

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΘΕΡΜΗΣ ΕΛΑΣΗΣ ΦΥΛΛΩΝ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ**



ΚΑΤΟΥΦΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ (6919)

ΤΡΥΦΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΚΥΡΙΑΚΟΣ (6828)

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

ΠΑΤΡΑ 2019

Πρόλογος

Η πτυχιακή εργασία αποτελεί συγκέντρωση όλης της γνώσης που λάβαμε κατά την φοίτηση μας στο ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας στους τομείς της μεταλλογνωσίας καθώς και των μεθόδων επεξεργασίας των υλικών. Εκεί ήρθαμε σε επαφή με την επιστήμη της Μηχανολογίας και με την βοήθεια των καθηγητών χτίσαμε το απαραίτητο επιστημονικό υπόβαθρο ώστε να εκπονήσουμε επιτυχώς την παρούσα πτυχιακή. Κατά την διάρκεια της εκπόνησης διευρύνσαμε τις γνώσεις μας πάνω στον τομέα της έλασης, καθώς επίσης και στην κατασκευή μειωτήρων και γενικά των εξαρτημάτων που απαρτίζουν αυτή την διάταξη, όπως ράουλα, στοιχεία κυλίσεως κτλ. Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή Ανδρέα Γιαννόπουλο για την καθοδήγηση και τις χρήσιμες υποδείξεις του καθώς επίσης και τον Σταύρο Μανιανή Προϊστάμενο Ηλεκτρολόγο στο εργοστάσιο ΕΛΒΑΛ για τις χρήσιμες πληροφορίες που μας προσέφερε με βάση ένα συγκεκριμένο μοντέλο μηχανής έλασης.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΦΟΙΤΗΤΩΝ

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι Φοιτητές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

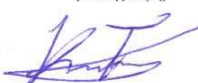
Οι Φοιτητές

(Ονοματεπώνυμο)

(Ονοματεπώνυμο)

Καζιόφης Παναγιώτης
(Υπογραφή)

Τρυφωνιάδης Κυριάκος
(Υπογραφή)



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στον Τεχνικό Υπολογισμό Μηχανήματος Έλασης Αλουμινίου Τύπου Tandem. Η συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιείται για παραγωγή φύλλων αλουμινίου με ευρεία ποικιλία στις διαστάσεις πάχους και πλάτους ανάλογα με την εφαρμογή του τελικού προϊόντος. Ορισμένες από τις κυριότερες εφαρμογές των προϊόντων της έλασης στην σύγχρονη παγκοσμιοποιημένη βιομηχανική παραγωγή, είναι η κατασκευή ελασμάτων αλουμινίου για χρήση στην αεροναυπηγική (π.χ κέλυφος αεροπλάνου), στην ναυπηγική, στην αεροδιαστημική, καθώς στην παραγωγή αναλώσιμων προϊόντων (π.χ κουτιά αναψυκτικών, αλουμινόχαρτο).

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε τέσσερα Κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στις ιδιότητες, στην ιστορική αναδρομή, στις μεθόδους παραγωγής του αλουμινίου, καθώς και στην ανακύκλωση του και στις διάφορες επιμέρους μεθόδους ανακύκλωσης. Το κεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε έξι μέρη. Αναλυτικότερα το πρώτο μέρος αναφέρεται στον ορισμό του αλουμινίου, το δεύτερο αναφέρεται στις ιδιότητες. Το τρίτο μέρος, του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζει την ιστορική αναδρομή του αλουμινίου και πώς αυτό ξεκίνησε να εμφανίζεται στην καθημερινότητά μας, Το τέταρτο μέρος παρουσιάζει τις μεθόδους παραγωγής του αλουμινίου, ενώ το πέμπτο αναλύει τα κράματα και την κατάταξή τους. Τέλος το έκτο μέρος παρουσιάζει την ανακύκλωση του αλουμινίου και τις μεθόδους που εκτελούνται για αυτή τη διαδικασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται οι κατεργασίες του αλουμινίου. Πιο συγκεκριμένα το κεφάλαιο χωρίζεται σε δυο μέρη. Στο πρώτο μέρος αναπτύσσονται οι μηχανικές κατεργασίες και πιο αναλυτικά η διαδικασία της έλασης (τους τύπους έλασης και τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται), η διέλαση (τύποι και μηχανήματα διέλασης), η προένταση και η συρματοποίηση. Το δεύτερο μέρος αναφέρεται επιδερμικά στις επιφανειακές κατεργασίες όπως η ανοδίωση, η ηλεκτροστατική βαφή και η σουμπλιχρωμία και κυρίως εστιάζουμε στις εφαρμογές.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται ο υπολογισμός της δύναμης, του απαιτούμενου έργου καθώς και η πλάτυνση που υφίσταται η ακτίνα καμπυλότητας των ραούλων κατεργασίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται οι τεχνικοί υπολογισμοί των εδράνων ολίσθησης. Αυτό το κεφάλαιο, χωρίζεται σε τρεις επιμέρους ενότητες. Στην πρώτη αναλύεται ο ορισμός των εδράνων. Στη δεύτερη ενότητα αναφέρονται οι μέθοδοι λίπανσης και οι κατηγορίες λίπανσης που υπάρχουν για τα συγκεκριμένα έδρανα. Τέλος, αναπτύσσονται οι υπολογισμοί καθώς και οι πίνακες που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των εδράνων ολίσθησης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η δομή του μειωτήρα καθώς και τα υλικά κατασκευής που χρησιμοποιήσαμε. Αποτελείται από αρκετές ενότητες και υποενότητες στις οποίες αναλύονται η μεθοδολογία εύρεσης των συντελεστών και των παραμέτρων, προκειμένου να επιτευχθεί η διαδικασία ελέγχου των γραναζιών και αξιολογείται η αντοχή τους βάσει τυποποιημένων μεθόδων κατά DIN3990.

Πίνακας περιεχομένων

1.Αλουμίνιο	1
1.1 Ορισμός.....	1
1.2 Ιδιότητες	2
1.2.1 Φυσικές Ιδιότητες.....	3
1.2.2 Χημικές Ιδιότητες.....	3
1.3 Ιστορική Αναδρομή Προέλευσης	4
1.4 Μέθοδοι Παραγωγής: Πρωτογενές και Δευτερογενές Αλουμίνιο	6
1.4.1 Επεξεργασία Βωξίτη	6
1.4.2 Διαδικασία παραγωγής Bayer.....	6
1.4.2.1 Προετοιμασία του βωξίτη	7
1.4.2.2 Διαδικασία πέψης	8
1.4.2.3 Διαδικασία καθαρισμού.....	8
1.4.2.4 Η καθίζηση του υδροξειδίου του αλουμινίου	9
1.4.2.5 Διαδικασία Ασβεστοποίησης.....	9
1.4.2.6 Επιπτώσεις της διαδικασίας Bayer	9
1.4.3 Μέθοδος HALL-HEROULT	10
1.4.4 Πρωτογενές Αλουμίνιο.....	12
1.4.5 Δευτερογενές Αλουμίνιο	12

1.5	Μεταλλεύματα, Παράγωγα και Κράματα	14
1.5.1	ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	14
1.5.1.1	ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (WROUGHT ALLOYS).....	14
1.5.1.2	ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ (CASTING ALLOYS)	15
1.5.2	ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	16
1.5.3	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	16
1.6	Ανακύκλωση	20
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : Κατεργασίες Αλουμινίου	22
2.1	Μηχανικές Κατεργασίες.....	22
2.1.1	Έλαση.....	23
2.1.1.1	Θερμή Έλαση	25
2.1.1.2	Ψυχρά Έλαση	25
2.1.1.3	Εργαλειομηχανή Έλασης.....	26
2.1.1.4	Προβλήματα στην Έλαση.....	30
2.1.1.5	Η έλαση στην Ελλάδα	31
2.1.2	Διέλαση	31
2.1.2.1	Είδη Διέλασης	32
2.1.2.2	Παράγοντες που επηρεάζουν την διέλαση.....	35

2.1.2.3 Η επίδραση της ταχύτητας στην διέλαση	35
2.1.3 Προένταση.....	36
2.1.3.1 Εργαλειομηχανή stretcher	36
2.1.3.2 Προετοιμασία τεμαχίου για Προένταση	37
2.1.4 Συρματοποίηση	37
2.1.4.1 Διαδικασία και χαρακτηριστικά Συρματοποίησης .	38
2.2 Επιφανειακές Κατεργασίες.....	38
2.2.1 Ανοδίωση	40
2.2.2 Ηλεκτροστατική Βαφή	40
2.2.3 Σουμπλιχρωμία.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΗΣ.....	42
3.1 Ταχύτητα Τεμαχίου	43
3.2 Μήκος τόξου Επαφής.....	45
3.3 Στροφές Ραούλων.....	47
3.4 Φορτίο Έλασης.....	48
3.5 Απαιτούμενο Έργο Κατεργασίας	49
3.6 Ροπή Στρέψης Ραούλων	50
3.7 Συντελεστής και Δύναμη Τριβής.....	51
3.8 Πλάτυνση καμπύλης επιφάνειας	53
Κεφάλαιο 4 ^ο : Έδρανα Ολίσθησης	56

4.1 Ορισμός.....	56
4.2 Κατηγορίες λίπανσης.....	57
4.2.1 Υδροδυναμική λίπανση	57
4.2.2 Υδροστατική λίπανση.....	58
4.2.3 Ελαστοϋδροδυναμική λίπανση.....	58
4.2.4 Οριακή λίπανση.....	58
4.2.5 Στερεά λίπανση	58
4.3 Υπολογισμός εδράνων ολίσθησης για την κατεργασία της έλασης.....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Σχεδιασμός Μειωτήρα και Έλεγχος Αντοχής Γραναζιών κατά DIN3990.....	68
5.1 Γενικά περί μειωτήρων	68
5.1.1 Είδη Μειωτήρων	69
5.1.2 Πλεονεκτήματα Μειωτήρων	69
5.1.4 Εγκατάσταση, Λειτουργία και Συντήρηση	70
5.2 Σχεδιασμός και Υπολογισμός Χαρακτηριστικών Μειωτήρα.....	71
5.2.1 Χαρακτηριστικά Μειωτήρα	71
5.2.2 Διαμόρφωση Μειωτήρα.....	72
5.2.3 Δεδομένα Υπολογισμού	72
5.2.4 Διάμετρος Ατράκτου	72

5.2.5 Αριθμός Δοντιών, Διάμετρος και Module των Πινιόν.....	73
5.2.5.1 Υπολογισμός Στοιχείων των Πινιόν	74
5.2.6 Αριθμός δοντιών, Διάμετρος, Module των Τροχών	75
5.2.6.1 Υπολογισμός Στοιχείων των Τροχών	75
5.3.1 Έλεγχος των Πινιόν σε θραύση	78
5.3.1.1 Υπολογισμός Περιφερειακής Δύναμης.....	78
5.3.1.2 Εύρεση Συντελεστή Εφαρμογής K_A.....	79
5.3.1.3 Εύρεση Συντελεστή Καταπονήσεων K_V.....	80
5.3.1.4 Εύρεση Συντελεστή Κατανομής Φορτίου K_{FA} ...	81
5.3.1.5 Εύρεση Συντελεστή Μορφής Y_{FA}.....	81
5.3.1.6 Εύρεση Συντελεστή Διόρθωσης της Τάσης Y_{SA}.	82
5.3.1.7 Συντελεστής Επικάλυψης Y_ϵ	83
5.3.1.8 Δυναμική Αντοχή Διάρκειας σ_{FI}	84
5.3.1.9 Εύρεση Συντελεστή Ασφαλείας S_F.....	85
5.3.1.10 Εύρεση Επιτρεπόμενης Τάσης στον Πόδα σ_{FP} .	85
5.3.1.11 Εύρεση της τάσης στον Πόδα	85
5.3.2 Έλεγχος Κινητήριου Πινιόν σε Πίεση Επιφάνειας	86
5.3.2.1 Υπολογισμός Περιφερειακής Δύναμης.....	87
5.3.2.2 Συντελεστής Κατανομής Φορτίου K_{Ha}	87
5.3.2.3 Εύρεση Συντελεστή Ζώνης Z_H	88

5.3.2.4	Εύρεση Συντελεστή Υλικού Z_M	88
5.3.2.5	Εύρεση Συντελεστή Επικάλυψης Z_e	89
5.3.2.6	Εύρεση Αντοχής Διάρκειας των Κατομών σ_{HI}	89
5.3.2.7	Συντελεστής Ασφάλειας σε Πίεση S_H	89
5.3.2.8	Επιτρεπόμενη Τάση για Πίεση Επιφάνειας σ_{HP} .	89
5.3.2.9	Υπολογισμός Πίεσης Επιφάνειας	89
5.3.3	Επαλήθευση ανισότητας για Πίεση Επιφάνειας του δεύτερου Πινιόν	90
5.4	Έλεγχος Αντοχής Τροχών	91
5.4.1	Έλεγχος των Τροχών σε θραύση	91
5.4.1.1	Υπολογισμός Περιφερειακής Δύναμης F_t	91
5.4.1.3	Εύρεση Επιτρεπόμενης Τάσης στον Πόδα σ_{FP} ...	92
5.4.2	Επαλήθευση ανισότητας για Πίεση Επιφάνειας Τροχού 1	94

Εισαγωγή

Η επιστήμη της έλασης, άρχισε να αναπτύσσεται κατά το δεύτερο μισό του 18^{ου} αιώνα, παράλληλα με την ανακάλυψη καινούργιων κραμάτων (κυρίως) αλουμινίου με πρωτοφανείς, για την εποχή, μηχανικών ιδιοτήτων που μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα εφαρμογών. Ως αποτέλεσμα της ανακάλυψης νέων, όλο και ανθεκτικότερων κραμάτων παρουσιάστηκε η ανάγκη για την σχεδίαση και κατασκευή ελαστρων με μεγαλύτερη αντοχή και δύναμη πατήματος, προκειμένου να επιτευχθεί η διαδικασία και η παραγωγή ελασμάτων που συνδυάζουν υψηλή αντοχή και εξαιρετική τελική επιφάνεια προϊόντος. Στην σημερινή εποχή, με την εξέλιξη της τεχνολογίας και της τεχνογνωσίας η έλαση είναι πλήρως επιστημονικά κατανοητή και δεν υπάρχουν «κρυφά σημεία», σε ότι αφορά την διαδικασία παραγωγής. Ομοίως, σημαντική εξέλιξη έχει υποστεί και η κατασκευή ελαστρων, με δυνατότητα πατήματος που φτάνει και τους 60.000 τόνους, ενώ επίσης είναι δυνατή κατασκευή νέων καινοτόμων ελαστρων που μπορούν να συνδυάσουν μειωμένο κόστος παραγωγής, με μειωμένο χρόνο παραγωγής. Τέτοιου είδους έλαστρα είναι τα λεγόμενα τύπου Tandem που παρουσιάζουμε στην πορεία της πτυχιακής. Αυτή η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη των μέσων παραγωγής, που συνοδεύεται με την παραγωγή νέων ελασμάτων υψηλής αντοχής, έχει καταστήσει την έλαση σε σημαντικότερο παράγοντα της σύγχρονης ζωής, καθώς τα προϊόντα που παράγοντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών από τα οικιακά είδη (τηγάνια, μέρη ηλεκτρικής κουζίνας, μέρη τηλεοράσεων κτλ), μέχρι την αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροναυπηγική. Σύμφωνα με μελέτες της Ελληνικής Ένωσης Αλουμινίου (Ε.Ε.Α) το 75% του παγκόσμιου παραγόμενου αλουμινίου προορίζεται για να υποστεί κάποιου είδους έλαση, περίπου το 67% των βιομηχανικών προϊόντων που παράγονται στην Ε.Ε αποτελούνται από μέρη που έχουν υποστεί έλαση, ενώ το 80% των αντικειμένων που χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητα μας είναι προϊόντα έλασης. Συγκριτικό πλεονέκτημα της έλασης είναι η δυνατότητα παραγωγής προϊόντων υψηλής αντοχής και μικρού βάρους, πράγμα που καθιστά τα προϊόντα της ιδιαίτερα περιζήτητα στην παγκόσμια αγορά. Ως εκ τούτου, υπάρχουν πολλές βαριές βιομηχανίες που ασχολούνται αποκλειστικά με την παραγωγή και ανάπτυξη ελασμάτων, που λόγω της υψηλής ζήτησης στις περισσότερες περιπτώσεις εξάγουν τα προϊόντα τους σε

άλλες χώρες. Στη χώρα μας υπάρχουν αρκετές βιομηχανικές μονάδες που είναι στρατηγικά προσανατολισμένες στην παραγωγή ελασμάτων. Εξέχοντα ρόλο στην Ελληνική, αλλά και την Ευρωπαϊκή παραγωγή έχει η Ελληνική Βιομηχανία Αλουμινίου, του Ομίλου Βιοχάλκο, η οποία εκπροσωπεί διεθνώς την Ελλάδα στον κλάδο, με ετήσια δυναμικότητα πάνω από 250.000 τόνους.

