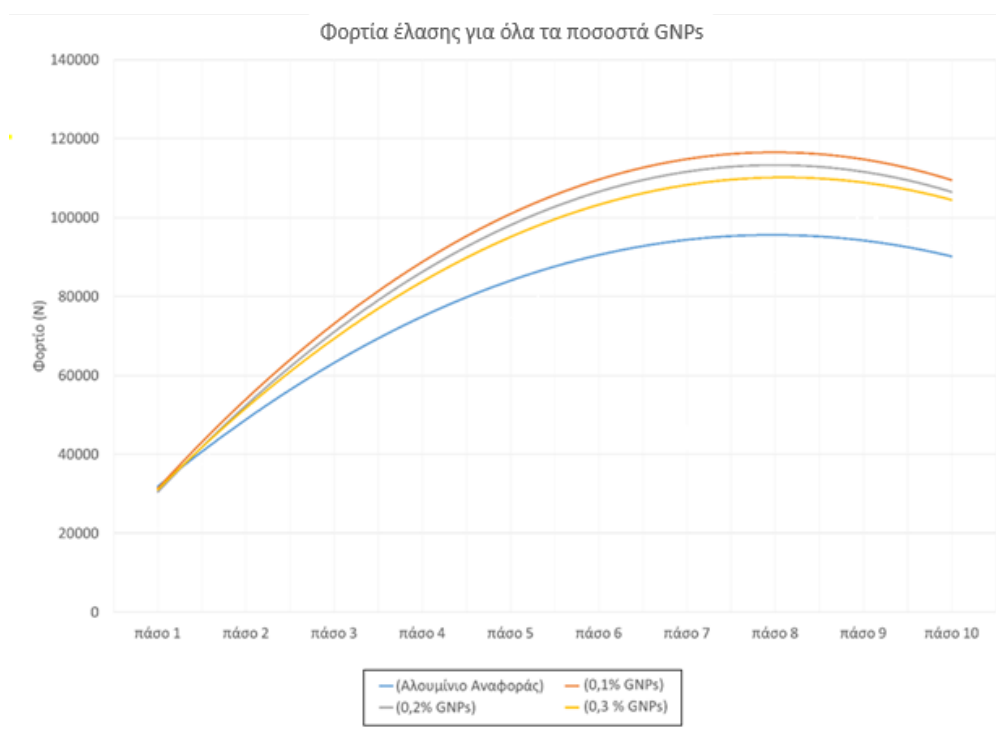
Απο τα διαγράμματα μήκους πάχους και πλάτους (3, 5 και 7) και τα αντίστοιχα διαγράμματα παραμορφώσεων τους, παρατηρούμε ότι η διαστασιολογική διαμορφωσιμότητα είναι ίδια για όλα τα ποσοστά γραφενίου και το αλουμίνιο αναφοράς. Η αύξηση του μήκους είναι γραμμική. Η μικρή διαφορά κατά τα δύο τελευταία πάσα μπορεί να αποδοθεί σε πιθανό σφάλμα μέτρησης. Ωστόσο βλέπουμε ότι στα δύο τελευταία πάσα το πάχος είναι μικρότερο στο αλουμίνιο αναφοράς. Το τελικό πάχος των δοκιμίων αναφοράς είναι κατά 0,2 mm μικρότερο, συνεπώς είναι αναμενόμενο να υπάρχει μικρή αύξηση στην επιμήκυνση και στην αύξηση του πλάτους κατά τα δύο τελευταία πάσα. Η μείωση του πάχους είναι επίσης γραμμική, όπως και η παραμόρφωση κατά το πάχος. Η κλίση που έχουν τα δοκίμια αναφοράς είναι ίδια, ενώ η τιμή είναι σταθερά μειωμένη κατά 0,05. Στα δύο τελευταία πάσα βλέπουμε ότι η κλίση της παραμόρφωσης αυξάνεται. Τέλος το πλάτος δεν μεταβάλλεται σημαντικά, δηλαδή υπάρχει πολύ μικρό lateral spread. Η παραμόρφωση είναι πολύ μικρή για όλες τις σειρές δοκιμίων, ενώ βλέπουμε την αύξησή της στα τελευταία δύο πάσα για το αλουμίνιο αναφοράς.



Διάγραμμα 9 : Σκληρότητα ανά αριθμό πάσων για όλα τα ποσοστά

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η σκληρότητα για το αλουμίνιο αναφοράς αυξάνει γραμμικά. Για τα δοκίμια με γραφένιο δεν συμβαίνει αυτό. Όλα τα δοκίμια με

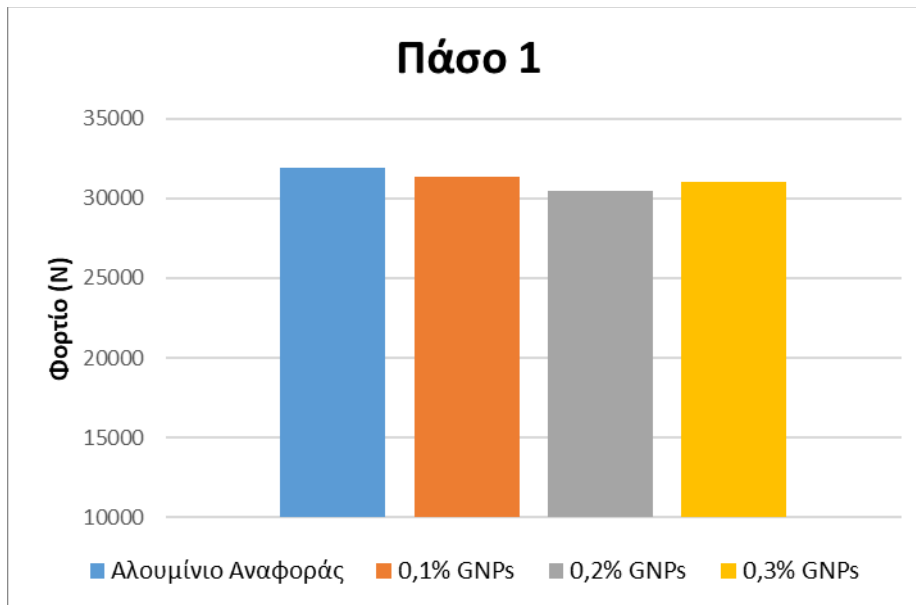
γραφένιο έχουν μεγαλύτερη σκληρότητα από τα δοκίμια αναφοράς. Η σκληρότητα είναι μεγαλύτερη για τα δοκίμια 0,1%, μετά ακολουθούν τα 0,2% και τέλος τα 0,3%. Μετά το 8^ο πάσο η σκληρότητα δεν αυξάνεται για αυτά, αντιθέτως μειώνεται ελάχιστα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα όρια των νανοδομών γραφενίου, λόγω των συνεχών πάσων της έλασης προκύπτουν κενά και θραύσεις στις διεπιφάνειες αλουμινίου-γραφενίου. Σε αυτά τα σημεία υπάρχει σημείο εκτόνωσης της πίεσης κατά την σκληρομέτρηση, λόγω υποχώρησης του αλουμινίου σε αυτά τα σημεία. Έτσι η σκληρότητα αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των πασών, λόγω εργοσκληύρυνσης, όμως το παραπάνω φαινόμενο έχει αντίθετη επίδραση. Η σταθεροποίηση της σκληρότητας στα τελευταία πάσα πραγματοποιείται και τα δύο παραπάνω φαινόμενα εξομαλύνονται.