Άλλες μικρότερες βιομηχανικές μονάδες είναι η ΑΤΕΜ στην Κρήτη και η Alumikom στην Μακεδονία με εξίσου σημαντική παραγωγή και εξαγωγές.

Στην πτυχιακή μας παρουσιάζουμε την υπολογιστική διαδικασία που απαιτείται για την επίτευξη της έλασης, καθώς επίσης και τον τεχνικό υπολογισμό της κατασκευής του ελάστρου. Ο τύπος του ελάστρου που επιλέξαμε είναι τα ελαστρα τύπου Tandem, γιατί θεωρούμε πως αποτελούν ενδιαφέρουσα περίπτωση που αξίζει να αναλυθεί και να διαδοθεί καθώς δεν υπάρχουν άλλες εργασίες που να συσχετίζονται με τον εν λόγω τύπο ελάστρου. Στην πτυχιακή θίγουμε ένα ευρύ φάσμα από ιστορικού και θεωρητικού ενδιαφέροντος, μέχρι θέματα που αφορούν τις κατεργασίες του αλουμινίου και την συντήρηση του ελάστρου. Για την κατανόηση της πτυχιακής απαιτούνται βασικές γνώσεις μηχανικής, στοιχείων μηχανών και φυσικής, καθώς, το υπολογιστικό μέρος της πτυχιακής είναι ιδιαίτερα εκτεταμένο και απαιτούνται μηχανολογικές γνώσεις προκειμένου κάποιος να μπορεί να παρακολουθήσει την διαδικασία. Τέλος να αναφέρουμε πως για την εκπόνηση της πτυχιακής, χρησιμοποιήθηκε ποικιλία εθνικής αλλά και διεθνούς βιβλιογραφίας, με σκοπό την κατά το δυνατόν πιο σφαιρική κατανόηση των ιδιοτήτων της έλασης, και την αποτύπωση της στην παρούσα πτυχιακή.

1.Αλουμίνιο

1.1 Ορισμός

Το αλουμίνιο(εικόνα 1) ή αλλιώς αργίλιο είναι ένα χημικό στοιχείο, το οποίο βρίσκεται στην τρίτη θέση του περιοδικό πίνακα, μετά το οξυγόνο, και το συναντάμε στο υπέδαφος της Γής.

Το αλουμίνιο αποτελεί περίπου το 8% του βάρους του πλανήτη μας , προέρχεται από μίγματα ορυκτού βωξίτη και βρίσκεται στο φυσικό περιβάλλον ως προέλευση ορυκτών των ρουμπινιών, των ζαφειριών, του κορουνδίου και της αργίλου. Το αργίλιο σαν μέταλλο είναι το πιο δημοφιλέστερο και το πιο χρησιμοποιούμενο μετά τον χάλυβα, ωστόσο το αλουμίνιο δεν είναι διαθέσιμο ως παράγωγο χημικών ενώσεων όπως ο σίδηρος και ο χαλκός και για το λόγο αυτό η ανακάλυψή του καθυστέρησε, καθώς για την παραγωγή του ήταν απαραίτητη η ανακάλυψη του ηλεκτρισμού και μετέπειτα η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης.



Εικόνα 1.1: Ρολά αλουμινίου

Πηγή :www.mikrometoxos.gr

1.2 Ιδιότητες

Οι ιδιότητες του αλουμινίου που το καθιστούν σημαντικό στον βιομηχανικό κόσμο είναι το χαμηλό ειδικό βάρος του, η υψηλή του αντοχή σε διαβρώσεις και στις μηχανικές κατεργασίες. Επίσης, το καθαρό αργίλιο είναι εξαιρετικά μαλακό και όλκιμο μέταλλο πράγμα που βοηθάει στην εύκολη βιομηχανική επεξεργασία του. Επιπλέον, το αλουμίνιο είναι από τα μοναδικά μέταλλα, που μπορεί να αναμιχτεί εύκολα με άλλα μέταλλα, όπως σίδηρο, χαλκό και άλλα μέταλλα με αποτέλεσμα την δημιουργία κραμάτων με συνδυαστικές και ενισχυμένες ιδιότητες, για την χρήση στην βιομηχανία και όχι μόνο, καθώς προκύπτουν παράγωγα μέταλλα με σημαντικά βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και μηχανικές αντοχές που τα κάνουν ανθεκτικά σε καταπονήσεις αυξάνοντας την διάρκεια ζωής.

Συνοπτικά το αλουμίνιο έχει τις εξής ιδιότητες :

- Χαμηλό ειδικό βάρος περίπου το 1/3 του σιδήρου
- Έχει χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας από το σίδηρο, πράγμα που σημαίνει ότι διαμορφώνεται, ελάσσεται, εξελλάσσεται, διελάσσεται, συγκολλείται και είναι το ιδανικότερο μέταλλο κατασκευής. Σε μία κατασκευή από αλουμίνιο παρουσιάζεται 3 φορές μεγαλύτερη επιμήκυνση από ότι σε μία σιδερένια κατασκευή.
- Το αλουμίνιο καθώς και τα περισσότερα κράματα του είναι ανθεκτικά στις περισσότερες μορφές διαβρώσεων, λόγω της μεγάλης σημαντικής σύνδεσης τους με το οξυγόνο.
- Δεν είναι τοξικό.
- Δεν καίγεται και δεν μαγνητίζεται.
- Έχει υψηλή ανακλαστικότητα και θερμική αγωγιμότητα.

1.2.1 Φυσικές Ιδιότητες

Το αλουμίνιο μπορεί να αναγνωριστεί εύκολα λόγω της απόχρωσής του, η οποία χαρακτηρίζεται ως ασημί ή ανοιχτό γκρι ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειάς του. Επιπλέον, το αλουμίνιο ανήκει στη κατηγορία των μη εύφλεκτων μετάλλων και δεν μαγνητίζεται εύκολα.

Μία άλλη φυσική ιδιότητα του είναι η ικανότητα ανάκλασης του ορατού φωτός και της υπέρυθρης ακτινοβολίας σε ποσοστά 92% και 98% αντίστοιχα, για αυτό το λόγο είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο υλικό για την κατασκευή κελυφών ηλιακών θερμοσιφώνων, καθώς είναι και ένα σχετικά φθινό μέταλλο σε σχέση με τον κοινό σίδηρο. Το αλουμίνιο έχει μέτρο ελαστικότητας 7-11 MPa, ενώ σε πολλά παράγωγα κράματα του το μέτρο ελαστικότητας είναι της τάξεως των 200-600 MPa ανάλογα με το ποσοστό προσθήκης αλουμίνιου και των άλλων μετάλλων. Επίσης, το αλουμίνιο έχει πολύ μικρή πυκνότητα σε σχέση με το κοινό χάλυβα καθώς αυτός έχει τριπλάσια πυκνότητα από ότι το αλουμίνιο, έτσι οι μηχανικές κατεργασίες, η διέλαση και η χύτευση είναι ακόμα πιο εύκολες στο αλουμίνιο από ότι στο χάλυβα λόγω αυτής της μεγάλης διαφοράς τους στην πυκνότητα. Τέλος, το αλουμίνιο συγκριτικά με το χαλκό έχει καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, περίπου το 60% από αυτή που έχει ο χαλκός, καθώς αυτό έχει το 30% της πυκνότητας του χαλκού.

1.2.2 Χημικές Ιδιότητες

Στο αλουμίνιο βρίσκεται μία λεπτή στρώση οξειδίου του αργιλίου, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή αντίσταση σε διαβρώσεις σε συνάρτηση με το χρόνο, καθώς αυτό εμποδίζει την οξείδωση του μετάλλου. Το παραπάνω στρώμα εμφανίζεται όταν το συγκεκριμένο μέταλλο εκτεθεί για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα στον καθαρό αέρα. Αυτή η ιδιότητα δεν ισχύει για όλα τα κράματα και τα παράγωγα του αλουμινίου, καθώς τα κράματα που προκύπτουν με γαλβανικές αντιδράσεις, με αυτά του χαλκού, παρουσιάζουν περιορισμένα οξείδια αργιλίου και μετέπειτα μειωμένη αντοχή σε διαβρώσεις. Επίσης, αυτή η αντίσταση στη διάβρωση μειώνεται σημαντικά λόγω της αντίδρασης του αργιλίου με τα διαλύματα των αλάτων στην επιφάνεια του και λόγω της ύπαρξης μετάλλων με ανόμοιες ιδιότητες από το αλουμίνιο. Επιπλέον, το αλουμίνιο αντιδρά με το νερό σε όξινα διαλύματα, σε θερμοκρασίες κάτω των 280°C, με αποτέλεσμα την

δημιουργία υδρογόνου το οποίο καταλαμβάνει σημαντικό ρόλο στη διάβρωση του αλουμινίου, όπως τα χλωριούχα διαλύματα. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι το αλουμίνιο είναι ένα μέταλλο το οποίο μπορεί να διατηρήσει την απόχρωση του όταν μετατραπεί σε ρινίσματα.

Η αντίδραση του αργιλίου με το νερό είναι :



1.3 Ιστορική Αναδρομή Προέλευσης

Το αλουμίνιο πρωτοεμφανίστηκε και άρχισε να χρησιμοποιείται από τους αρχαίους Έλληνες και Ρωμαίους, καθώς αυτοί εκμεταλλεύτηκαν τη κρυσταλλική του δομή, έτσι ώστε να κατασκευάσουν προϊόντα κεραμικής, μάλιστα από εκεί το αλουμίνιο ονομάστηκε στυπτηρία, η οποία είναι μία χημική ένωση μεταξύ αργιλίου, καλίου και διπλού θεικού άλατος. Την ονομασία αργίλιο την απέκτησε από την ελληνική λέξη άργιλος που σημαίνει πηλός, ενώ τον συμβολισμό Al τον πήρε από την λατινική λέξη *aluminium*. Στην συνέχεια, την χρήση του αργιλίου στα προϊόντα κεραμικής την υιοθέτησαν οι Αιγύπτιοι και οι Βαβυλώνιοι. Στον σύγχρονο κόσμο, το 1761, ο Giton Nte Morvo ονόμασε ως αλουμίνα τα οξείδια του αργιλίου.

Έπειτα, το 1808 ο Βρετανός Σερ Humphry Davy θα δώσει την ονομασία αλούμιο, και στη συνέχεια αλουμίνιο, τα οξείδια της αλουμίνας. Η ανακάλυψη αυτού του μετάλλου εξελίχθηκε τόσο γρήγορα για τον λόγο ότι αυτό το μέταλλο είναι από τα λίγα στοιχεία στη φύση που βρίσκονται σε αφθονία.

Το 1825, ένας Δανός επιστήμονας και συγκεκριμένα ο Hans Christian Oersted, χημικός και φυσικός, ο οποίος φημίζεται για την ανακάλυψη της σχέσεως μεταξύ ηλεκτρισμού και μαγνητισμού, κατάφερε να διακρίνει και να απομονώσει το αλουμίνιο από τα υπόλοιπα στοιχεία και να αρχίσει την μετέπειτα παραγωγή του χρησιμοποιώντας την μέθοδο με την οποία κατεργάστηκε το άνυδρο χλωριούχο αργίλιο με αμάλγαμα καλίου, η οποία μέθοδος αναλύθηκε, βελτιώθηκε και παρουσιάστηκε στη συνέχεια το 1827 από τα Γερμανό χημικό Fredrich Wöhler. Η ανακάλυψη του αλουμινίου,

ως μέταλλο έγινε από τον Pier Wereth, ο οποίος διαπίστωσε ότι το αλουμίνιο εμπεριέχεται στα κοιτάσματα του βωξίτη.

Το έτος 1854 ανακαλύφθηκε η πρώτη μέθοδος παραγωγής αλουμινίου, από τον γάλλο χημικό Henri St-Claire Deville, και είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η αξία του αργιλίου ήταν υψηλότερη κατά ένα μεγάλο ποσοστό από την τιμή του χρυσού καθώς τα πρώτα προϊόντα παραγωγής ήταν οικιακά σκεύη, κυρίως πιάτα και μαχαιροπίρουνα, τα οποία χρησιμοποιούνταν από πρόσωπα της υψηλής κοινωνίας της τότε εποχής.

Το 1865 ο Ιούλιος Βερν προκάλεσε ένα τεράστιο κύμα αντιδράσεων, καθώς προσπάθησε να προβλέψει ένα σημαντικό γεγονός, την κατάκτηση της σελήνης, έχοντας ως κύριο και σημαντικότερο υλικό για την κατασκευή διαστημόπλοιου, διαστημικών στολών αλλά και καυσίμων, το «μαγικό μέταλλο», το αργίλιο, όπως αναφέρει στο βιβλίο του με τίτλο « Από την Γη στη Σελήνη». Πράγματι, μπορούμε να ομολογήσουμε ότι αυτή του η πρόβλεψη ήταν αληθής, καθώς το αλουμίνιο όχι μόνο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή στολών και διαστημοπλοίων αλλά έχει καταλάβει και ένα μεγάλο μέρος της καθημερινότητας μας, όπως αεροπλάνα, συσκευασίες προϊόντων, αυτοκίνητα, κτίρια, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που έχουμε προαναφέρει στις ιδιότητες του.

Το 1886 δύο σπουδαίοι επιστήμονες, ο Γάλλος Paul Louis Heroult και ο Αμερικάνος Charles Martin Hall κατάφεραν να «εκπληρώσουν το όνειρο», όπως το θεωρούσαν τότε και ανακάλυψαν την επαναστατική μέθοδο παραγωγής αλουμινίου μέσω της ηλεκτρόλυσης διαλύματος της αλουμίνας. Έτσι αυτή η μέθοδος ηλεκτρόλυσης πήρε την ονομασία “μέθοδος Hall-Heroult”.

Το 1888 άρχισαν να κατασκευάζονται οι πρώτες μεγάλες εταιρίες παραγωγής αλουμινίου στην Γαλλία, στην Αμερική και στην Ελβετία, μέχρι το 1889, όπου ανακαλύφθηκε η μέθοδος παραγωγής αλουμίνας από κοιτάσματα βωξίτη από τον Αυστριακό Friedrich Bayer και έτσι ξεκίνησε η μαζική παραγωγή με αυτή τη μέθοδο από το 1900.

1.4 Μέθοδοι Παραγωγής: Πρωτογενές και Δευτερογενές Αλουμίνιο

1.4.1 Επεξεργασία Βωξίτη

Ο βωξίτης είναι ένα μέταλλο το οποίο βρίσκεται στα ανώτερα στρώματα του εδάφους της Γής. Το 70% έως και το 80% της παραγωγής του βωξίτη, παγκοσμίως, μετατρέπεται σε αλουμίνια και στη συνέχεια με τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης, «διαδικασία Hall-Heroult», έχουμε την παραγωγή του αλουμινίου. Ανάλογα με τα πετρώματα του βωξίτη διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες: μεταλλουργικά, τσιμέντα, χημικά, λείανση και πυρίμαχα.

Ο βωξίτης θερμαίνεται μαζί με ένα διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου, σε δοχείο υπό πίεση στους 150 °C έως 200 °C, με αποτέλεσμα να παράγονται ενώσεις αλουμινίου ως βοημίτης « AlOOH » και ως γυψίτης « Al(OH)_3 ».

Μετά τον διαχωρισμό του διαλύματος, ο γυψίτης καθιζάνει στον πάτο του δοχείου, όταν το υγρό έχει ήδη αρχίσει να ψύχεται και στη συνέχεια διοχετεύουμε λεπτόκοκκο υδροξείδιο του αργιλίου. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα την μετατροπή του γυψίτη σε οξειδία του αργιλίου Al_2O_3 σε θερμοκρασία 1000 °C μέσα σε περιστρεφόμενους κλιβάνους.

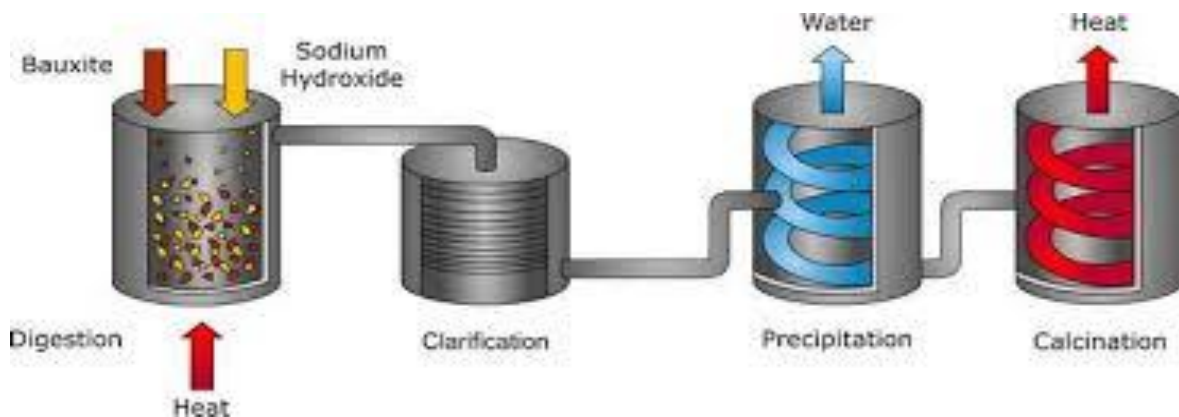
Αυτή η διαδικασία όπως προαναφέραμε ανακαλύφθηκε το 1886. Μέχρι τότε η παραγωγή του αλουμινίου γινόταν με τη θέρμανση του βωξίτη μαζί με νάτριο ή κάλιο σε συνθήκες κενού.

Όμως αυτή η μέθοδος ήταν περίπλοκη και για την παραγωγή καταναλώνοντουσαν πολλά υλικά και χρόνος, καθώς και το κόστος ήταν υψηλό για την εκτέλεση της όλης διαδικασίας.

1.4.2 Διαδικασία παραγωγής Bayer

Η μέθοδος Bayer είναι το βασικότερο μέσο που χρησιμοποιείται στον σύγχρονο βιομηχανικό κόσμο για τον διαχωρισμό του βωξίτη, ώστε να παράγουμε την αλουμίνια. Ο βωξίτης είναι το σημαντικότερο από τα μεταλλεύματα αλουμινίου περιέχοντας αλουμίνιο σε ποσοστό 30-54%, ενώ το

υπόλοιπο ποσοστό είναι ένα μίγμα διοξειδίου του πυριτίου και διαφόρων οξειδίων του σιδήρου και του τιτανίου. Η διαδικασία Bayer απαιτεί εγκαταστάσεις, που αποτελούνται από 5 διαφορετικά στάδια (εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2: Στάδια διαδικασίας Bayer

Πηγή : www.worldofchemicals.com

Τα παραπάνω προαναφερθέντα στάδια είναι τα εξής :

1. Η προετοιμασία του βωξίτη
2. Η κοσκίνηση
3. Ο καθαρισμός
4. Η καθίζηση του υδροξειδίου του αλουμινίου
5. Η ασβεστοποίηση

1.4.2.1 Προετοιμασία του βωξίτη

Οι διαδικασίες εξόρυξης του μεταλλεύματος εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την κατάσταση που βρίσκεται ο βωξίτης στη φύση. Με την έννοια ότι το μέταλλευμα θα πρέπει να είναι ομοιόμορφο, αλλιώς θα εμπεριέχονται μεγάλες ποσότητες καολίνης, ή θα είναι δύσκολη η επεξεργασία του λόγω των μεγάλων ποσοτήτων περιεκτικότητας σε υγρασία. Για τους λόγους αυτούς πρώτα χρησιμοποιούνται η διαδικασίες ανάμιξης ,φυσικός εμπλουτισμός και ξήρανση του μεταλλεύματος έτσι ώστε να αποφύγουμε τα παραπάνω προβλήματα. Η

διαδικασία της προετοιμασίας γίνεται με μία μορφή άλεσης που παράγει ως πρώτη ύλη κόκκους, ώστε να υλοποιηθεί εύκολα η διαδικασία παραγωγής αλουμίνας και είναι αρκετά χονδρόκοκκοι έτσι ώστε να αποφευχθούν τα προβλήματα κατά τη διαδικασία της κοσκίνησης.

1.4.2.2 Διαδικασία πέψης

Η διαδικασία αυτή έχει ως στόχο την διάλυση και τον διαχωρισμό του διαθέσιμου ορυκτού αλουμινίου από τα ορυκτά του βωξίτη. Εκτελείται σε χαλύβδινα ή σε σωληνοειδή αντιδραστήρια, όπου το διαχωρισμένο πλέον αλουμίνιο αντιδρά με καυστική σόδα με σκοπό να δημιουργηθεί διαλυτό αργλικό νάτριο. Επιπλέον, κατά την εκτέλεση αυτής της διαδικασίας έχουμε την αποπυριτίωση και την καθίζηση των αντιδρώντων στον πυθμένα των χαλύβδινων δοχείων.

Τέλος, το διοξείδιο του πυριτίου, αντιδρά με το παραπάνω διάλυμα και σχηματίζει διαλυτό πυριτικό νάτριο, το οποίο με τη σειρά του μετατρέπεται σε αδιάλυτο πυριτικό αργίλιο σε θερμοκρασία χωνευτήρα.

1.4.2.3 Διαδικασία καθαρισμού

Στη διαδικασία του καθαρισμού διαχωρίζονται τα στερεά υπολείμματα του βωξίτη από τα υγρά του αντιδραστήρα σε θερμοκρασίες βρασμού. Έπειτα, τα στερεά υπολείμματα, όπως η άμμος, απομακρύνονται με ειδικές μηχανικές διαδικασίες απομάκρυνσης άμμου στην οποία εκτελείται και η διαδικασία της πλύσης του ιζήματος. Επίσης, σε άλλους διαχωριστήρες, μονάδες καθίζησης και διήθησης, διαχωρίζονται τα οξείδια του σιδήρου και το διοξείδιο του πυριτίου, τα οποία καταλήγουν σε δοχεία, όπου επεξεργάζονται και γίνονται διαθέσιμα.

1.4.2.4 Η καθίζηση του υδροξειδίου του αλουμινίου

Η καθίζηση είναι η σημαντικότερη διαδικασία που εκτελείται σε αυτή τη μέθοδο, καθώς γίνεται η απόκτηση του $\text{Al}(\text{OH})_3$, από τα υγρά της διαδικασίας, με ελεγχόμενες διαδικασίες ποιότητας και ποσότητας. Σε αυτή τη διαδικασία ποσότητες γυψίτη διοχετεύονται στο διάλυμα συνεχώς με σκοπό να αρχίσει η καθίζηση. Υπάρχουν, δύο ειδών διαδικασίες καθίζησης, συνεχής ή κατά μέρη. Στις σύγχρονες βιομηχανίες χρησιμοποιείται η συνεχής μέθοδος. Τέλος, μετά την λήξη της καθίζησης γίνεται ο διαχωρισμός του $\text{Al}(\text{OH})_3$ σε λεπτό, το οποίο ανακυκλώνεται, και σε χοντρό το οποίο αποτελεί το επιθυμητό προϊόν.

1.4.2.5 Διαδικασία Ασβεστοποίησης

Η ασβεστοποίηση ή αλλιώς θερμική διάσπαση είναι το τελικό στάδιο της διαδικασίας Bayer. Σε αυτό το στάδιο, αρχίζει η παραγωγή της αλουμίνας σε κυκλικούς περιστροφικούς κλιβάνους. Πριν αρχίσει αυτή η διαδικασία προηγείται πλύση του ιζήματος, σε δεξαμενές με φίλτρα κενού, με σκοπό την απομάκρυνση της άμμου που έχει παραμείνει. Έπειτα, ξεκινά η διαδικασία της ασβεστοποίησης, όπου το τρι-υδροξείδιο αλλάζει καταστάσεις στη κρυσταλλική δομή του, με αποτέλεσμα να παραχθεί μία λευκή σκόνη η οποία είναι το τελικό προϊόν της διαδικασίας Bayer.

1.4.2.6 Επιπτώσεις της διαδικασίας Bayer

Κατά τη διαδικασία αυτή, έχουμε την παραγωγή της ερυθράς ιλύος, η οποία είναι ένα διάλυμα με μεγάλη ιοντική ισχύ και $\text{Ph}:12$. Σε αυτό το διάλυμα εμπεριέχονται ενώσεις νατρίου, πυριτίου και αργιλίου.

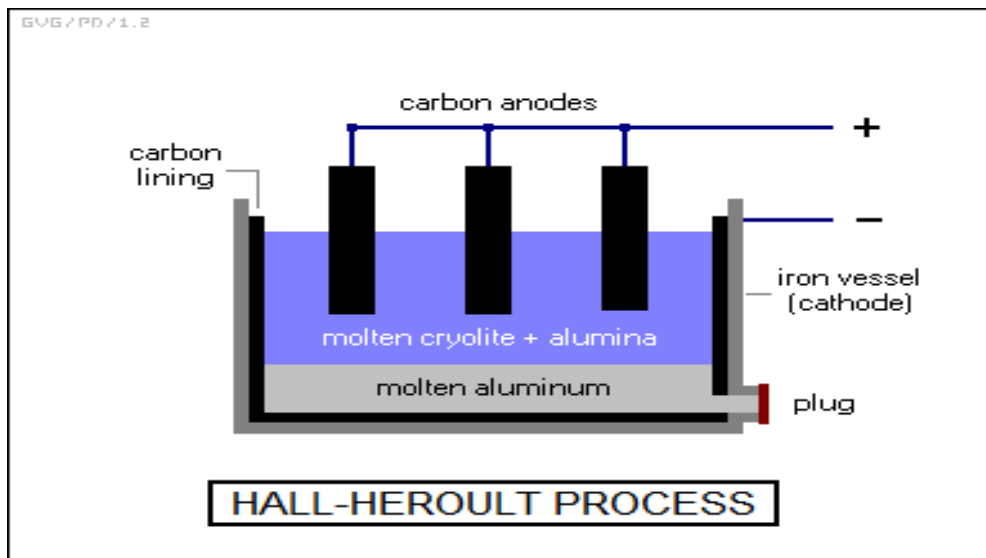
Η ερυθρά ιλύς απομακρύνεται ή στη θάλασσα ή στη στεριά ανάλογα με την ποσότητα, καθώς αν διοχετευτούν μεγάλες ποσότητες στη θάλασσα υπάρχει περιβαλλοντικός κίνδυνος. Έτσι, για να αποφύγουμε τον κίνδυνο χρησιμοποιούμε φιλτροπρέσες, έτσι ώστε να διαχωριστεί το νερό από την λάσπη για να επακολουθήσει η υγειονομική ταφή της.

1.4.3 Μέθοδος HALL-HEROULT

Η διαδικασία Hall-Heroult (εικόνα 1.3), είναι η σημαντικότερη και η βάση των κατεργασιών για την παραγωγή του πρωτογενούς αλουμινίου. Σε αυτή τη διαδικασία η αλουμίνα βυθίζεται και διασπάται σε βιομηχανικό λουτρό, μέσα σε μεγάλα χαλύβδινα δοχεία, ειδικά κατασκευασμένα για αυτές τις περιπτώσεις. Το ηλεκτρολυτικό λουτρό περιέχει λιωμένο κρυόλιθο (Na_3AlF_6).

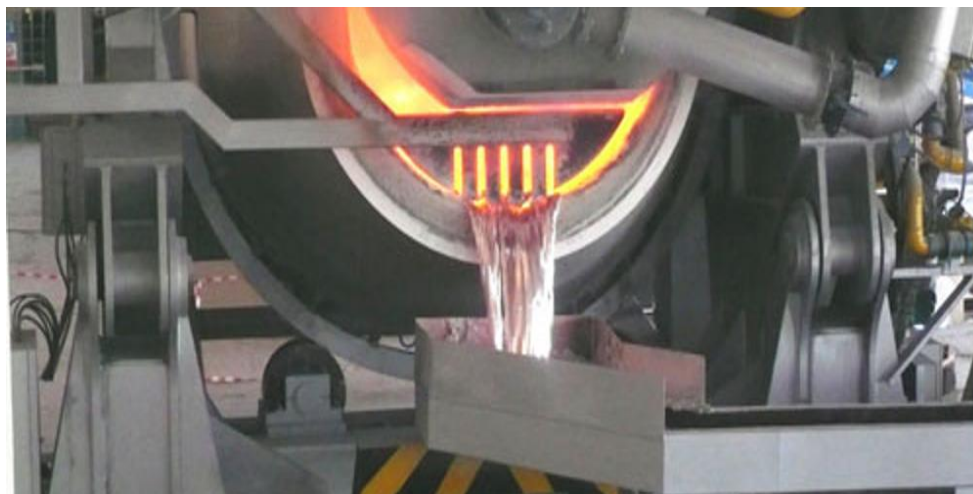
Το ηλεκτρικό ρεύμα εισέρχεται διαμέσου μίας ανόδου, κατασκευασμένη από άνθρακα, πετρέλαιο και πίσσα, και μίας καθόδου κατασκευασμένη από επένδυση γραφίτη μεγάλου πάχους.

Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαδικασίας αυτής, απελευθερώνεται CO_2 , καθώς υπάρχει κατανάλωση της ανόδου, αυτό γίνεται γιατί η ένταση του ρεύματος είναι μεγάλη περίπου 200.000 A και φθάνει μέγιστη μέχρι 500.000 A για το σύνολο της παραγωγής, ενώ η τάση είναι σχετικά μικρή. Έπειτα, το αλουμίνιο λειώνει και στη συνέχεια καθιζάνει στον πυθμένα του δοχείου και συλλέγεται σε συχνά χρονικά διαστήματα και μεταφέρεται σε τεράστιους κλιβάνους όπου καθαρίζεται και συγκρατείται. Στη συνέχεια, ακολουθεί η χύτευση του αλουμινίου, σε πολλά ημι-προϊόντα. Τα τυπικά χυτήρια αλουμινίου (Σχήμα 3), αποτελούνται από πολλά δοχεία, συγκεκριμένα ένα χυτήριο περιέχει 350 περίπου δοχεία και παράγει 300.000 τόνους ετησίως αλουμίνιο.