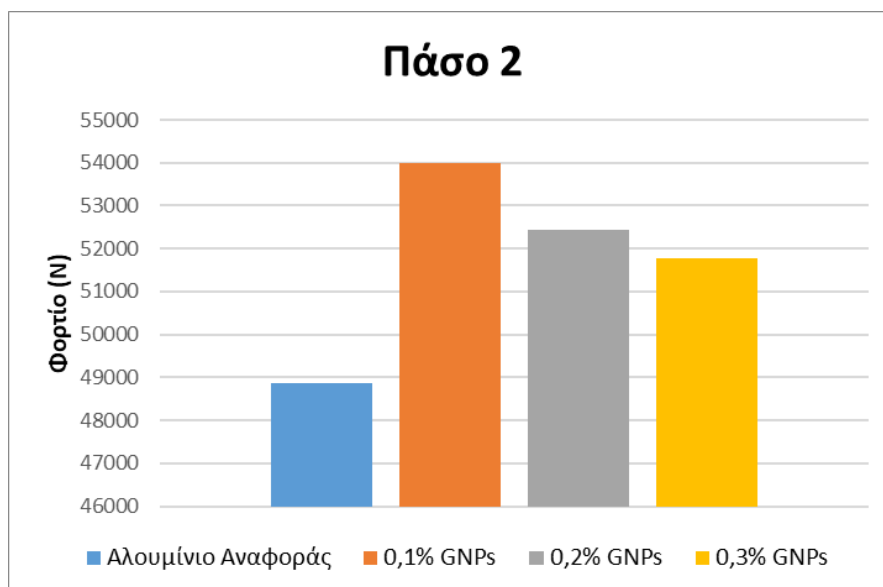
Διάγραμμα 10 : Φορτία όλων των ποσοστών

Τα φορτία για τα δοκίμια με γραφένιο βλέπουμε να είναι μεγαλύτερα από του αλουμινίου αναφοράς. Τα μεγαλύτερα φορτία είναι αυτά των δοκιμών 0,1%, μετά ακολουθούν τα δοκίμια 0,2% και τέλος τα δοκίμια 0,3%. Όσο αυξάνει το πάσο της έλασης αυξάνεται το φορτίο. Ωστόσο μετά το 8^ο πάσο το φορτίο παρουσιάζει πτώση. Αυτό συμβαίνει τόσο στα δοκίμια με γραφένιο, όσο και στα δοκίμια αναφοράς. Όσο αυξάνουν προοδευτικά τα πάσα της έλασης, είναι πιθανός ο σχηματισμός κενών στις διεπιφάνειες αλουμινίου-

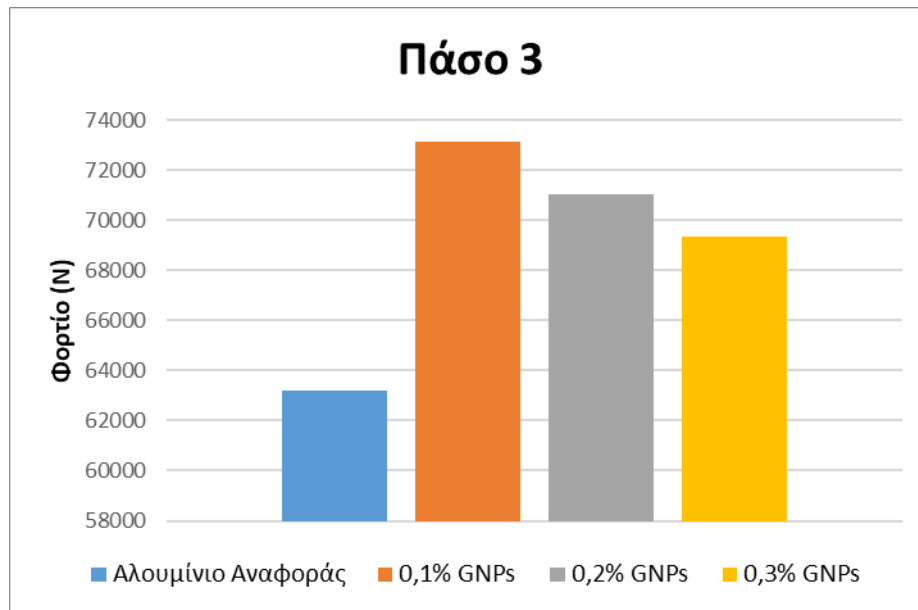
γραφηνίου. Τα κενά αυτά συμπιέζονται προοδευτικά και κατά τα τελευταία πάσα της έλασης πιθανόν υποχωρούν, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο το φορτίο της έλασης. Στα δοκίμια αλουμινίου αναφοράς σχηματίζονται κενά γύρω από τις δεύτερες φάσεις εντός του μεταλλικού πλέγματος. Τα κενά αυτά αναπτύσσονται και ενώνονται για να σχηματίσουν ρωγμές. Με τον ίδιο τρόπο οι ρωγμές αυτές υποχωρούν, μειώνοντας το φορτίο της έλασης [7]. Βλέπουμε δηλαδή ότι μέχρι το 8^ο πάσο, δηλαδή όταν τα δοκίμια βρίσκονται στα 2.4 mm, η συμπεριφορά του υλικού είναι καλή, όταν όμως γίνει απόπειρα για έλαση μέχρι 2 mm, δηλαδή μέχρι το μισό πάχος, το υλικό υποβαθμίζεται.



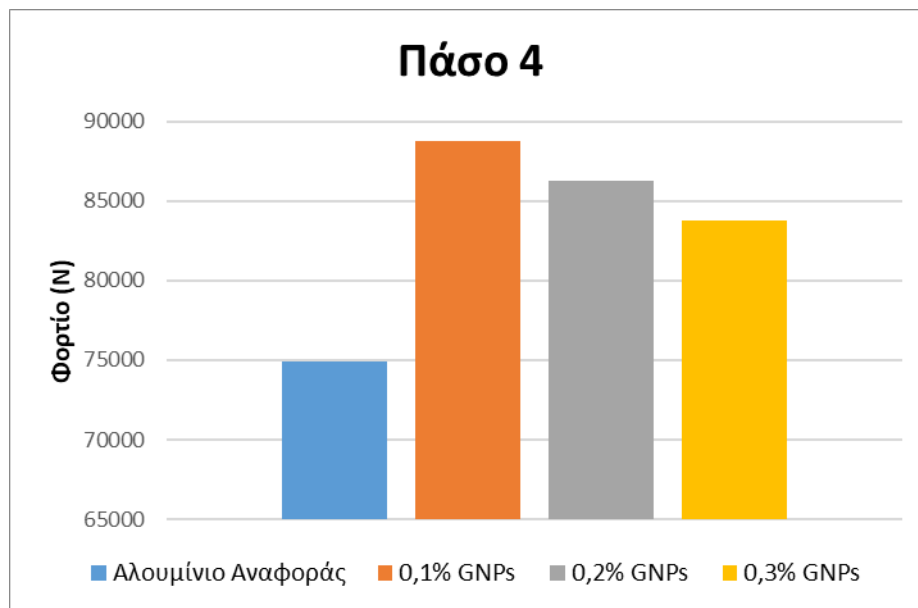
Διάγραμμα 11 : Πάσο 1



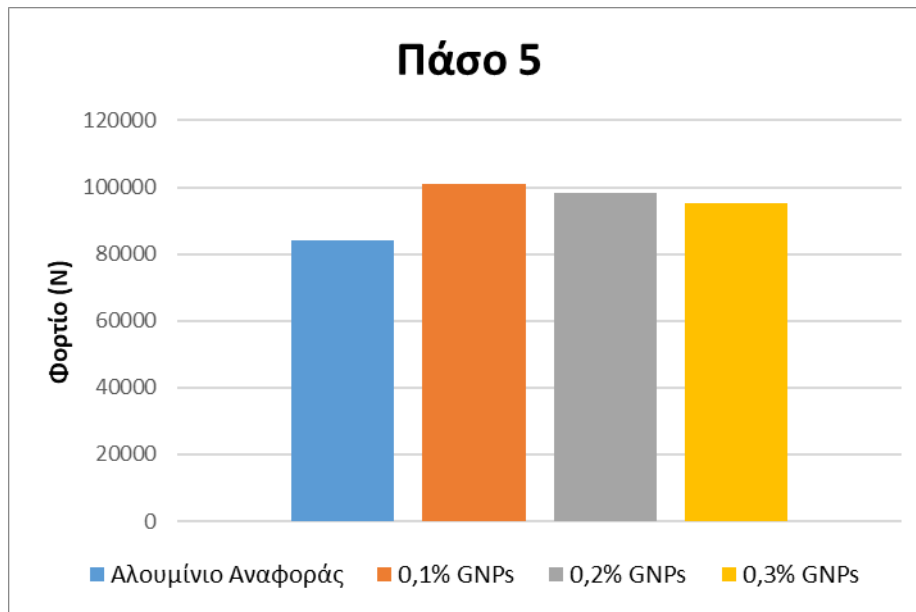
Διάγραμμα 12 : Πάσο 2



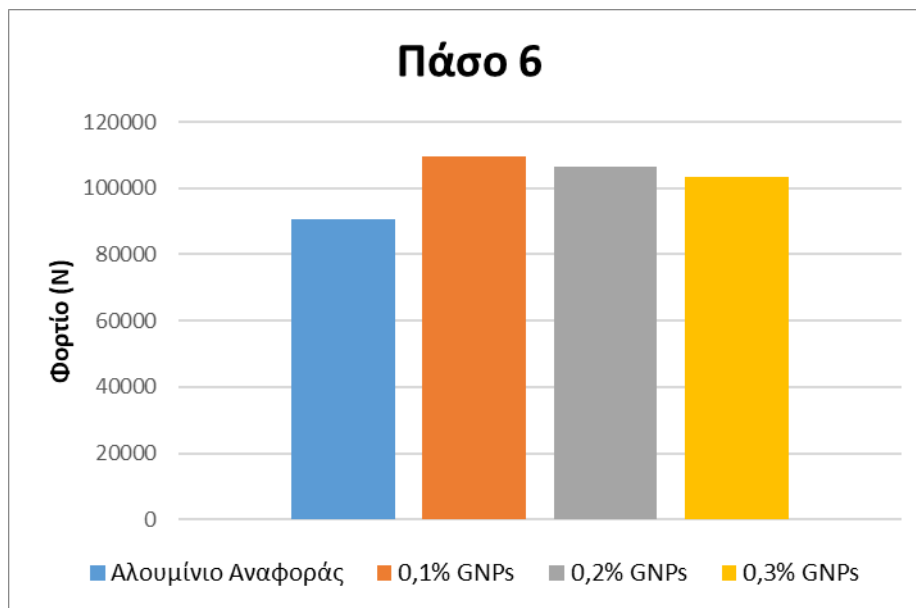
Διάγραμμα 13 : Πάσο 3



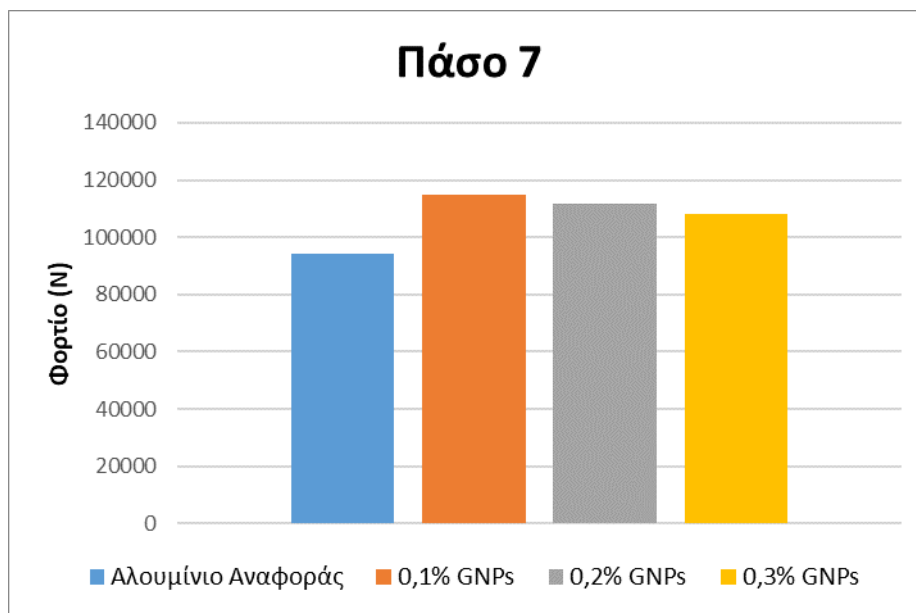
Διάγραμμα 14 : Πάσο 4



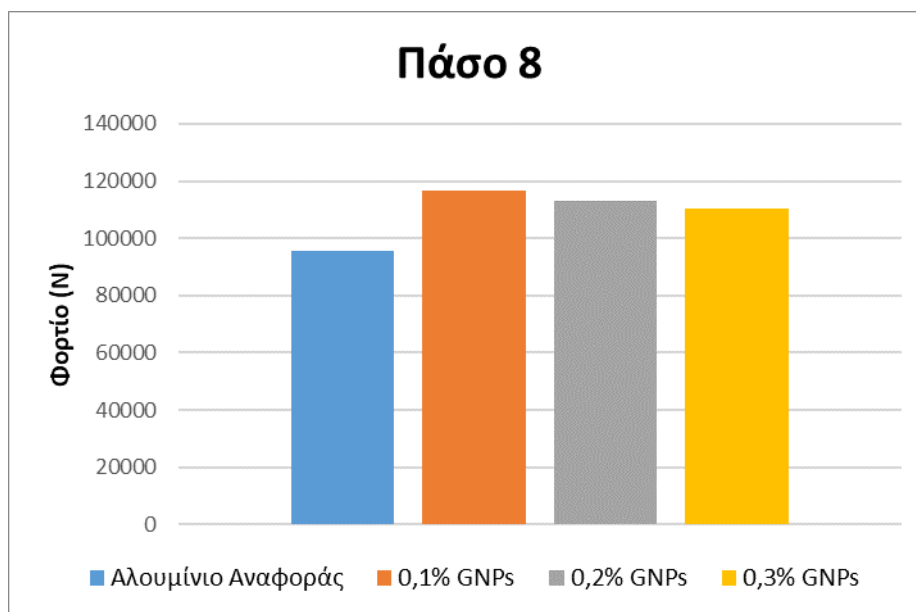
Διάγραμμα 15 : Πάσο 5



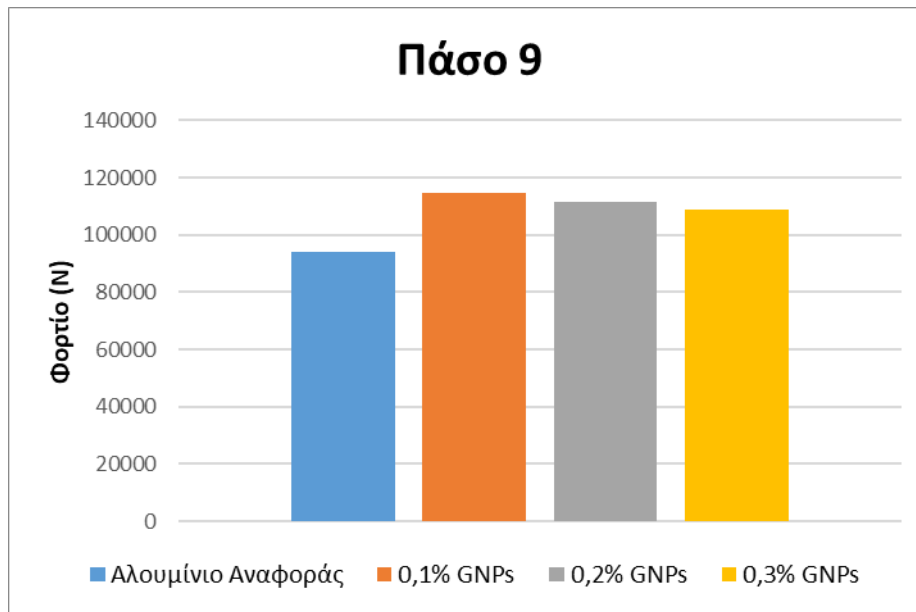
Διάγραμμα 16 : Πάσο 6



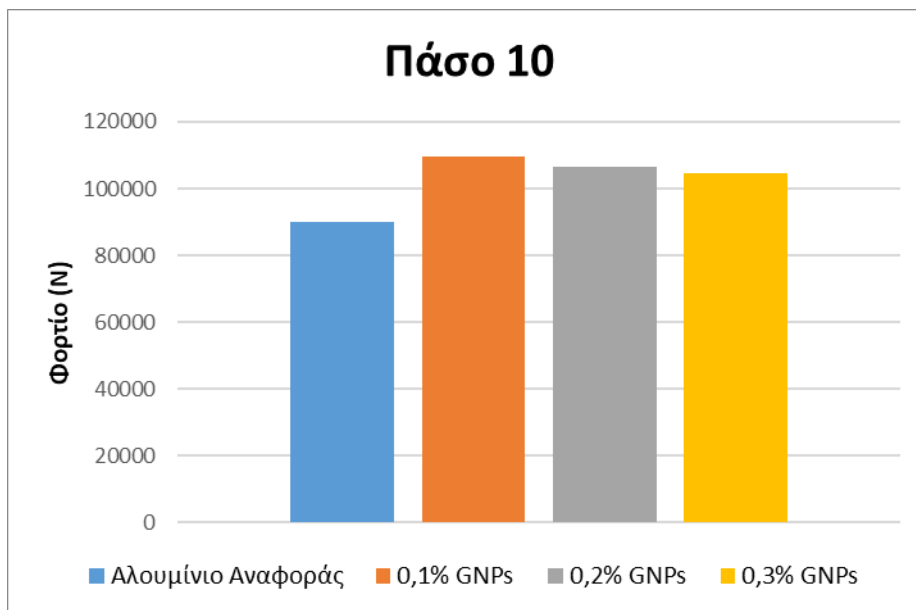
Διάγραμμα 17 : Πάσο 7



Διάγραμμα 18 : Πάσο 8



Διάγραμμα 19 : Πάσο 9



Διάγραμμα 20 : Πάσο 10

Επαληθεύουμε, τα παραπάνω συμπεράσματα, ότι δηλαδή υπάρχει αύξηση του φορτίου έλασης για 0,1% κ.β. περιεκτικότητα σε γραφένιο, ενώ για μεγαλύτερα ποσοστά το φορτίο μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό γραφενίου. Αυτό υποδεικνύει την εμφάνιση ενώσεων καρβιδίων του αλουμινίου (Al_4C_3) [6]. Αυτές οι φάσεις είναι πολύ ψαθυρές και εμφανίζονται σε ομάδες. Στα δοκίμια περιεκτικότητας μεγαλύτερης του 0.1% κ.β. σχηματίζονται αυτές οι φάσεις, που λόγω της ψαθυρότητάς τους υποχωρούν πιο εύκολα από τις υπόλοιπες κατακρημνίσεις(ενώσεις αλουμινίου με το μαγνήσιο και το πυρίτιο που υπάρχει μέσα στο υλικό), που περιέχονται στα δοκίμια 0,1%, με την αύξηση πίεσης. Οι ενώσεις αυτές είναι $MgAl_{13}$ και $MgSiAl_{30}$. Οι δεύτερες δημιουργούνται για ποσοστά γραφενίου 0,2% και μεγαλύτερα. [2]. Έτσι για συγκεκριμένο αριθμό πάσου, όσο αυξάνεται το ποσοστό γραφενίου, πέφτει το φορτίο, λόγω της δημιουργίας αυτών των ανεπιθύμητων ενώσεων.

2.5.10. Μεταλλογραφική ανάλυση