Εικόνα1.3: Μέθοδος Hall-Heroult

Πηγή: <http://www.viral.site/Hall Heroult Process>



Εικόνα 1.4: Χυτήρια αλουμινίου

Πηγή: <http://www.atemkramataalouminiou.gr/atem/>

1.4.4 Πρωτογενές Αλουμίνιο

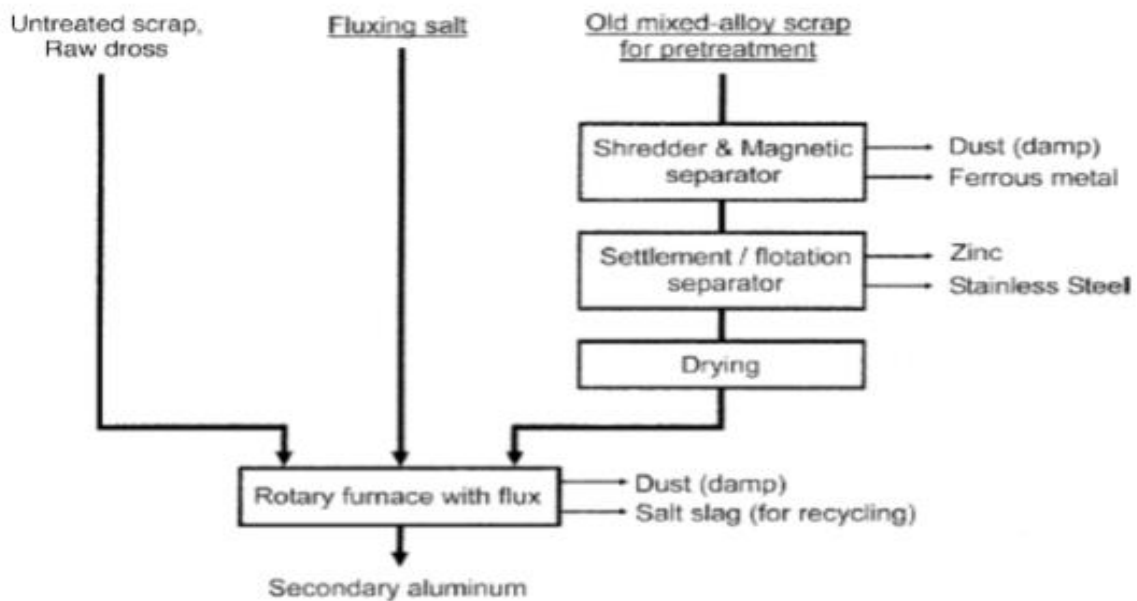
Το πρωτογενές αλουμίνιο, παράγεται από μεταλλουργικές βιομηχανίες και έχει καθαρότητα 99,8%, σε αντίθεση με το δευτερογενές ή το ανακυκλωμένο που έχει μικρότερο ποσοστό καθαρότητας λόγω των προσμίξεων και της επαναχρησιμοποίησης του. Στο σύγχρονο βιομηχανικό κόσμο, οι κυριότερες προσμίξεις που χρησιμοποιούνται είναι ο σίδηρος, το πυρίτιο, το μαγγάνιο, ο ψευδάργυρος, το μαγνήσιο και το τιτάνιο. Στη διαδικασία παραγωγής και επεξεργασίας του πρωτογενούς αλουμινίου το χλώριο, σε μορφή αερίου, διαπερνά το λιωμένο αλουμίνιο με σκοπό να απομακρυνθούν τα υπολείμματα του νατρίου, του σιδήρου και των υπόλοιπων μετάλλων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποκτηθεί αυτό το μεγάλο ποσοστό καθαρότητας από το αλουμίνιο. Επίσης, κατά τη διαδικασία αυτή, που ονομάζεται φιλτράρισμα, αφαιρούνται και διάφορα αιωρούμενα, όπως τα οξείδια, που προκαλούν κυρίως επιφανειακές μικρο-ανωμαλίες. Έπειτα, ακολουθεί η διαδικασία της απα-έρωσης, κατά την οποία αφαιρείται το υδρογόνο με τη χρήση αζώτου και αργόν. Επιπλέον, μετά το καθάρισμα του αλουμινίου, γίνονται προσμίξεις τιτανίου και άλλων μετάλλων με σκοπό να διατηρηθεί η αγωγιμότητα του σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο για να είναι διαθέσιμο για ηλεκτρική χρήση. Τέλος, ανάλογα με την χρήση του αλουμινίου έχουμε δύο ειδών αλουμίνια το καθαρό με ποσοστό καθαρότητας που φθάνει το 99% και το αλουμίνιο υψηλής καθαρότητας το οποίο ξεπερνά το 99,8%.

1.4.5 Δευτερογενές Αλουμίνιο

Ένα τυπικό εξάρτημα κατασκευασμένο από αλουμίνιο, όπως είναι τα κουτιά, τα φύλλα, οι πλάκες, τα προϊόντα χύτευσης, μπορούν να ξανα-επεξεργαστούν και να διαμορφωθούν με σκοπό να δημιουργηθούν νέα ή παρόμοια προϊόντα χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες κατεργασίες διαμόρφωσης.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε, ότι κατά την διαδικασία επεξεργασίας του αλουμινίου υπάρχει απώλεια υλικού λόγω της οξείδωσης της επιφάνειας. Το δευτερογενές αλουμίνιο έχει εξελιχτεί, λόγω του οικονομικού οφέλους από την ανακύκλωση των προϊόντων και τις διάφορες τεχνικές, όπως είναι οι τύπου scrap (εικόνα 1.5). Η επεξεργασία αυτή αυξήθηκε το 1950 όταν το αλουμίνιο είχε ήδη αρχίσει να χρησιμοποιείται για γενικές χρήσεις πέρα από τις στρατιωτικές. Σήμερα, το δευτερογενές αλουμίνιο που προκύπτει από τα ανακυκλωμένα

προϊόντα καλύπτει περίπου το 40% της συνολικής ευρωπαϊκής αγοράς, και οι βιομηχανίες που το παράγουν χρησιμοποιούν σύγχρονα μηχανήματα περισυλλογής scrap.



Εικόνα 1.5: Μεθοδολογία-προετοιμασία scrap δευτερογενούς αλουμινίου.
Πηγή : <http://www.venturemetalsinc.com/scrap-metal-recycling-process/>

1.5 Μεταλλεύματα, Παράγωγα και Κράματα

1.5.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

1.5.1.1 ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (WROUGHT ALLOYS)

Τα κράματα διαμόρφωσης, είναι τα κράματα τα οποία προκύπτουν από τις διαδικασίες διαμόρφωσης των υλικών.

Το σύστημα σχεδιασμού και ονοματολογίας των κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου περιέχει τέσσερα ψηφία, όπου το πρώτο ψηφίο δείχνει τα κύρια κραματικά στοιχεία, το δεύτερο ψηφίο δείχνει τις ποικίλες μορφές του αρχικού κράματος και το τρίτο και το τέταρτο ψηφίο τις διαφορετικές μορφές του κάθε κράματος.

1***	Καθαρό Al (Al>99,00%)
2***	Κράματα Al-Cu
3***	Κράματα Al-Mn
4***	Κράματα Al-Si
5***	Κράματα Al-Mg
6***	Κράματα Al-Mg-Si
7***	Κράματα Al-Zn
8***	Κράματα Al με άλλα στοιχεία
9***	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

Όπου Al : αλουμίνιο , Cu : Χαλκός , Mn : Μαγγάνιο , Si : Πυρίτιο , Mg : Μαγνήσιο , Zn: Ψευδάργυρος

1.5.1.2 ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ (CASTING ALLOYS)

Με την χύτευση των μετάλλων προκύπτουν τα παρακάτω υλικά σε υψηλές θερμοκρασίες.

Το σύστημα σχεδιασμού και ονοματολογίας των κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία, όπου το πρώτο ψηφίο δείχνει κύρια κραματικά στοιχεία, το δεύτερο και το τρίτο τις διαφορετικές μορφές του κράματος και το τέταρτο αν είναι χυτό (casting) ή χελώνα (ingot).

1**,* Καθαρό Al (Al>99,00%)
2**,* Κράματα Al-Cu
3**,* Κράματα Al-Si+ Cu και Mg
4**,* ΚράματαAl-Si
5**,* ΚράματαAl-Mg
6**,* Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

7**,* Κράματα Al - Zn
8**,* Κράματα Al - Sn με άλλα στοιχεία
9**,* Κράματα Al -με άλλα στοιχεία

Όπου Al : αλουμίνιο , Cu : Χαλκός , Mn : Μαγγάνιο , Si : Πυρίτιο , Mg : Μαγνήσιο , Zn: Ψευδάργυρος

1.5.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

F– Όπως παράγεται (χωρίς θερμική).

O –Με ανόπτηση.

H-Ψυξηλατημένο (Σκληρυμένο)

W- Με θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης

T- Με θερμική κατεργασία διαφορετική από τις προηγούμενες.

Συνήθως με σκλήρυνση μετά από υπερβαφή και κατακρήμνιση.

Προσθήκη αριθμού δείχνει διάφορες μορφές πχ T6 θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και σκλήρυνσης με τεχνητή γήρανση.

1.5.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

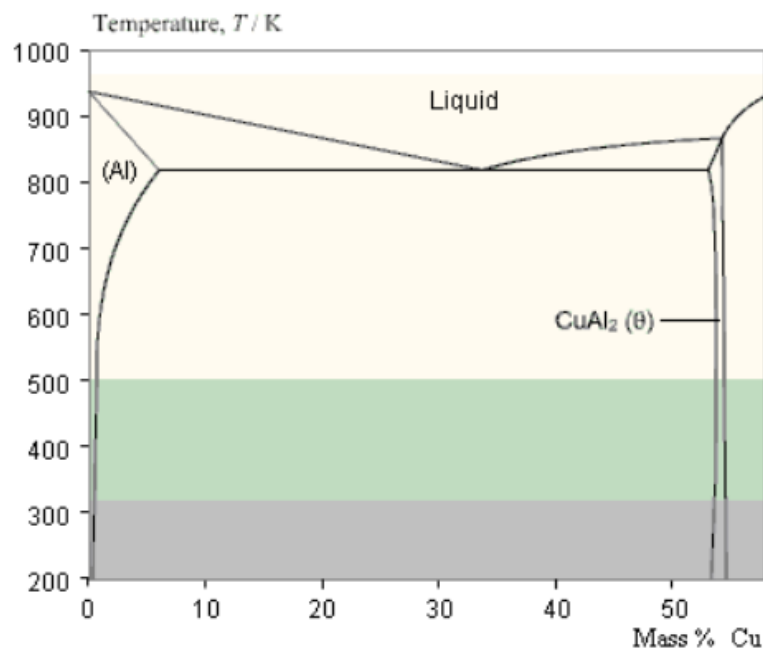
Το αλουμίνιο είναι σχετικά μη ανθεκτικό αλλά πολύ όλκιμο μέταλλο. Το μέτρο ελαστικότητας του είναι το ένα τρίτο του χάλυβα, κάτι που στην ουσία σημαίνει ότι το αλουμίνιο παραμορφώνεται ελαστικά τρεις φορές περισσότερο από τον χάλυβα, υπό την ίδια φόρτιση. Αυτή η ιδιότητα δεν μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την κραμάτωση.

Επίσης, το αλουμίνιο και τα κράματα του κρατούν την ολκιμότητα τους και δεν γίνονται ψαθυρά, ακόμη και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, κάτι που δεν συμβαίνει στο χάλυβα και στο τιτάνιο. Στα περισσότερα μέταλλα ενισχύεται με ψυξηλασία. Ακόμη περισσότερο δε ενισχύεται με κραμάτωση με διάφορα στοιχεία.

Το καθαρό αλουμίνιο χρησιμοποιείται για ηλεκτρικούς αγωγούς, χημικό εξοπλισμό και ως φύλλο με διάφορες εφαρμογές. Οι κυριότερες προσθήκες στο αλουμίνιο είναι ο χαλκός, το μαγγάνιο, το πυρίτιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος ενώ και άλλα στοιχεία προστίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες για πολύ ειδικούς σκοπούς (εκλέπτυνση κόκκου, μετασχηματισμό).

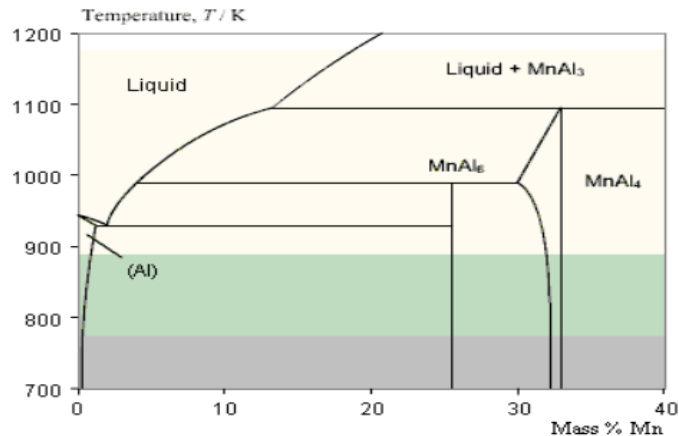
Στη συνέχεια δίνονται τα διμερή διαγράμματα φάσεων. Από όλα τα κύρια κραματικά στοιχεία, μόνο ο ψευδάργυρος έχει σημαντική διαλυτότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και μάλιστα λίγες μονάδες. Έτσι κάτω από συνθήκες ισορροπίας οι περισσότερες κραματικές προσθήκες βρίσκονται διασπασμένες στη μήτρα του αλουμινίου και το ενισχύουν με διασπορά. Πάντως, δεν επιδέχονται όλα τα κράματα θερμική κατεργασία και απαιτείται περαιτέρω ενίσχυση με ψυχρηλασία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επιδράσεις των κραματικών προσθηκών του αλουμινίου, αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι σπάνια τα κράματα είναι διμερή και συνήθως μικρές ποσότητες από άλλα στοιχεία προστίθενται για να του δώσουν ειδικές ιδιότητες.

Ο χαλκός είναι ένα από τα πιο σπουδαία στοιχεία για το αλουμίνιο. Έχει σημαντική διαλυτότητα και ενισχύει σημαντικά το αλουμίνιο με θερμική κατεργασία κατακρήμνισης και γήρανσης. Πολλά κράματα περιέχουν χαλκό είτε σαν κύριο κραματικό στοιχείο, ή μεταξύ των κυρίων κραματικών στοιχείων σε περιεκτικότητες από το 1% έως το 10%.



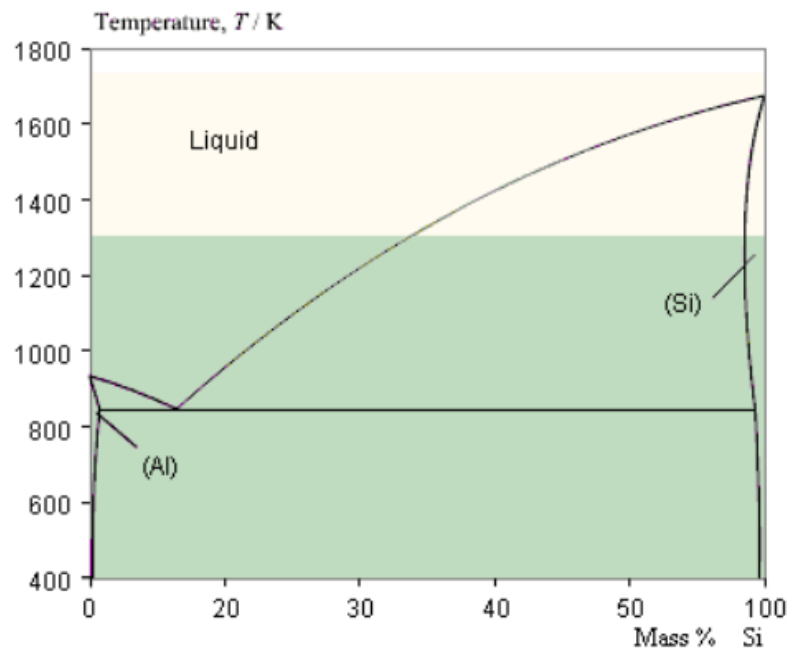
Διάγραμμα 1.1 : Περιεκτικότητα σε χαλκό

Το μαγγάνιο έχει περιορισμένη διαλυτότητα στο στερεό διάλυμα του αλουμινίου, αλλά σε περιεκτικότητες περίπου 1% σχηματίζει μια σειρά από κατεργάσιμα κράματα που δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Προστίθεται ευρέως σαν συμπληρωματικό στοιχείο σε κράματα (επιδεκτικά ή μη θερμικής κατεργασίας) και προσδίδει σημαντική ενίσχυση.



Διάγραμμα 1.2 : Περιεκτικότητα σε μαγγάνιο

Το πυρίτιο μειώνει το σημείο τήξης και αυξάνει την ρευστότητα του Αλουμινίου. Επίσης, αυξάνει σε μέτριο βαθμό την αντοχή του.



Διάγραμμα 1.3: Περιεκτικότητα σε πυρίτιο

1.6 Ανακύκλωση

Η ανακύκλωση του αλουμινίου (εικόνα 1.6), είναι η βασικότερη πηγή προέλευσης του δευτερογενούς αλουμινίου. Στις βιομηχανίες χρησιμοποιούνται τα δευτερογενή χυτήρια για τον εφοδιασμό του αλουμινίου στις εγκαταστάσεις die casting , και αφορά συγκεκριμένα μεταλλεύματα και κράματα αλουμινίου, τα οποία προέρχονται από τα απορρίμματα και από τις ακαθαρσίες.

Υπάρχουν συγκεκριμένες διεργασίες, με τις οποίες λαμβάνουμε του δευτερογενές αλουμίνιο και αυτές είναι :

- a. Απορρίμματα που δημιουργούνται κατά την παραγωγή του πρωτογενούς αλουμινίου.
- b. Πολλές ακαθαρσίες που έχουν δημιουργηθεί από προϊόντα τα οποία έχουν εξαντλήσει τη διάρκεια ζωής τους. Με αυτόν τον τρόπο παράγονται τα περισσότερα δευτερόχυτα προϊόντα.
- c. Ο τρίτος και τελευταίος τρόπος λήψης του δευτερογενούς αλουμινίου είναι από τις ακαθαρσίες που έχουν δημιουργηθεί από τον καθαρισμό των κλιβάνων που αποτελούνται από οξείδια και μέταλλα.