Τα δοκίμια παρατηρούνται σε οπτικό μικροσκόπιο για να μελετηθεί η δομή τους. Επιλέγονται ανά 3 πάσα αντιπροσωπευτικά δοκίμια, καθώς και ένα δοκίμιο ταλκ από κάθε ποσοστό γραφενίου. Δηλαδή επιλέγονται τα δοκίμια 1, 5 και 10. Επίσης επιλέγονται τα αντίστοιχα από το αλουμίνιο αναφοράς. Έτσι ελέγχονται τα δοκίμια τα οποία έχουν ελαστεί για 10, 5 και 1 πάσο αντίστοιχα. Σε αυτά τα δοκίμια επιλέγουμε να παρατηρήσουμε την εγκάρσια(cross section) και την επιμήκης(longitudinal section) τομή. Για τον λόγο αυτό τα δοκίμια κόβονται σε δισκοτόμο.



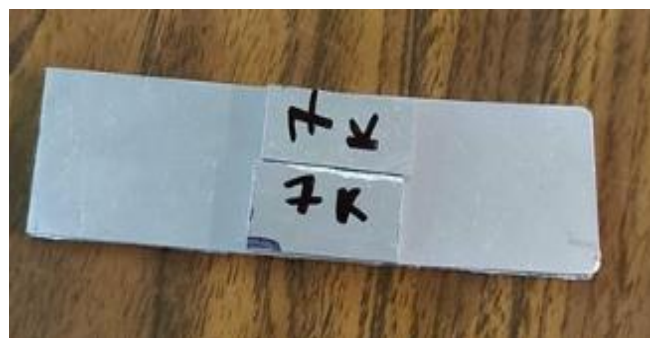
Εικόνα 118 : Τα δοκίμια που επιλέχθηκαν



Εικόνα 119 : Ο δισκοτόμος



Εικόνα 120 : Η πρώτη κοπή



Εικόνα 121 : Η δεύτερη κοπή και τα τελικά επιθυμητά κομμάτια

Τα δοκίμια, στην συνέχεια, τοποθετούνται σε δοχεία, ώστε να γίνει εγκυβωτισμός τους μέσα σε μήτρα πολυμερούς. Αυτή είναι δύο συστατικών. Τα συστατικά αυτά αναμιγνύονται με αναλογία 2 προς 1 και στο μίγμα αυτό προστίθεται μικρή ποσότητα σκληρυντή.



Εικόνα 122 : Η τοποθέτηση γίνεται με συγκεκριμένη σειρά

Στην συνέχεια προετοιμάζεται το μείγμα της ρητίνης.



Εικόνα 123 : Ανάμειξη της ρητίνης

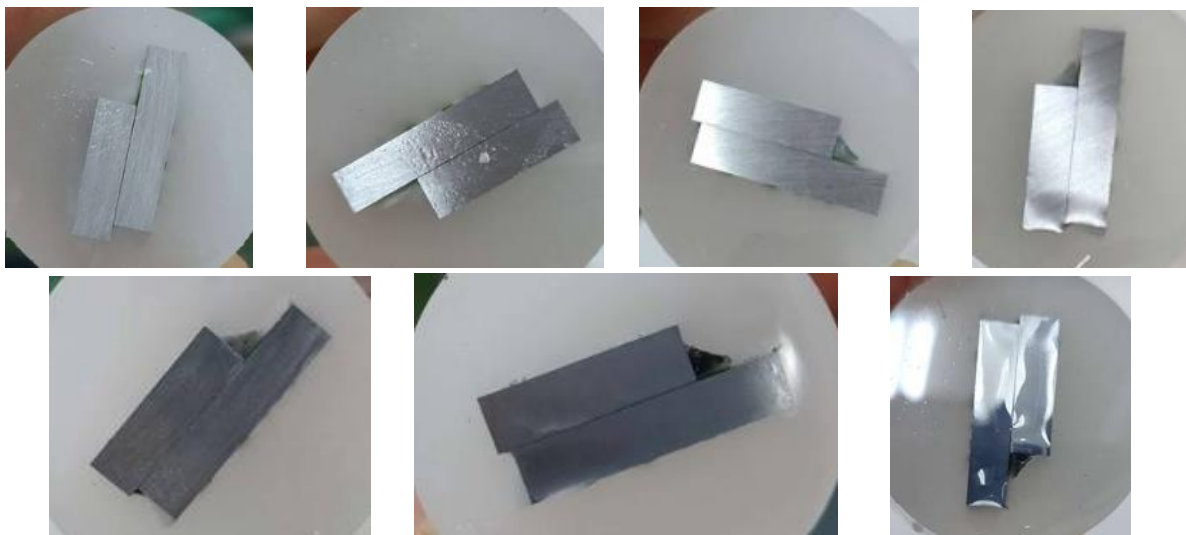


Εικόνα 124 : Τα δοκίμια μετά τον εγκυβωτισμό

Η στερεοποίηση της ρητίνης διαρκεί 24 ώρες. Μετά το πέρας αυτού του χρόνου, αφαιρούνται τα δοκίμια από τα κυάθια και προετοιμάζονται για λείανση. Η λείανση έγινε με σειρά λειαντικών χαρτιών μεγέθους :

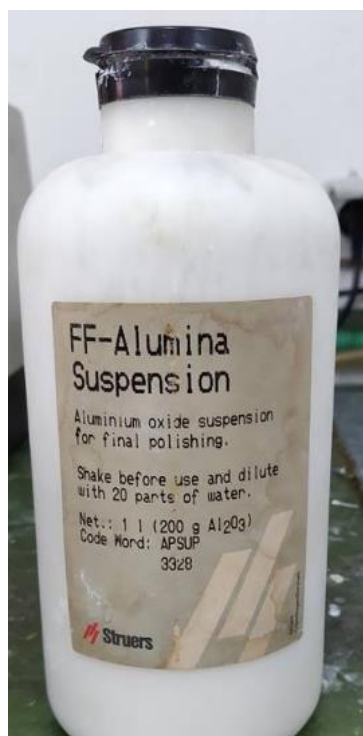
- 120
- 320
- 500
- 1000
- 2000
- 4000

Στο τέλος έγινε και λείανση με αλουμίνα πάνω σε βελούδο. Η παραγόμενη επιφάνεια καθρεπτίζει, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 125 : Εικόνα δομικών μετά το κάθε λειαντικό χαρτί (με την σειρά που αναγράφονται παραπάνω)

Η τελευταία εικόνα (κάτω δεξιά) είναι προφανώς η εικόνα ενός δοκιμίου μετά την στίλβωση.



Εικόνα 126 : Η αλουμίνα που χρησιμοποιείται

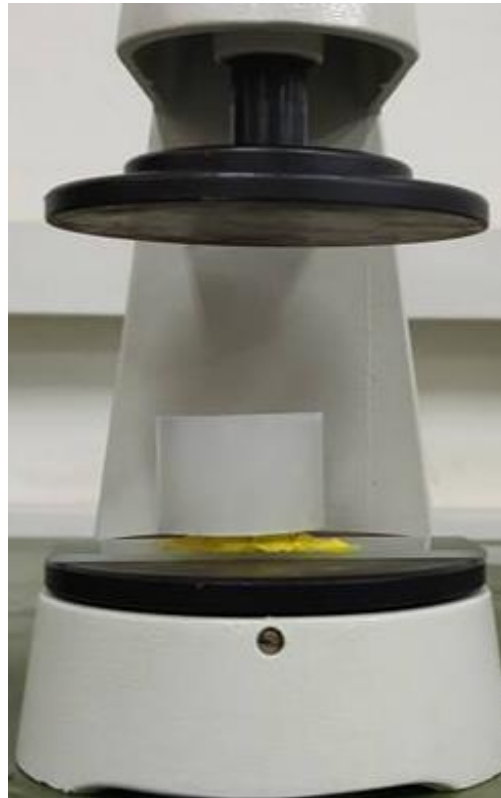
Στην συνέχεια γίνεται χημική προσβολή με χρήση του αντιδραστηρίου Kellers.

Kellers Etch	Distilled water	190 ml	10-30 second immersion. Use only Fresh etchant	Excellent for aluminum and alloys immersion for 10-20 seconds ; titanium alloys immersion for 10-20 seconds.
	Nitric acid	5 ml		
	Hydrochloric acid	3 ml		
	Hydrofluoric acid	2 ml		

Πίνακας 24 : Αντιδραστήριο Kellers

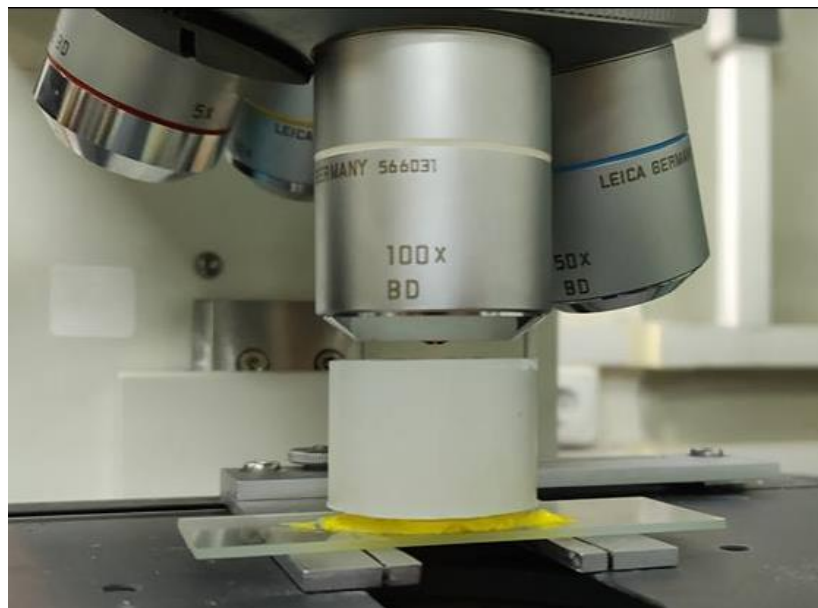
Αυτό αναδεικνύει τα όρια των κόκκων. Η επιφάνεια πρέπει στην συνέχεια να ξεπλυθεί με αιθανόλη και να στεγνωθεί με ζεστό αέρα.

Τα δοκίμια που προύπτουν έχουν μικρή κλίση, οπότε για να γίνει σωστή εστίαση των φακών γίνεται τοποθέτηση πλαστελίνης στην κάτω πλευρά τους και ισοπεδώνονται.



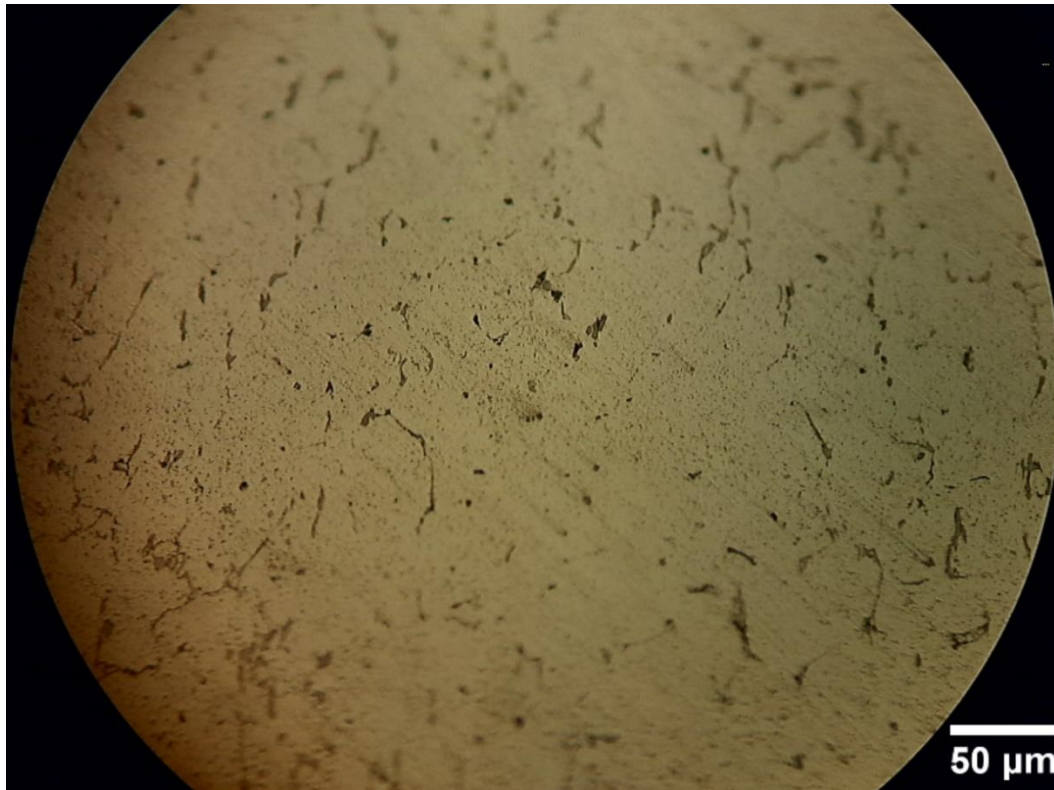
Εικόνα 127 : Προετοιμασία δοκιμίου

Οπότε είναι έτοιμα για παρατήρηση στο μικροσκόπιο.