Εικόνα 1.6 : Ανακυκλώσιμο αλουμίνιο

Πηγή : <http://www.dedisa.gr/>

Τα δευτερόχυτα προϊόντα τεμαχίζονται σε μικρά τεμάχια, με σκοπό να καθαριστούν εύκολα και να διαχωριστούν από τα υπολείμματα και τις ακαθαρσίες που έχουν παραμείνει στο μέταλλο, με τη βοήθεια διαχωριστήρων και με θρυμματιστές. Τα απορρίμματα, αυτά είναι δύσκολα στη διάσπαση, καθώς αυτά είναι αναμειγμένα με διάφορα μέταλλα και προσμίξεις. Έτσι, αναπτύχθηκε η μεθοδολογία scrap, που εφαρμόζεται σε συγκεκριμένα κράματα με σκοπό να ανακυκλωθούν και να μετατραπούν σε ωφέλιμα προϊόντα. Για το λόγο αυτό έχουν δημιουργηθεί εξειδικευμένες εγκαταστάσεις, οι οποίες παραλαμβάνουν το ανακυκλώσιμο αλουμίνιο και το μορφοποιούν κατάλληλα προκειμένου να οδηγηθεί στα χυτήρια. Καθώς, η μέθοδος ανακύκλωσης scrap έχει τεράστια ζήτηση, έχουν ενσωματώσει τις εγκαταστάσεις αυτές στις βιομηχανίες, για την παραγωγή δευτερογενών προϊόντων με πλέον αυτοματοποιημένες τεχνικές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Κατεργασίες Αλουμινίου

2.1 Μηχανικές Κατεργασίες

Σημαντικές τομές στον τομέα της μεταλλουργίας και των διαδικασιών μορφοποίησης των μετάλλων, έγιναν κατά την διάρκεια του 18^ο με 19^ο αιώνα (κυρίως στην Αγγλία), καθώς τότε ξεκίνησαν να δημιουργούνται ευρέως και με επιστημονική ακρίβεια οι μηχανικές κατεργασίες. Οι τεχνολογικές προκλήσεις της εποχής (κυρίως στον τομέα της βιομηχανίας), οδήγησαν στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των μηχανικών διαμορφώσεων, που είχε ως αποτέλεσμα την παράλληλη ανάπτυξη της επιστήμης των υλικών. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ανακάλυψη νέων κραμάτων με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, με συνέπεια να δημιουργηθεί η ανάγκη για νέες τεχνικές και νέες μεθόδους διαμόρφωσης.



Εικόνα 2.1: Κατεργασία αλουμινίου

(Πηγή: www.michanourgiki-kozani.gr)

Στις μηχανικές κατεργασίες υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες διαμορφώσεων:

- Κατεργασίες με αφαίρεση υλικού (κατεργασίες κοπής)
- Κατεργασίες χωρίς αφαίρεση υλικού (κατεργασίες διαμόρφωσης, επιφανειακές κατεργασίες).

Στις κατεργασίες κοπής περιλαμβάνονται κατεργασίες που γίνονται με τις εργαλειομηχανές, δηλαδή τορνίρισμα, πλάνισμα, διάτμηση, λείανση, φρεζάρισμα, πριόνισμα, ψαλίδισμα κτλ.

Οι κατεργασίες διαμόρφωσης αναφέρονται στις κατεργασίες που γίνονται με πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν: σφυρηλάτηση, εξέλαση, διέλαση, συρματοποίηση, διαμόρφωση εφελκυσμού, διαμόρφωση κάμψης, διαδικασία κοίλανσης κτλ.

Στην παρούσα πτυχιακή θα ασχοληθούμε εκτενέστερα με τις κατεργασίες διαμόρφωσης και κυρίως με την έλαση.

2.1.1 Έλαση

Έλαση (rolling) ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία το τεμάχιο, το οποίο βρίσκεται σε μορφή ράβδου ή πλάκας, υφίσταται πλαστική παραμόρφωση λόγω πίεσης καθώς διέρχεται ανάμεσα από δύο αντίθετα περιστρεφόμενα ράουλα. Σαν τεχνική είχε αναπτυχθεί ήδη από τον 16^ο αιώνα, και τα ελάσματα χρησιμοποιούνταν κυρίως για πανοπλίες και κράνη.

Στην εποχή μας τα προϊόντα της έλασης αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής ζωής με ένα εύρος εφαρμογών από την αεροναυπηγική μέχρι και τα μαγειρικά είδη.



Εικόνα 2.2: Τελικό προϊόν διαδικασίας έλασης

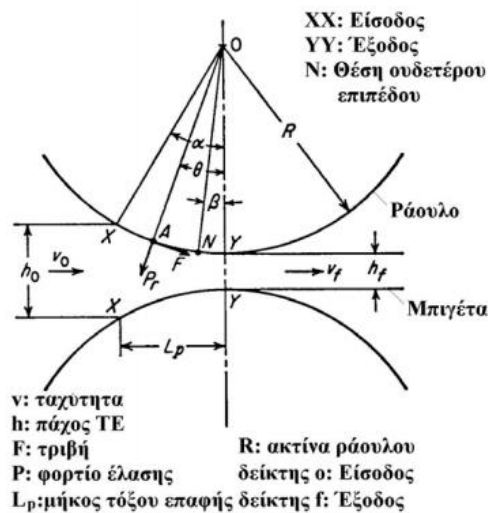
(Πηγή: www.aluminium.org.gr)

Χαρακτηριστικό της παραγωγικής διαδικασίας είναι ο μεγάλος όγκος παραγωγής που σε συνδυασμό με τη ευκολία στο πακετάρισμα του τελικού προϊόντος, καθιστά την έλαση έναν από τους βασικότερους τομείς της βιομηχανίας.

Οι ιδιότητες του τελικού προϊόντος οφείλονται στα προπαρασκευαστικά στάδια του κράματος, στην χύτευση, στο ξεκαλούπωμα, στην προθέρμανση (για θερμή έλαση), καθώς επίσης και σε μεταγενέστερα στάδια όπως η θερμική επεξεργασία, η ανόπτηση, η προένταση, η κοπή, το φινίρισμα κτλ.

Το εισερχόμενο τεμάχιο, το οποίο όπως προαναφέρθηκε είναι υπό την μορφή πλάκας ή μπιγέτας (ράβδου), έχει συνήθως πάχος μεγαλύτερο από 200 mm και πάντοτε πριν εισέλθει στο έλαστρο έχει προηγουμένως υποστεί πριόνισμα στα άκρα του. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την διαδικασία της δημιουργίας του τεμαχίου, τα άκρα του έχουν ξένες προσμίξεις (κυρίως γραφίτη) που βοηθούν στο ξεκαλούπωμα του, με αποτέλεσμα να έχουν μεγαλύτερη σκληρότητα και να πρέπει να αφαιρεθούν ώστε να μην δημιουργηθεί πρόβλημα στο τεμάχιο αλλά ακόμα και στην ίδια την εργαλειομηχανή. Το πριόνισμα εξασφαλίζει την μεταλλουργική ομογένεια του τεμαχίου, προωθώντας παράλληλα την ομαλή κύλιση του ανάμεσα στα ράουλα με αποτέλεσμα να διασφαλίζεται η υψηλή επιφανειακή ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Κατά την διαδικασία της έλασης, τα ράουλα ασκούν δυνάμεις στο τεμάχιο (τόξο επαφής), ως αποτέλεσμα δημιουργούνται εντός του ορθές θλιπτικές (κατά την διεύθυνση της διακέντρου των ραούλων) και εφελκύστηκες (παράλληλες ως προς την εφαπτομένη των ραούλων) τάσεις, οι οποίες έχουν ως συνέπεια την μείωση της διατομής και την αύξηση του μήκους του.



Σχ. 1 Σχηματική παράσταση έλασης

Εικόνα 2.3 Ανάλυση παραμέτρων έλασης

(Πηγή: www.mech.ntua.gr)

Η έλαση, ανάλογα με την μορφή του αρχικού τεμαχίου διακρίνεται σε:

- (i) Έλαση μπιγέτας, όπου, εκτός του πάχους και του μήκους, σημειώνεται μεταβολή και στο πλάτος του προϊόντος που παράγεται, γνωστό και ως πλευρική διόγκωση (spreading).
- (ii) Έλαση πλάκας, κατά την οποία δεν παρατηρείται μεταβολή στο πλάτος του παραγόμενου προϊόντος, παρά μόνο στο πάχος και το μήκος.

Η έλαση, ως διαδικασία μπορεί να διακριθεί σε ψυχρή και σε θερμή έλαση από τις οποίες το τελικό προϊόν που προκύπτει είναι φύλλα αλουμινίου τα οποία χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών όπως ναυπηγική, αεροναυπηγική, κατασκευές, μεταφορές, συσκευασίες, ΑΠΕ κ,α

2.1.1.1 Θερμή Έλαση

Το αρχικό προϊόν είναι μια ορθογωνική πλάκα το πάχος της οποίας κυμαίνεται μεταξύ 200 ÷ 600 mm mm με βάρος από 500 έως 10000 kg (www.alunet.gr), και πριν εισέλθει στο έλαστρο έχει υποστεί πριόνισμα στις πλευρές ώστε να απομακρυνθεί η ανεπιθύμητη δομή που υπάρχει στα άκρα λόγω της χύτευσης. Η πλάκα αυτή, πριν εισέλθει στο έλαστρο, προθερμαίνεται σε θερμοκρασία 450 °C έως 560°C ανάλογα με την κραματοποίηση.

Το τελικό προϊόν της θερμής έλασης είναι είτε μεγάλες πλάκες, είτε φύλλα με πάχος που μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 3-5 mm τυλιγμένα σε ρολά (μπομπίνες)

2.1.1.2 Ψυχρά Έλαση

Το αρχικό προϊόν είναι επίσης μια ορθογωνική πλάκα με πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 200 ÷ 450 mm στην οποία έχουν πριονιστεί οι πλευρές για τον ίδιο λόγο ως προηγουμένως. Όπως προκύπτει και από την ονομασία της κατεργασίας, η θερμοκρασία στην οποία εκτελείται αυτή η κατεργασία είναι χαμηλότερη απ' αυτή της θερμής έλασης και εξαρτάται από το κράμα του αλουμινίου. Η πλάκα εισέρχεται σε μια διάταξη ακολουθίας πολλαπλών ελάστρων και σταδιακά, σε κάθε πέρασμα, το πάχος της μειώνεται. Είναι πολύ πιθανό, επειδή η σκληρότητα του αλουμινίου σε κάθε πέρασμα μεγαλώνει, να αυξηθεί η θερμοκρασία ώστε να μαλακώσει και η κατεργασία να συνεχιστεί χωρίς κίνδυνο αστοχίας είτε του τεμαχίου, είτε της μηχανής. Το τελικό προϊόν που προκύπτει είναι λεπτά φύλλα

με πάχος που κυμαίνεται από 0,003 mm (για καθαρό αλουμίνιο) έως και 0,05 mm, τα οποία μεταφέρονται είτε ευθύγραμμα, είτε σε δίσκους με προιονισμένα, ψαλιδισμένα άκρα.

Με την διαδικασία της έλασης τα τελικά προϊόντα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Από την διαδικασία της έλασης μπιγέτας προκύπτουν επιμήκη προϊόντα όπως ήλοι με σπείρωμα, δακτύλιοι με ειδικές μεθόδους έλασης κτλ.
- Από την έλαση πλακών προκύπτουν πλατιά τεμάχια, τα οποία διακρίνονται με βάση το πάχος και το πλάτος τους σε:
 - Ελάσματα (plates), με πάχος μεγαλύτερο από 6 mm
 - Λεπτά ελάσματα (sheets), με πάχος μικρότερο από 6 mm και πλάτος μεγαλύτερο από 600 mm, και
 - Λεπτές λωρίδες (strips), με πάχος μικρότερο από 6 mm και πλάτος μικρότερο από 600 mm,



Εικόνα 2.4: Φωτογραφία διαδικασίας έλασης πλάκας

(Πηγή: www.shutterstock.com)

2.1.1.3 Εργαλειομηχανή Έλασης

Η εργαλειομηχανή της έλασης ονομάζεται έλαστρο (mill). Τα κύρια μέρη του ελάστρου είναι τα ράουλα (rolls) τα οποία ονομάζονται ράουλα εργασίας, οι άξονες των οποίων περιστρέφονται με την βοήθεια ηλεκτροκινητήρων μέσα σε έδρανα ολίσθησης (bearings).

Οι άξονες είναι διαμορφωμένοι έτσι ώστε κάθε ένας απ' αυτούς να συνδέεται μέσω σταυροειδών συνδέσμων με την διάταξη μετάδοσης κίνησης, η οποία αποτελείται από το σύστημα του ηλεκτροκινητήρα και το κιβώτιο ταχυτήτων. Όπως προαναφέρθηκε, το τεμάχιο σύρεται μεταξύ των ραούλων και το πάχος του μειώνεται ανάλογα με το διάκενο των δύο ραούλων. Το διάκενο αυτό δεν είναι σταθερό, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με τον στόχο του τελικού πάχους που έχει τεθεί. Η μείωση του πάχους μπορεί να επιτευχθεί είτε με επαναλαμβανόμενα περάσματα του τεμαχίου μεταξύ των ραούλων καθώς μειώνεται το διάκενο μεταξύ τους (απλού τύπου έλαστρα), είτε περνώντας από μια σειρά ρολών με προοδευτικά μικρότερα κενά.

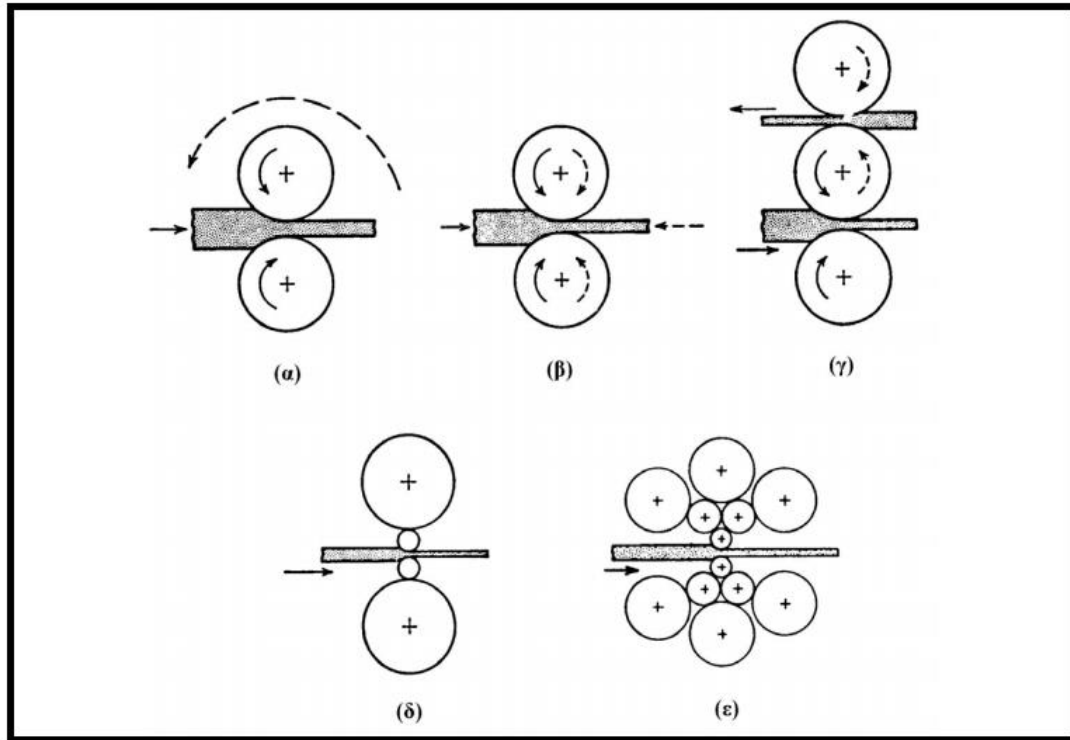
Βασικά μέρη Ελάστρου:

- *Πλαίσιο ελάστρου:* Είναι μια στιβαρή δομή στην οποία εμπεριέχονται όλα τα εξαρτήματα και αντέχει τα τεράστια φορτία που επιβάλλονται κατά την κύλιση.
- *Εφεδρικά ράουλα:* Η χρησιμότητά τους είναι η υποστήριξη των ραούλων εργασίας ώστε να αποφευχθεί η κάμψη και οι δονήσεις.
- *Κινητήρες:* Μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική ενέργεια στα ράουλα εργασίας και αναγκάζουν το τεμάχιο να περάσει από το διάκενο των ραούλων.
- *Μειωτήρες (Κιβώτιο Ταχυτήτων):* Μετατρέπουν την κίνηση περιστροφής του κινητήρα σε ταχύτητα κατάλληλης μορφής για τα ράουλα εργασίας.
- *Άξονες Οδήγησης (Σταυροί):* Μεταδίδουν την ταχύτητα περιστροφής απ' τον μειωτήρα στα ράουλα εργασίας.
- *Διάταξη κάμψης ραούλων:* Η χρησιμότητά τους είναι να προκαλούν ελαφρά και ελεγχόμενη κάμψη στα ράουλα εργασίας, ώστε να αντισταθμίζεται η θερμική διαστολή ή οποιαδήποτε άλλη παραμόρφωση, προκειμένου να εξασφαλίζεται η επιπεδότητα του τελικού προϊόντος.