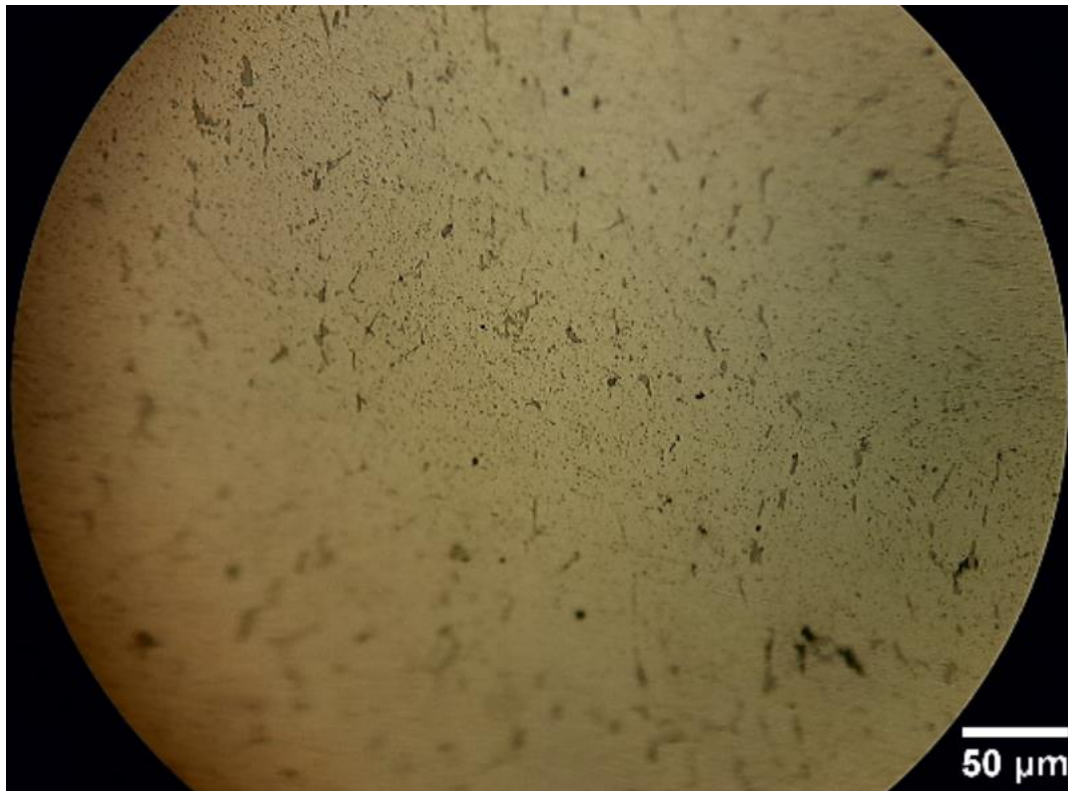


Εικόνα 128 : παρατήρηση στο μικροσκόπιο

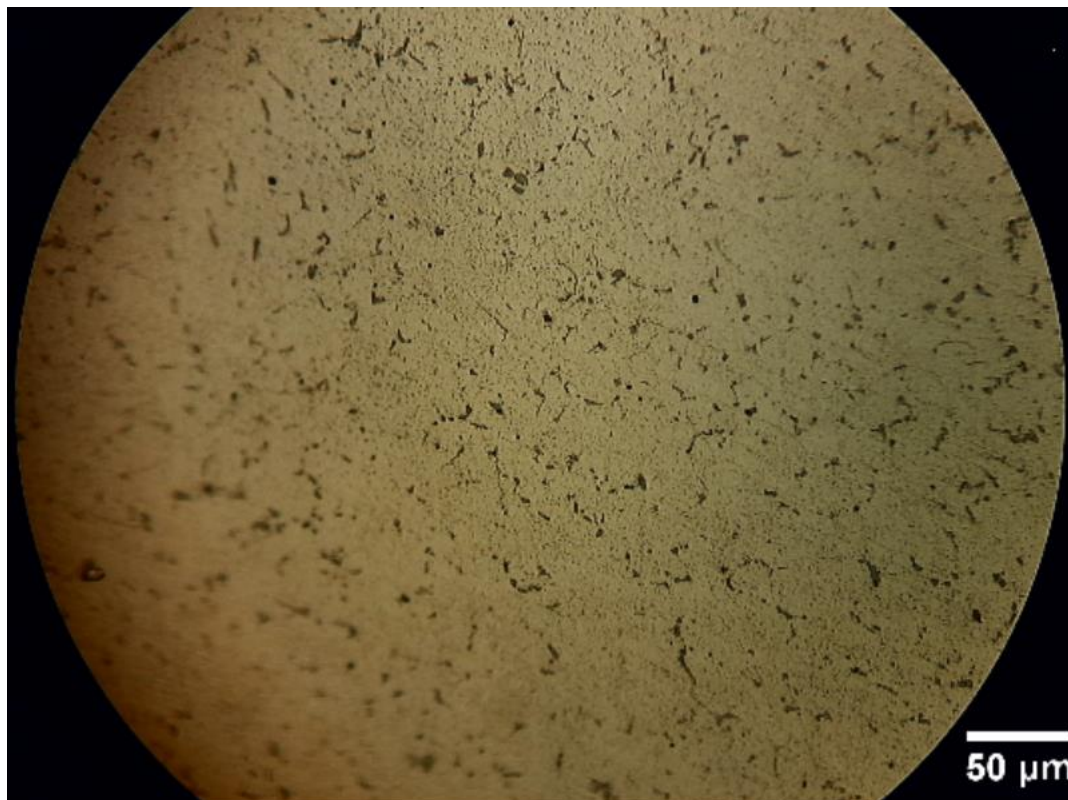
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δοκίμια όπως παρατηρήθηκαν με χρήση μικροσκοπίου:



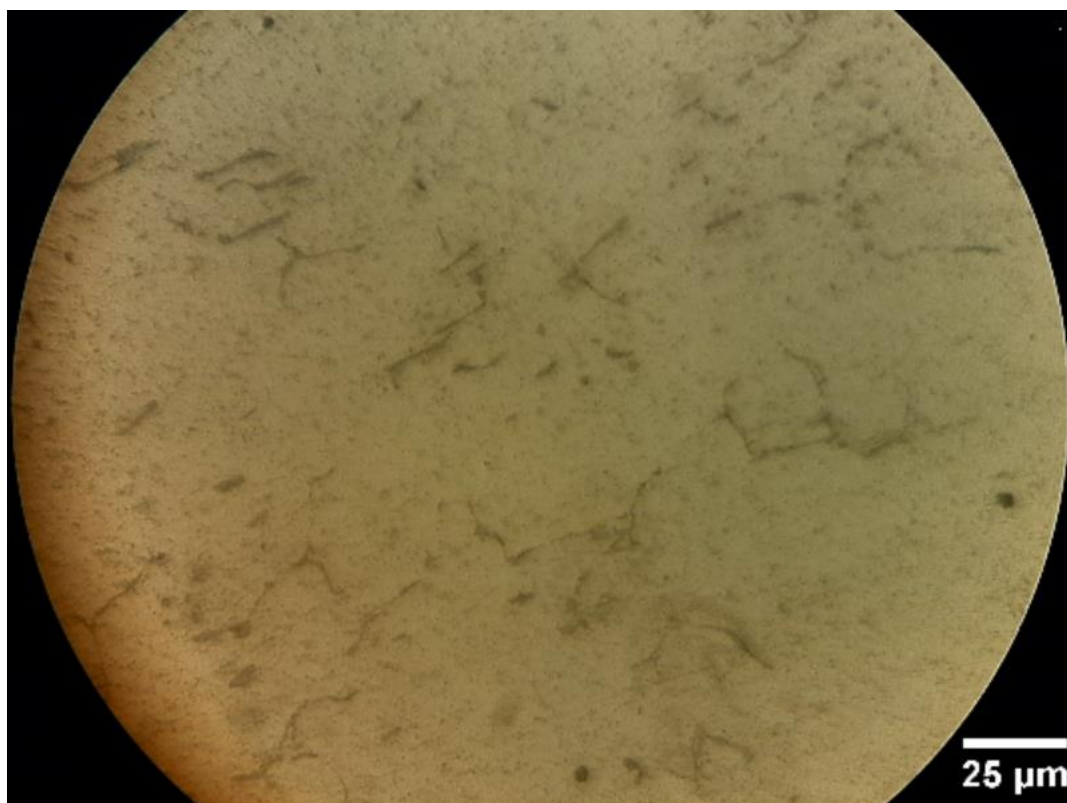
Εικόνα 129 : 1^ο πάσο (x50), δοκίμιο αναφοράς



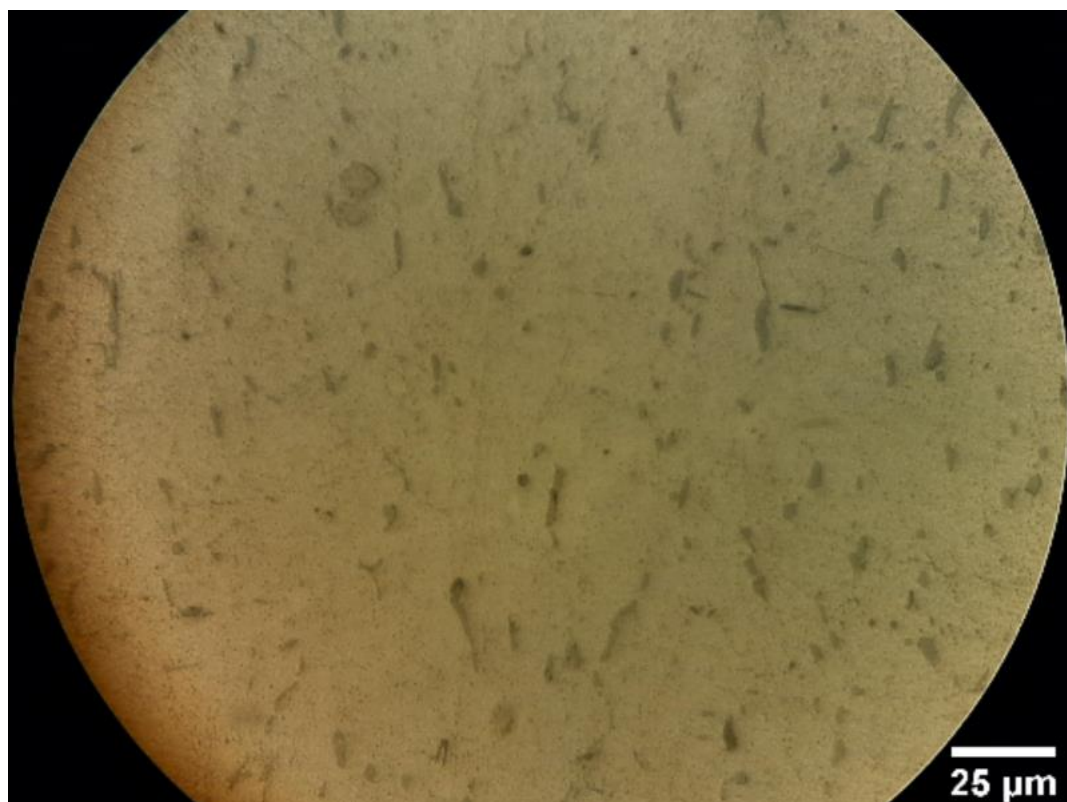
Εικόνα 130 : 5^ο πάσο (x50), δοκίμιο αναφοράς