- *Μηχανισμός ρύθμισης διάκενου*: Ρυθμίζει το διάκενο μεταξύ των ραούλων εργασίας με ακρίβεια και στη συνέχεια διατηρεί σταθερή την απόσταση έναντι της αντίστασης του τεμαχίου που υφίσταται την μείωση του πάχους.
- *Σύστημα ψύξης*: Διοχετεύει το ψυκτικό υγρό και το λιπαντικό στα ράουλα εργασίας και στα έδρανα ολίσθησης.

Υπάρχουν διαφόρων ειδών έλαστρα, τα οποία ανάλογα με την εργασία που εκτελούν και τα φορτία που θα δεχτούν κατασκευάζονται σε συγκεκριμένες διατάξεις. Οι διάφοροι τύποι ελάστρων φαίνονται στην εικόνα 2.5 και περιγράφονται παρακάτω:

- Έλαστρο δύο ραούλων (2-high mill): Πρόκειται για την πιο απλή περίπτωση ελάστρου (Εικόνα 2.5 α).
- Έλαστρο δύο ραούλων με αναστρεφόμενη κίνηση (2-high reversing mill): Η μείωση του πάχους επιτυγχάνεται με επαναλαμβανόμενα περάσματα του τεμαχίου (Εικόνα 2.5. β).
- Έλαστρο τριών ραούλων (3-high mill): Το άνω και κάτω ράουλο περιστρέφονται με κινητήρες, ενώ το μεσαίο περιστρέφεται λόγω επαφής με το τεμάχιο (Εικόνα 2.5. γ).
- Έλαστρο τεσσάρων ραούλων (4-high mill): Περιλαμβάνει διάταξη αντιστήριξης των ραούλων εργασίας, ώστε να αποφεύγεται η κάμψη ή οποιαδήποτε άλλη παραμόρφωση, ενώ παράλληλα προσφέρουν μικρότερο πάχος τελικού φύλλου σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας (Εικόνα 2.5. δ).
- Έλαστρο τύπου cluster (cluster mill): Τέτοιου τύπου έλαστρα χρησιμοποιούνται για παραγωγή αλουμινοχαρτού και αποτελείται από πολλά ράουλα αντιστήριξης. Η περιστρεφόμενη ενέργεια μεταδίδεται στο ράουλο εργασίας και από εκεί, μέσω μηχανισμών, στα υπόλοιπα ράουλα αντιστήριξης (Εικόνα 2.5. ε).



Εικόνα 2.5: Τύποι διαμόρφωσης ελάστρου

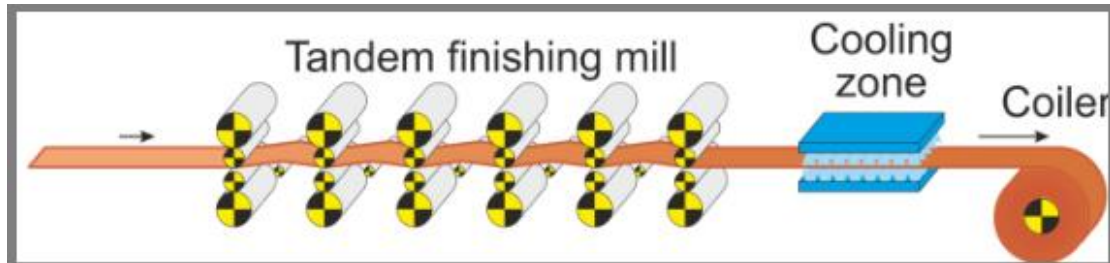
(Πηγή: www.mech.ntua.gr)

Ένας άλλος τύπος ελάστρου που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι η *Εν Σειρά Έλαση* (Tandem), κυρίως γιατί προσφέρει το συγκριτικό πλεονέκτημα της μαζικής παραγωγής προϊόντων σε λιγότερο χρόνο με λιγότερο κόστος. Το τεμάχιο διέρχεται από μια σειρά ελάστρων, των οποίων το διάκενο των ραούλων μειώνεται προοδευτικά, με αποτέλεσμα να προκαλείται μείωση του πάχους.



Εικόνα 2.6: Εργαλειομηχανή τύπου Tandem

(Πηγή: www.acin.tuwien.ac.at)



Εικόνα 2.7: Αναπαράσταση της Εν Σειρά Έλασης

(Πηγή: www.acin.tuwien.ac.at)

Η διάταξη αυτή μπορεί να αποτελείται από 4 έως 9 έλαστρα τα οποία τοποθετούνται σε σειρά, ώστε το τεμάχιο που εισέρχεται στην εργαλειομηχανή να υφίσταται σταδιακή μείωση του πάχους του, καθώς, κινείται από το ένα έλαστρο στο άλλο. Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ταχύτητα περιστροφής των ραούλων, καθώς θα πρέπει να επιτυγχάνεται συγχρονισμός των επιμέρους ραούλων προκειμένου η ταχύτητα εισόδου του τεμαχίου στην μια βαθμίδα να είναι ίδια με την ταχύτητα εξόδου από την προηγούμενη βαθμίδα, προκειμένου να μην δημιουργηθεί ολίσθηση του τεμαχίου στα ράουλα της εργαλειομηχανής. Αυτό, εκτός από την δημιουργία επιφανειακών ατελειών και την ποιοτική υποβάθμιση του τελικού προϊόντος, μπορεί να οδηγήσει σε μηχανική βλάβη της εργαλειομηχανής. Επίσης μεταξύ των ελάστρων απαιτείται συνεχής έλεγχος των τάσεων διότι οποιαδήποτε μεταβολή μπορεί να προκαλέσει ζημία στην μηχανή.

2.1.1.4 Προβλήματα στην Έλαση

Όπως σε όλες τις κατεργασίες διαμόρφωσης έτσι και στην έλαση είναι πιθανό να προκύψουν επιφανειακές ατέλειες κατά την επαφή του τεμαχίου με τους κυλίνδρους (ράουλα). Εξ αιτίας των υψηλών φορτίων που αναπτύσσονται, έχουμε ελαστική παραμόρφωση όχι μόνο των ραούλων αλλά και ολόκληρης της μηχανής με αποτέλεσμα το πάχος του τελικού φύλλου να είναι μεγαλύτερο από το διάκενο μεταξύ των ραούλων. Αυτό αντιμετωπίζεται εφόσον είναι γνωστή η σταθερά των κυλίνδρων. Είναι βασικό οι άξονες των ραούλων να είναι σε τέλεια

παραλληλία, ειδάλλως η μια άκρη του φύλλου θα έχει πιο λεπτό πάχος απ' την άλλη και αφού ο όγκος και το πλάτος παραμένουν σταθερά αυτή η άκρη επιμηκύνεται περισσότερο απ' την άλλη με αποτέλεσμα το φύλλο να κυρτώνει. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένας άλλος παράγοντας που χρήζει προσοχής ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα είναι η ταχύτητα, η οποία εάν δεν είναι σωστή μπορεί να προκαλέσει ολίσθηση στο τεμάχιο και να καταστρέψει την επιφάνεια του. Τέλος συχνό φαινόμενο είναι να προκαλούνται προβλήματα λόγω πλευρικής επέκτασης, η οποία μπορεί να προκαλέσει σημαντικές βλάβες στην εργαλειομηχανή.

2.1.1.5 Η έλαση στην Ελλάδα

Ο κλάδος της πρώτης μεταποίησης στην Ελλάδα (δηλαδή οι βιομηχανικές μονάδες χύτευσης, διέλασης, έλασης, και συρματοποίησης) έκαναν την εμφάνιση τους στα μέσα της δεκαετίας του 70' κυρίως στην Βιομηχανική Περιοχή των Οινόφυτων της Βοιωτίας. Σήμερα ο κλάδος έχει γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη με εγκατάσταση σημαντικών μονάδων σε όλη την επικράτεια της χώρας και αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τομείς της ελληνικής οικονομίας. Η συνολική παραγωγή προϊόντων έλασης στην Ελλάδα ξεπερνάει τους 350.000 τόνους ετησίως, και ο κύκλος εργασιών αγγίζει το 1 δις ευρώ ενώ οι άμεσες και έμμεσες θέσεις εργασίας -μόνο στο τομέα της έλασης- ξεπερνούν τις 15.000. Αξιοσημείωτη είναι η συνεισφορά της μεταποίησης στις εξαγωγές, καθώς το 90% των προϊόντων εξάγεται σε περισσότερες από 80 χώρες, καθιστώντας τον, τον δεύτερο πιο εξαγωγίμο κλάδο της ελληνικής οικονομίας (μετά τα πετρελαιοειδή) αντιπροσωπεύοντας το 5,6% των συνολικών εξαγωγών. Η αξία των εξαγωγών για το 2017 άγγιξε τα 1,61 δις ευρώ παρουσιάζοντας αύξηση περίπου 15% σε σχέση με το 2016, ενώ από άποψη ισοζυγίου εισαγωγών-εξαγωγών το 2017 ο κλάδος παρουσίασε θετικό ισοζύγιο της τάξης των 641 εκατ. ευρώ εξασφαλίζοντας την αυτάρκεια της χώρας σε ό,τι αφορά τα προϊόντα αλουμινίου (στοιχεία από Ελληνική Ένωση Αλουμινίου, www.aluminium.org.gr)

2.1.2 Διέλαση

Ως διέλαση ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία ένα τεμάχιο μετάλλου αναγκάζεται να περάσει μέσα από ένα κατάλληλα διαμορφωμένο άνοιγμα της μήτρας ένος καλουπιού μέσω συμπίεσης από έμβολο.



Εικόνα 2.8: Σωλήνες διέλασης
(Πηγή: www.bal-group.com)

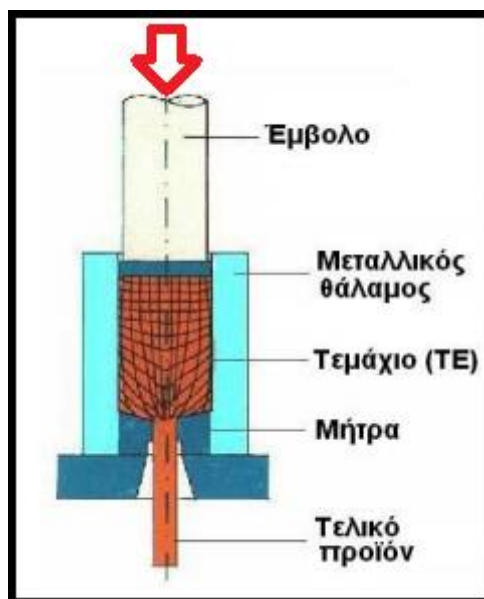
Η διεργασία αναπτύχθηκε παράλληλα με τις μηχανουργικές κατεργασίες τον 18^ο αιώνα, και εκτελείται είτε ως θερμή, είτε ως ψυχρά, ανάλογα από το κράμα του υλικού και την διατομή του τελικού προϊόντος. Η διατομή του τεμαχίου ποικίλλει ανάλογα με το σχήμα της μήτρας μέσα από την οποία εξωθείται το υλικό.

Η εργαλειομηχανή που χρησιμοποιείται για την διέλαση ονομάζεται πρέσα και ανάλογα με το είδος της διέλασης διακρίνεται σε *μηχανική* και *υδραυλική* πρέσα. Περιλαμβάνει τον μεταλικό θάλαμο, τη μήτρα, το έμβολο, και τον συμπληρωματικό εξοπλισμό.

2.1.2.1 Είδη Διέλασης

Υπάρχουν τέσσερις τύποι διέλασης: 1) Άμεση διέλαση, 2) Έμμεση διέλαση, 3) Υδροστατική διέλαση, 4) Κρουστική διέλαση,

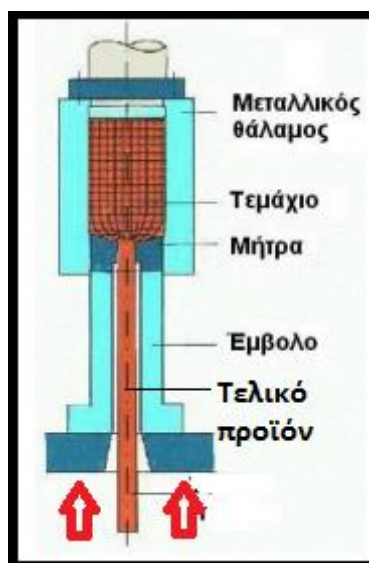
→ Άμεση διέλαση: Η φορά της δύναμης ταυτίζεται με την φορά της εξόδου (Εικόνα 2.9)



Εικόνα 2.9

(Πηγή: www.courseware.mech.ntua.gr)

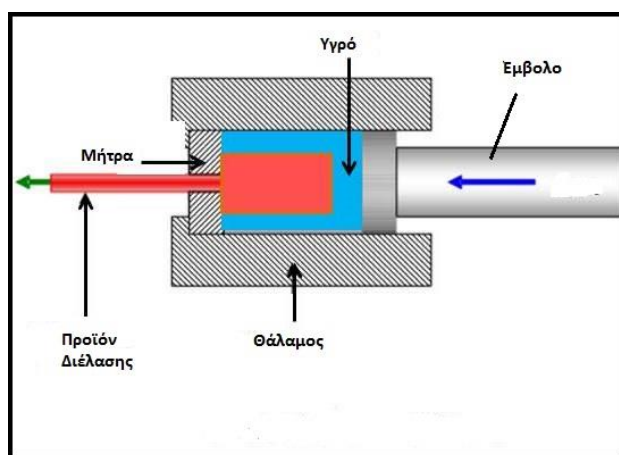
→ Έμμεση διέλαση: Η φορά της εξόδου είναι ανάποδη απ' την φορά της δύναμης (Εικόνα 2.10)



Εικόνα 2.10

(Πηγή: www.courseware.mech.ntua.gr)

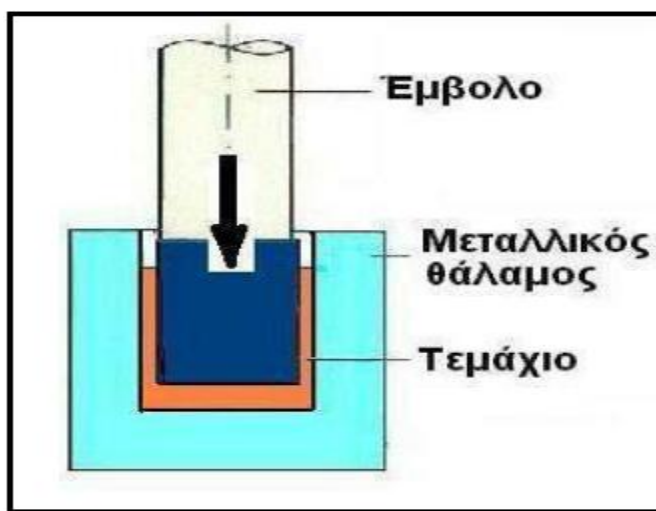
→ Υδροστατική διέλαση: Το έμβολο συμπιέζει το υγρό με το οποίο έχει γεμίσει ο θάλαμος προκαλώντας υδροστατική πίεση, η οποία μεταφέρεται στην μιγέτα, η οποία εξωθείται από το άνοιγμα της μήτρας. Ο θάλαμος γεμίζει με υγρό, το οποίο συμπιέζεται από το έμβολο και επιτυγχάνεται η διέλαση. (Εικόνα 2.11).



Εικόνα 2.11

(Πηγή: www.mech4study.com)

→ Κρουστική διέλαση: Η ταχύτητα του εμβόλου είναι πολύ υψηλή και η διαδικασία ολοκληρώνεται ακαριαία. (Εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.12

(Πηγή: www.courseware.mech.ntua.gr)

Στα πλεονεκτήματα της διέλασης κατατάσσεται η παραγωγή σωλήνων χωρίς ραφή, οι οποίες έχουν υψηλή αντοχή στην πίεση και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα εφαρμογών όπως η μεταφορά φυσικού αερίου. Ως εργαλειομηχανή για την επίτευξη της διέλασης χρησιμοποιούνται, πέρα από έμβολα και καλούπια, οι γραμμικές πρέσες, οι οποίες διακρίνονται σε οριζόντιες και κάθετες.

Οι ταχύτητες εμβόλου φθάνουν μέχρι 0,5 m/s. Οι μικρότερες ταχύτητες προτιμούνται για την κατεργασία μαλακών υλικών (Al, Mg, Cu), ενώ οι μεγαλύτερες τιμές για τα σκληρότερα υλικά (χάλυβες, πυρίμαχα κράματα).

2.1.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την διέλαση

Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι:

1) η κατάσταση καλουπιού, 2) η επιθυμητή διατομή, 3) η ποιοτική κατάσταση μπάρας, 4) η θερμοκρασία μπάρας, 5) η θερμοκρασία καλουπιού, 6) η σύνθεση κράματος της διέλασης, 7) η ποιοτική κατάσταση υποδοχέα, και 8) η κατάσταση δαχτυλιδίων καλουπιού. Η υψηλή θερμοκρασία δημιουργεί προβλήματα οξειδωσης του κατεργαζόμενου υλικού και του εργαλείου διέλασης, μειώνει την αντοχή των υλικών μήτρας, του θαλάμου και του εμβόλου, ενώ επίσης επηρεάζει το χρησιμοποιούμενο λιπαντικό. Η θερμοκρασία κατεργασίας πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή, η οποία θα εξασφαλίζει επαρκή πλαστικότητα στο υλικό και δεν θα προκαλεί θερμική συστολή. Παρατηρείται σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας στις σχετικά μεγάλες μειώσεις της διατομής (έργο παραμόρφωσης), οπότε στον υπολογισμό της βέλτιστης θερμοκρασίας θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αυτή η θερμοκρασιακή μεταβολή για να μην φθάσει το υλικό κοντά στο σημείο τήξης του ή στην περιοχή που συμβαίνει θερμική συστολή.

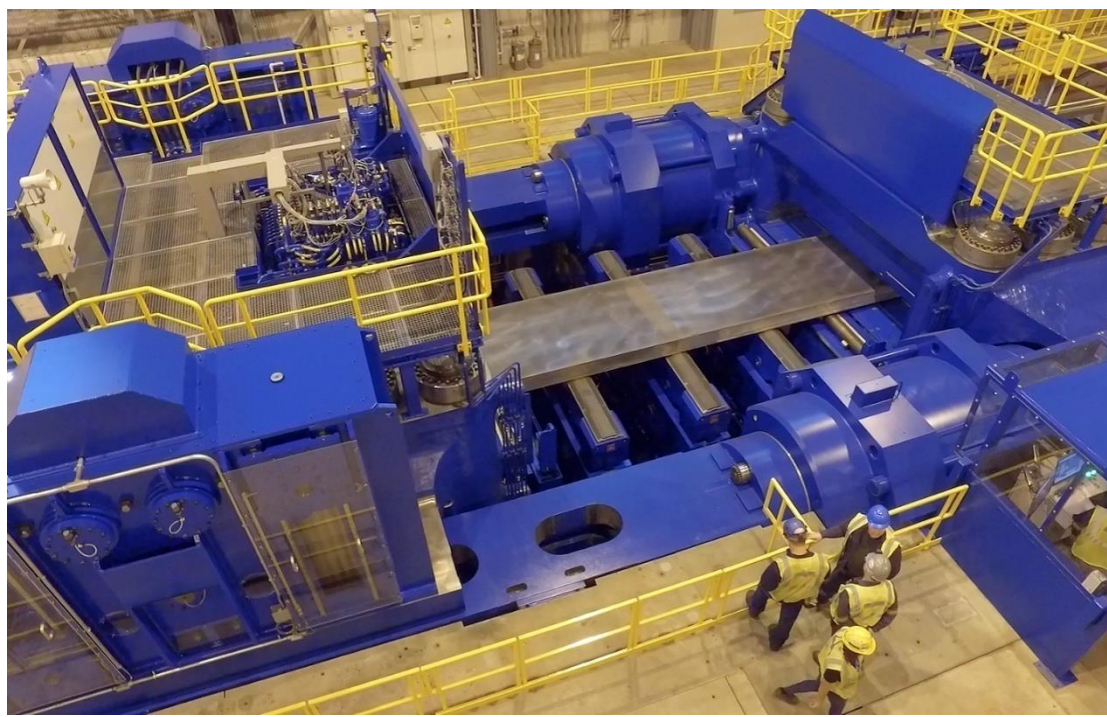
2.1.2.3 Η επίδραση της ταχύτητας στην διέλαση

Η αύξηση της ταχύτητας εμβόλου προκαλεί την αύξηση της πίεσης εμβόλου. Στις χαμηλές ταχύτητες παρατηρείται ταχύτερη απόψυξη της μπιγέτας. Η άμεση συνέπεια αυτού είναι η σκλήρυνση του υλικού και η βαθμιαία αύξηση του φορτίου διέλασης. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία της μπιγέτας, τόσο πιο έντονη είναι η επίδραση της χαμηλής ταχύτητας στην απόψυξη της.

Άρα, όπου απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες θα εφαρμόζονται σχετικά μεγάλες ταχύτητες εμβόλου. Στα μη σιδηρούχα μέταλλα συνήθως δεν χρησιμοποιείται λιπαντικό ή χρησιμοποιείται σπάνια γραφίτης.

2.1.3 Προένταση

Μια από τις σύγχρονες και πιο εξελιγμένες ψυχρές κατεργασίες είναι αυτή της προέντασης, η οποία είναι μια ιδιαίτερα επιτηδευμένη τεχνική που αναπτύχθηκε για την αεροδιαστημική βιομηχανία, χρησιμοποιείται όμως και σε μια πλειάδα άλλων τομέων κυρίως λόγω των παραγωγικών πλεονεκτημάτων της (απλοϊκή διάταξη μηχανής, ευχέρεια μαζικής παραγωγής, μικρό κόστος παραγωγής κτλ), καθώς επίσης και λόγω του ότι το τελικό προϊόν έχει εξαιρετική επιφάνεια.



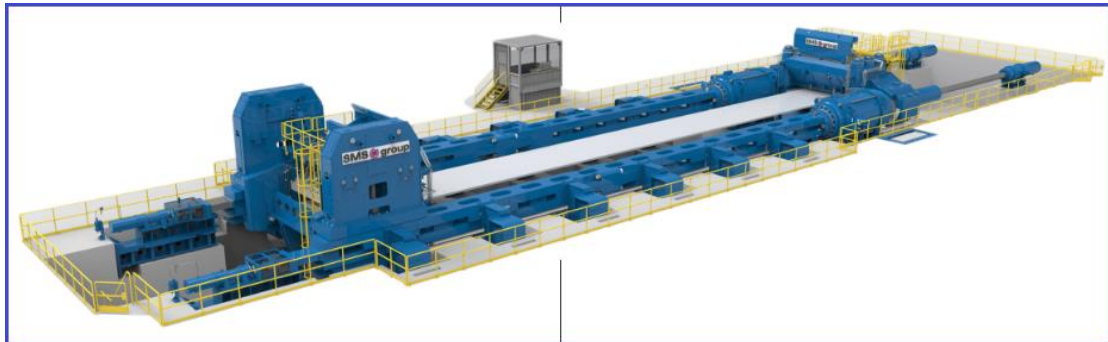
Εικόνα 2.13: Πλάκα αλουμινίου που υφίσταται προένταση
(Πηγή: www.lightmetalage.com)

2.1.3.1 Εργαλειομηχανή stretcher

Η εργαλειομηχανή που χρησιμοποιείται για την κατεργασία της προέντασης ονομάζεται stretcher (τεντωτής) και η κατασκευή του αποτελεί πρόκληση για την σύγχρονη μηχανική καθώς η ανακάλυψη νέων κραμάτων αλουμινίου υψηλής αντοχής, σε συνδυασμό με την απαίτηση για πλάκες μικρού πάχους καθιστά την επίτευξη του στόχου δύσκολη. Το φορτίο της τάσης συνήθως κυμαίνεται από 8 MN και μπορεί να φτάσει έως 156 MN ανάλογα με τον τύπο του κράματος, το επιθυμητό πάχος του τελικού προϊόντος καθώς και τον τύπο του μηχανήματος. Επειδή κατά την διαδικασία της προέντασης η σκληρότητα του τεμαχίου αυξάνεται, απαιτείται ανάλογη αύξηση του φορτίου ώστε να επιτευχθεί το αποτέλεσμα.

2.1.3.2 Προετοιμασία τεμαχίου για Προένταση

Η διαδικασία της έλασης πρέπει να είναι απόλυτα επιτυχής, δηλαδή η πλάκα να έχει σταθερό πάχος χωρίς επιφανειακές ατέλειες, ειδικά η τελική πλάκα δεν θα έχει σταθερή αντοχή και θα επηρεάζεται η ισοτροπία του υλικού.

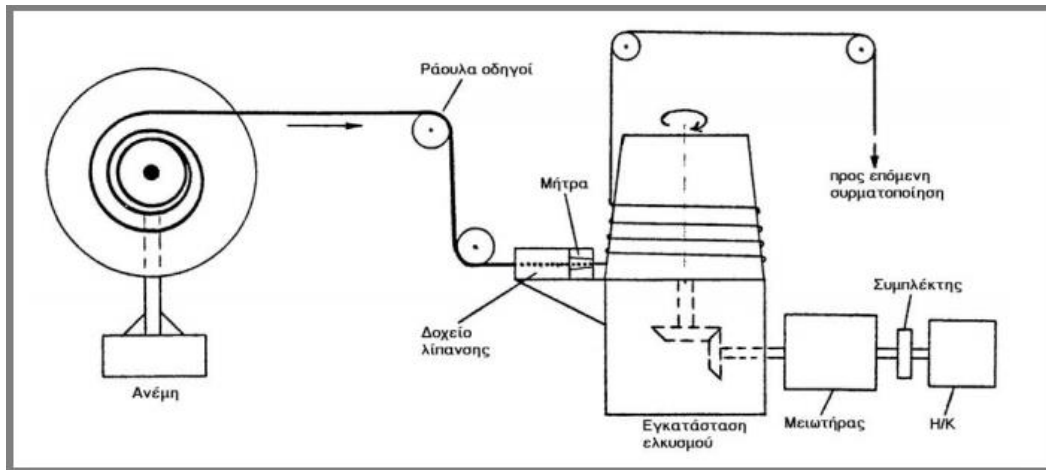


Εικόνα 2.14: Μηχανή τύπου Stretcher
(Πηγή: [www. sms-group.com](http://www.sms-group.com))

Συνήθως, η πλάκα που εισέρχεται στο stretcher για επεξεργασία έχει υποστεί ελαφρά ή σημαντική εξέλαση, προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Το πάχος της πλάκας συνήθως κυμαίνεται από 300 mm έως 750 mm ανάλογα με το επιθυμητό τελικό πάχος, το κράμα καθώς και την εφαρμογή του προϊόντος. Συχνά, πριν την έναρξη της διαδικασίας της προέντασης, το τεμάχιο προθερμαίνεται ελαφρώς προκειμένου η διαδικασία να ολοκληρωθεί ταχύτερα. Το προϊόντα που προορίζονται για αεροδιαστημικές εφαρμογές έχουν μικρότερο πάχος απ' αυτά που προορίζονται για ναυπηγική.

2.1.4 Συρματοποίηση

Ως συρματοποίηση ορίζεται η κατεργασία με την οποία παράγουμε σύρματα και καλώδια. Η διαδικασία επιτυγχάνεται μέσω της έλξης του μετάλλου, δηλαδή η δύναμη εφαρμόζεται στην έξοδο του καλωδίου.



Εικόνα 2.15: Διάταξη συρματοποίησης

(Πηγή: www.mie.uth.gr)

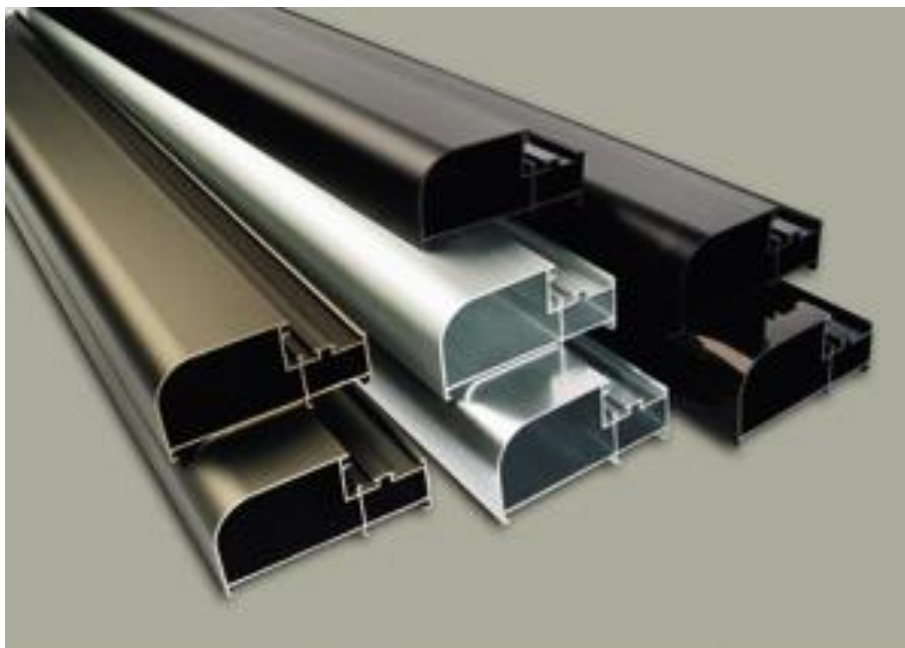
Μεταξύ ράβδου και σύρματος δεν υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος τρόπος διαχωρισμού, για αυτό ως κριτήριο λαμβάνεται η διάμετρος. Το προϊόν συρματοποίησης με διάμετρο κάτω των 5 cm θεωρείται σύρμα.

2.1.4.1 Διαδικασία και χαρακτηριστικά Συρματοποίησης

Η διαδικασία αρχίζει από μια ράβδο με υψηλή θερμοκρασία στην οποία είναι τυλιγμένη μια σπείρα. Η ράβδος αυτή αφού καθαριστεί σε βιομηχανικό λουτρό ώστε να απομακρυνθεί οποιαδήποτε ανεπιθύμητη κρούστα, προετοιμάζεται για λίπανση. Ως λιπαντικό συνήθως χρησιμοποιείται γυαλί, αλλά επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ο κασσίτερος, υλικά αλάτων και ο χαλκός. Στην συνέχεια διέρχεται από το καλούπι και επειδή σπάνια η διάμετρος μειώνεται κάτω από το 35% της αρχικής με το πρώτο πέρασμα απαιτούνται πολλά περάσματα. Για τέτοιου είδους συρματοποιήσεις έχουν μεγάλες ταχύτητες.

2.2 Επιφανειακές Κατεργασίες

Οι επιφανειακές κατεργασίες αναφέρονται στις κατεργασίες, που δεν υπάρχει αφαίρεση υλικού ή διαμόρφωση της γεωμετρίας. Χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες: *α)* στις κατεργασίες τροποποίησης της επιφάνειας, στις οποίες επιτυγχάνεται μεταβολή της κρυσταλλικής δομής ή και της χημικής σύστασης του υλικού, χωρίς την εναπόθεση επιπλέον υλικών στην επιφάνεια του, και *β)* στις κατεργασίες με απόθεση υλικού, στις οποίες ένα υλικό προστίθεται ή εναποτίθεται στην επιφάνεια ενός άλλου ή του ίδιου υλικού.