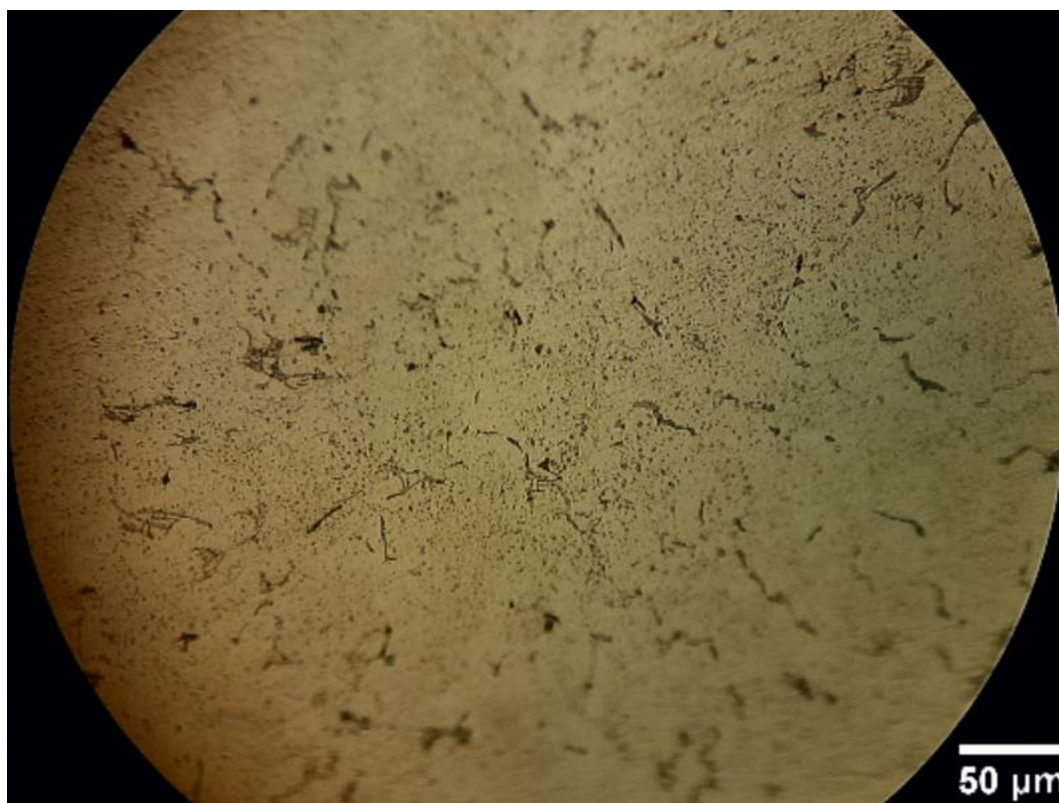
Εικόνα 131 : 10^ο πάσο (x50), δοκίμιο αναφοράς



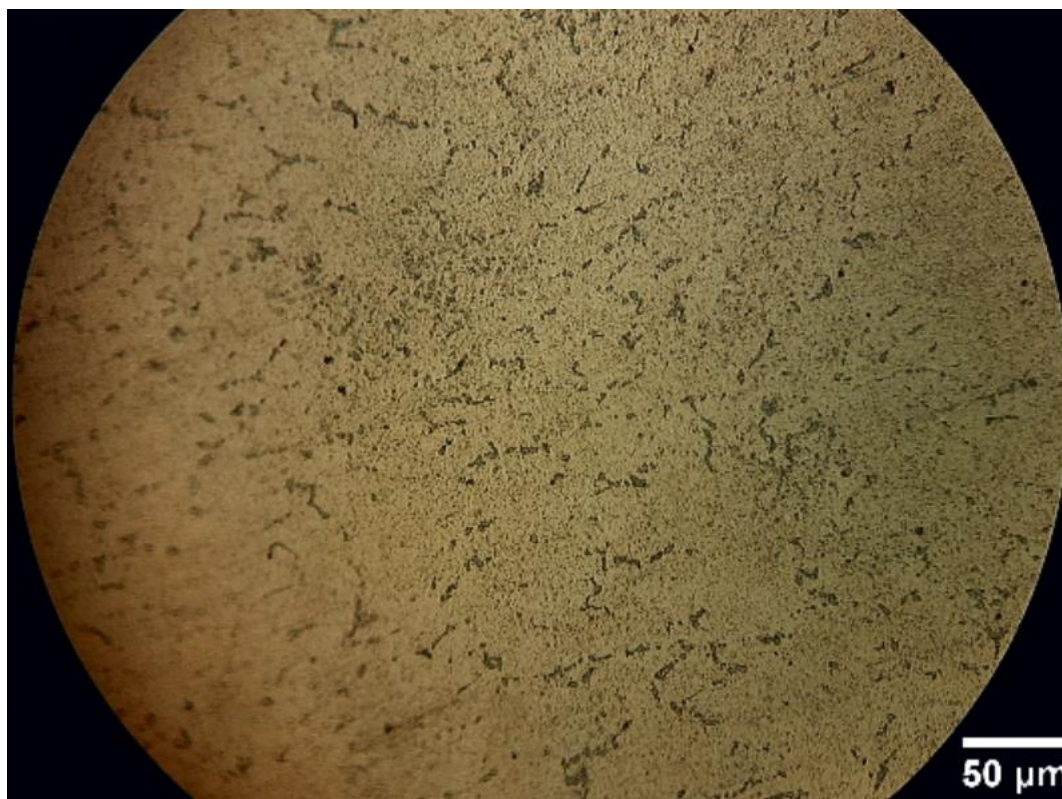
Εικόνα 132 : 1^ο πάσο (x100), δοκίμιο 0,1% GNPs



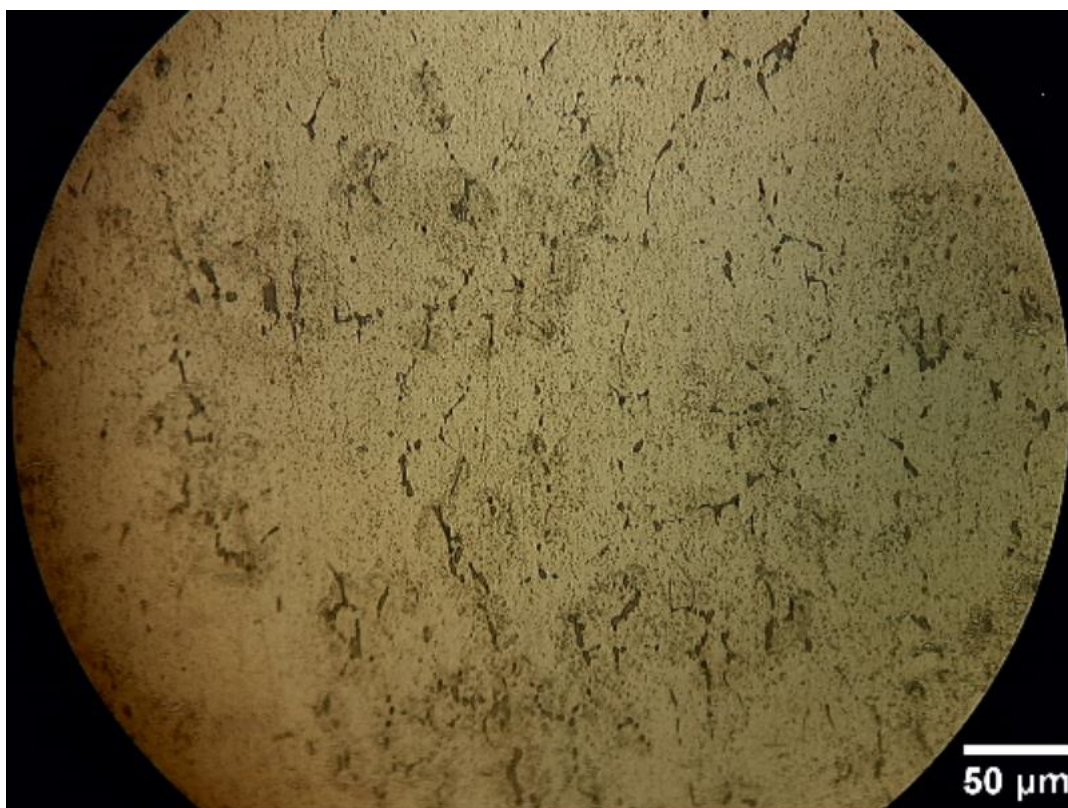
Εικόνα 133 : 5^ο πάσο (x100), δοκίμιο 0,1% GNPs



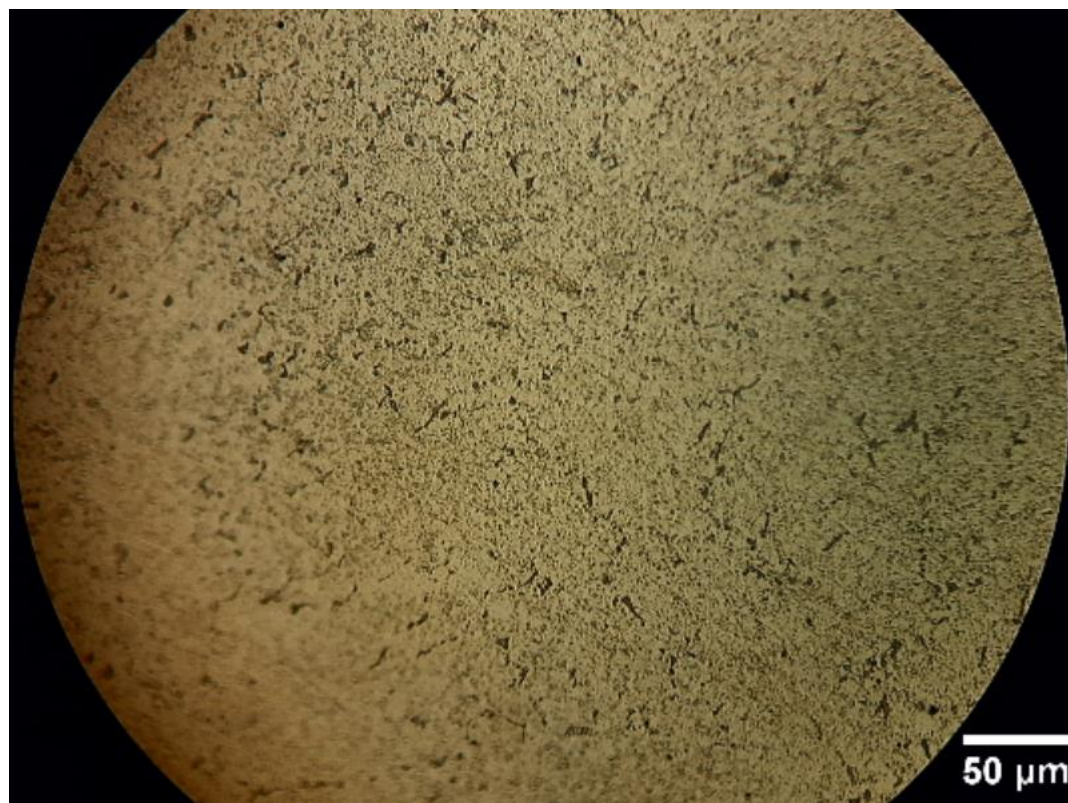
Εικόνα 134 : 5° πάσο (x50), δοκίμιο 0,2% GNPs



Εικόνα 135 : 10° πάσο (x50), δοκίμιο 0,2% GNPs



Εικόνα 136 : 1^ο πάσο (x50), δοκίμιο 0,3% GNPs



Εικόνα 137 : 10^ο πάσο (x50), δοκίμιο 0,3% GNPs



Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των πάσων, παρατηρούμε ότι οι κατακρημνίσεις μειώνονται σε μέγεθος. Σε μικρό αριθμό πάσων οι κατακρημνίσεις έχουν μεγαλύτερο μήκος και είναι βελονοειδής μορφής. Αυτό υποδεικνύει την θραύση των κατακρημνίσεων στα όρια των κόκκων. Έτσι σε μεγαλύτερα πάσα, αυτές έχουν μειωθεί σημαντικά σε μέγεθος, όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες.

2.6. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας έχουμε τα παρακάτω συμπεράσματα :

- Όσον αφορά τη μεταβολή των διαστάσεων, η συμπεριφορά του υλικού είναι σταθερή για όλες τις σειρές δοκιμών.
- Ως προς την σκληρότητα μπορούμε να πούμε ότι τα δοκίμια με γραφένιο έχουν μεγαλύτερη σκληρότητα από τα δοκίμια αναφοράς. Η σκληρότητα είναι μεγαλύτερη για τα δοκίμια 0,1%, μετά ακολουθούν τα 0,2% και τέλος τα 0,3%. Μετά το 8^ο πάσο η σκληρότητα δεν αυξάνεται για αυτά, αντιθέτως μειώνεται ελάχιστα., ως αποτέλεσμα των φαινομένων εργοσκληύρυνσης και εκτόνωσης πίεσης στα κενά κατά την σκληρομέτρηση.
- Ως προς τα φορτία μπορούμε να πούμε ότι για τα δοκίμια με γραφένιο βλέπουμε να είναι μεγαλύτερα από του αλουμινίου αναφοράς. Τα μεγαλύτερα φορτία είναι αυτά των δοκιμών 0,1%, μετά ακολουθούν τα δοκίμια 0,2% και τέλος τα δοκίμια 0,3%. Όσο αυξάνει το πάσο της έλασης αυξάνεται το φορτίο. Ωστόσο μετά το 8^ο πάσο το φορτίο παρουσιάζει πτώση. Αυτό συμβαίνει τόσο στα δοκίμια με γραφένιο, όσο και στα δοκίμια αναφοράς. Όσο αυξάνουν προοδευτικά τα πάσα της έλασης, είναι πιθανός ο σχηματισμός κενών στις διεπιφάνειες αλουμινίου-γραφενίου, τα οποία συμπιέζονται προοδευτικά και κατά τα τελευταία πάσα της έλασης πιθανόν υποχωρούν, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό το φορτίο έλασης.
- Στην περίπτωση ενίσχυσης της μήτρας αλουμινίου με ποσοστά GNPs μεγαλύτερα του 0.1 % κ.β., είναι γνωστό ότι παρατηρούνται τοπικές συγκεντρώσεις καρβιδίων του αλουμινίου (Al_4C_3), τα οποία είναι τοπικά συσσωρευμένα και αρκετά ψαθυρά [2]. Έτσι, όσο αυξάνει το ποσοστό GNPs, η θραύση τους οδηγεί σε πτώση του φορτίου έλασης για συγκεκριμένο αριθμό πάσου έλασης.
- Από την μεταλλογραφική ανάλυση παρατηρούμε ότι σε μικρό αριθμό πάσων οι κατακρημνίσεις έχουν μεγαλύτερο μήκος και είναι βελονοειδής μορφής. Βλέπουμε ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των πασών έχουμε θραύση των κατακρημνίσεων στα όρια των κόκκων. Το μέγεθός τους μικραίνει συνεχώς.



2.7. Βιβλιογραφία πειραματικού μέρους

- [1] Chemical Composition and Properties of Aluminum Alloys. (2018 Μάρτιος 23). Λήφθηκε από <https://www.unitedaluminum.com/chemical-composition-and-properties-of-aluminum-alloys/>
- [2] Georgios V. Seretis, Georgios Kouzilos, b, Aikaterini K. Polyzou, c, Dimitrios E. Manolakos, d and Christopher G. Provatidis. (2017). Effect of Graphene Nanoplatelets Fillers on Mechanical Properties and Microstructure of Cast Aluminum Matrix Composites, *Nano Hybrids and Composites*, 15, 26-35.
- [3] International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys. (2018 Φεβρουάριος 10). Λήφθηκε από http://www.aluminum.org/sites/default/files/TEAL_1_OL_2015.pdf
- [4] Material Property Data. (2017 Σεπτέμβριος 30). Λήφθηκε από <http://www.matweb.com/search/AdvancedSearch.aspx>
- [5] Reference Tables -- Coefficient of Friction. (2018 Μάιος 19). Λήφθηκε από <http://www.engineershandbook.com/Tables/frictioncoefficients.htm>
- [6] S.F. Bartolucci, J. Paras, M.A. Rafiee, J. Rafiee, S. Lee, D. Kapoor, N. Koratkar. (2011). Graphene-aluminum nanocomposites, *Mater. Sci. Eng., A* 528, 7933-7937.
- [7] Richard Gendey. (2002), Sheet Metal Formability, advanced materials and processes, *Advanced Materials and Processes*, 172, 33-37