Εικόνα 2.16: Αλουμιένια κουφώματα

(Πηγή: www.viekal.gr)

Οι επιφανειακές κατεργασίες χρησιμοποιούνται για μια ποικιλία εφαρμογών όπως, η βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων, αισθητική αναμόρφωση, προστασία της επιφάνειας από το περιβάλλον, αναστολή της διάβρωσης κτλ. Σημαντική είναι η συνεισφορά των επιφανειακών κατεργασιών στην εξοικονόμηση ενέργειας όχι μόνο στα μεγάλα βιομηχανικά ή κρατικά κτήρια, αλλά ακόμα και σε κατοικίες, καθώς καθιστούν δυνατή την κατασκευή μεγάλων ανοιγμάτων στους τοίχους που επιτρέπουν την διείσδυση του ηλιακού φωτός, χωρίς να επηρεάζεται η στατικότητα του κτιρίου. Η εφαρμογή των κουφωμάτων αλουμινίου, εκτός ότι μειώνει την κατανάλωση ρεύματος επειδή το ηλιακό φως εισέρχεται και φωτίζει το εσωτερικό κτιρίου, μειώνει και την κατανάλωση πετρελαίου θέρμανσης καθώς του χειμερινούς μήνες μπορούμε να εκμεταλλευθούμε την ηλιακή ακτινοβολία με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Στους καλοκαιρινούς μήνες, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι ανεπιθύμητη, τα ανοίγματα μπορούν να καλυφθούν με τέντες και παράλληλα το κατεργασμένο αλουμίνιο να συμβάλει στην θερμική θωράκιση του κτηρίου λόγω της ειδικής βαφής τους που τους προσφέρει χαμηλή θερμική διαπερατότητα.

Η ανοδίωση, η ηλεκτροστατική βαφή και η συμπιχρωμία αποτελούν τις κυριότερες και πιο διαδεδομένες επιφανειακές κατεργασίες του αλουμινίου, ιδιαίτερα όταν αυτό χρησιμοποιείται σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές. Στο παρόν κεφάλαιο δεν θα αναφερθούμε διεξοδικά στην επιφανειακές κατεργασίες, απλά θα παρουσιάσουμε ενδεικτικά ορισμένες από αυτές.

2.2.1 Ανοδίωση

Η ανοδίωση ανήκει στις επιφανειακές κατεργασίες και αποτελεί μια μέθοδο προστασίας των μετάλλων από την οξείδωση, ενώ επίσης θεωρείται ο πλέον ενδεδειγμένος τρόπος για χρωματισμό αλουμινένιων εξαρτημάτων.

Το μέταλλο πριν ξεκινήσει η διαδικασία της ανοδίωσης, πρέπει να προετοιμαστεί για την διαδικασία. Η επιφάνεια του υφίσταται μηχανική ή χημική λείανση με κατάλληλα χημικά ή λειαντικά μέσα. Το επόμενο στάδιο είναι η εμβάπτιση του μετάλλου σε ένα ειδικό όξινο λουτρό, του οποίου η σύσταση εξαρτάται από την επιθυμητή εφαρμογή. Στην συνέχεια με την διέλευση του συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος (ηλεκτρόλυση) επιτυγχάνεται η προσβολή των μορίων της επιφάνειας, καθώς δημιουργείται ένα γυαλιστερό φιλμ προστασίας. Το ανοδικό επίστρωμα είναι διαφανές και η δομή του φέρει πόρους που επιτρέπουν την ενσωμάτωση διαφόρων χρωστικών υλών για την επίτευξη του χρωματισμού.

Στην χώρα μας, η μέθοδος αναπτύχθηκε για πρώτη φορά πριν από 60 χρόνια και σήμερα υπάρχουν πάνω από 7 μονάδες που ασχολούνται με την ανοδίωση με εγκατεστημένη δυναμικότητα 170.000 Ampere.

2.2.2 Ηλεκτροστατική Βαφή

Ηλεκτροστατική Βαφή ονομάζεται η μέθοδος κατά την οποία προστίθεται στην επιφάνεια του μετάλλου ένα στρώμα πολυεστερικής βαφής η οποία βρίσκεται σε μορφή πούδρας και επικαλύπτει πλήρως την επιφάνεια του.

Μετά το πέρας της βαφής του αντικειμένου, απαιτείται η εισαγωγή του στον φούρνο ώστε να επιτευχθεί ο πολυμερισμός του πολυεστέρα. Τα τελικά προϊόντα της ηλεκτροστατικής βαφής λόγω της καλαισθησίας τους και της υψηλής αντοχής σε περιβαλλοντικές συνθήκες, προορίζονται όχι μόνο για αρχιτεκτονικούς σκοπούς σε κτηριακές υποδομές, αλλά και ως μηχανικά μέρη εξαρτημάτων, ζάντες αυτοκινήτων, πλαίσια κτλ. Για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα θα πρέπει να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα.

- Η αρχική επεργασία του μετάλλου, η οποία αναφέρεται κυρίως στην προετοιμασία της επιφάνειας του τεμαχίου. Η διαδικασία αυτή συνίσταται στην μηχανική επεξεργασία της επιφάνειας ώστε να εξαληφθεί η τραχύτητα (λείανση), και στην χημική επεξεργασία ώστε να απομακρυνθούν οι ανεπιθύμητοι παράγοντες.
- Η βαφή του μετάλλου, κατά την οποία η πολυεστερική βαφή ψεκάζεται στην επιφάνεια του. Το χρώμα, που είναι σε μορφή πούδρας, διέρχεται μέσα από το ηλεκτροστατικό πιστόλι, το οποίο φέρει τα σωματίδια και καθώς αυτά εξέρχονται αναγκάζονται να επικαθίσουν στο γειωμένο προς βαφή μέταλλο.

- Ο πολυμερισμός της πολυεστερικής βαφής, το ψήσιμο δηλαδή της πούδρας, ώστε να σταθεροποιηθεί στην επιφάνεια του προφίλ.

Η ηλεκτροστατική βαφή είναι μια νέα σχετικά μέθοδος και προτιμάται γιατί παρουσιάζει μια σειρά προτερημάτων όπως η αναλλοίωτη αντιδιαβρωτική προστασία, η μεγάλη ποικιλία χρωμάτων, η σταθερότητα της απόχρωσης κ.α.

Στην χώρα μας υπάρχουν πάνω από 30 μονάδες που ασχολούνται με την μέθοδο της ηλεκτροστατικής βαφής, η δυναμικότητας 120.000 τόνων.

2.2.3 Σουμπλιχρωμία

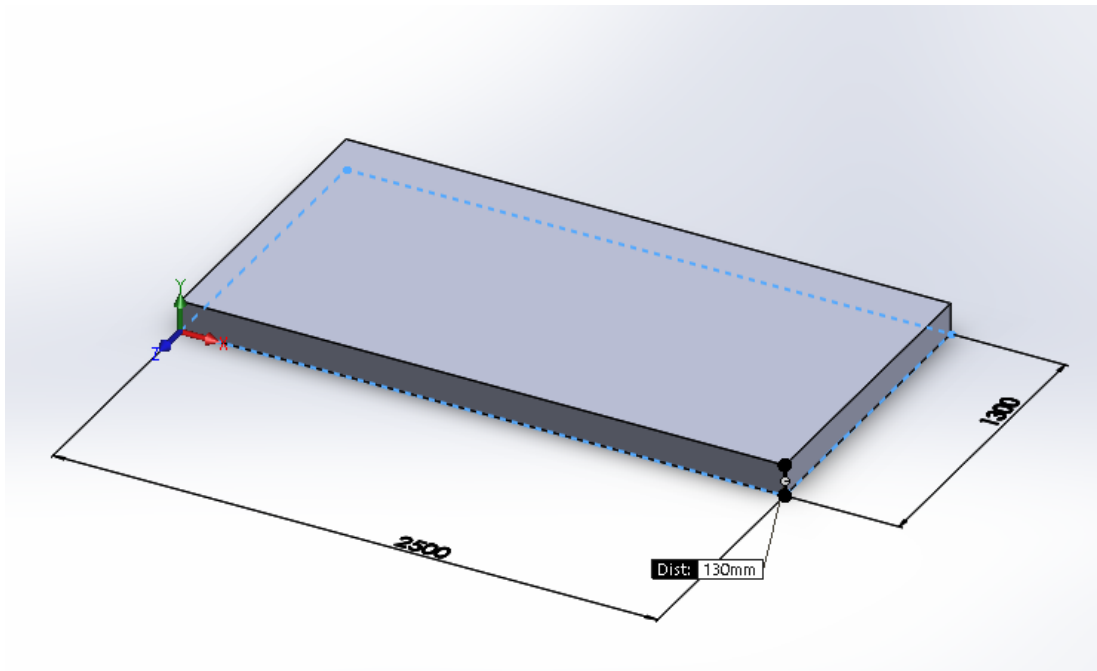
Η σουμπλιχρωμία είναι η διαδικασία κατά την οποία προσδίδεται στο αλουμίνιο η αισθητική άλλων δομικών υλικών, όπως του τσιμέντου, του μάρμαρου, του ξύλου, του χαλκού κτλ, χωρίς ωστόσο η γκάμα επιλογών να περιορίζεται αποκλειστικά σε δομικά υλικά, καθώς η τεχνική της σουμπλιχρωμίας προσφέρει ευρεία ποικιλία συνδυασμών που μπορούν να ικανοποιήσουν κάθε απαίτηση. Η διαδικασία είναι απλή και μοιάζει αρκετά με αυτήν της ηλεκτροστατικής βαφής. Αφού το μέταλλο βαφτεί με την πολυεστερική βαφή (πούδρα) τοποθετείται, υπό συνθήκες κενού, στην επιφάνεια του ένα ειδικού τύπου θερμοευαίσθητο πολυεστερικό φιλμ στο οποίο αποτυπώνεται το επιθυμητό μοτίβο. Εάν για παράδειγμα θέλουμε το αλουμίνιο να έχει την αισθητική του ξύλου, θα βαφτεί το μέταλλο σε καφετί απόχρωση και το φιλμ θα παρουσιάζει το μοτίβο των ρόζων και των δακτυλίων του ξύλου, ή αν θέλουμε αίσθηση μαρμάρου θα βαφτεί σε ανάλογη απόχρωση και το φιλμ θα περιέχει διάφορες αποχρώσεις όπως παρατηρείται στα μάρμαρα. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της τοποθέτησης του φιλμ το μέταλλο μπαίνει στο φούρνο ώστε να ξεκινήσει ο πολυμερισμός.

Τα προϊόντα της σουμπλιχρωμίας είναι ιδανικά και για εσωτερικούς χώρους, λόγω της υψηλής αισθητικής που προσφέρουν, αλλά και για εξωτερικούς, λόγω της εξαιρετικής μηχανικής αντοχής και της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Στην χώρα μας τα στοιχεία για την σουμπλιχρωμία είναι τα ίδια με αυτά της ηλεκτροστατικής βαφής με σημαντικές εξαγωγές σε αρκετές χώρες, καθώς το κύριο μέρος της παραγωγής εξάγεται στο εξωτερικό. Σημαντικά κτίρια της ευρωπαϊκής ένωσης, όπως π.χ το ευρωκοινοβούλιο και ο ευρωπαϊκός οργανισμός περιβάλλοντος, έχουν αλουμινένια προϊόντα σουμπλιχρωμίας που έχουν παραχθεί στην Ελλάδα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΗΣ

Για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της Έλασης θα πρέπει να υπολογισθούν ορισμένες παράμετροι. Στο κεφάλαιο αυτό θα ανατηχθούν οι υπολογισμοί των απαραίτητων παραμέτρων που χρειάζονται για να υλοποιηθεί η Έλαση. Στην διαδικασία αυτή έχουν ληφθεί ορισμένα δεδομένα τα οποία προέρχονται από πραγματική εγκατάσταση ελάστρου και με βάση αυτά θα πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί. Για μια τυπική πλάκα αλουμινίου (Σχ. 1) με δεδομένες διαστάσεις:

- Μήκος: $L=2500$ mm
- Πλάτος: $B= 1300$ mm
- Πάχος: $h_0= 130$ mm
- Διάμετρος ραούλων : $D=405$ mm
- Κράμα διαμόρφωσης : 6061
- Ισχύς Ηλεκτροκινητήρα: 700 kW
- Μείωση Πάχους σε κάθε Βαθμίδα: 25%
- Ταχύτητα εισόδου πλάκας: 3,75 (m/s)



Εικόνα 3.1: Έλασμα αλουμινίου εν ψυχρώ

Θα πραγματοποιηθούν αναλυτικοί υπολογισμοί μόνο για την πρώτη βαθμίδα, ενώ για τις υπόλοιπες θα παρουσιάζονται σε πίνακες. Ακολουθούν οι υπολογισμοί.

3.1 Ταχύτητα Τεμαχίου

Η ταχύτητα του τεμαχίου προσδιορίζεται από την εξίσωση συνέχειας. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο θα πρέπει η ταχύτητα εισόδου του τεμαχίου στη βαθμίδα να είναι ίδια με την περιφερειακή ταχύτητα των ραούλων, προκειμένου να αποφεύγεται η ολίσθηση των ραούλων εργασίας πάνω στην επιφάνεια του τεμαχίου με αποτέλεσμα να προκαλείται καταστροφή της επιφάνειας.

Η εξίσωση συνέχειας είναι η ακόλουθη.

$$b * h_0 * u_0 = b * h_1 * u_1 \quad 3.1$$

Επειδή όμως το πλάτος παραμένει σταθερό η εξίσωση απλοποιείται ως εξής

$$h_0 * u_0 = h_1 * u_1 \quad 3.2$$

Επειδή σε κάθε πέρασμα το πάχος μειώνεται

$$h_0 > h_1 \dots > h_n$$

Συμπερασματικά η ταχύτητα θα αυξάνεται σταδιακά σε κάθε βαθμίδα

$$u_0 < u_1 \dots < u_n$$

Με βάση την σχέση 3.2 θα υπολογίσουμε την ταχύτητα εξόδου του τεμαχίου από κάθε βαθμίδα.

1^η Βαθμίδα

- Ταχύτητα εισόδου: $u_{\text{εισ}} = 3,75 \frac{m}{s}$
- Πάχος εισόδου: $h_0 = 130 \text{ mm}$
- Πάχος εξόδου: Γνωρίζουμε πως σε κάθε πέρασμα το τεμάχιο χάνει το 25% του πλάτους του, επομένως το πάχος εξόδου θα είναι

$$h_1 = h_0 - (h_0 * 0,25) =$$

$$h_1 = 130 - (130 * 0,25) = 97,5 \text{ mm}$$

Έχοντας βρεί το πάχος εξόδου προχωρούμε στον υπολογισμό της ταχύτητας εξόδου, λύνοντας ως προς u_1 την εξίσωση (1)

$$u_1 = \frac{h_0 * u_0}{h_1} = \frac{130 * 3,75}{97,5} = 5 \frac{m}{s}$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζουμε την ταχύτητα εξόδου στις υπόλοιπες βαθμίδες.

2^η Βαθμίδα

- Ταχύτητα εισόδου: $u_{εισ2} = 5 \frac{m}{s}$
- Πάχος εισόδου: $h_1 = 97,5 \text{ mm}$
- Πάχος εξόδου:

$$h_2 = h_1 - (h_1 * 0,25) =$$

$$h_2 = 97,5 - (97,5 * 0,25) = 73,1 \text{ mm}$$

Προχωράμε στον υπολογισμό της ταχύτητας εξόδου, λύνοντας ως προς u_2 την εξίσωση (1)

$$u_2 = \frac{h_1 * u_1}{h_2} = \frac{97,5 * 5}{73,1} = 6,67 \frac{m}{s}$$

3^η Βαθμίδα

- Ταχύτητα εισόδου: $u_{εισ3} = 6,67 \frac{m}{s}$
- Πάχος εισόδου: $h_2 = 73,1 \text{ mm}$
- Πάχος εξόδου:

$$h_3 = h_2 - (h_2 * 0,25) =$$

$$h_3 = 73,1 - (73,1 * 0,25) = 54,8 \text{ mm}$$

Προχωράμε στον υπολογισμό της ταχύτητας εξόδου, λύνοντας ως προς u_3 την εξίσωση (1)

$$u_3 = \frac{h_2 * u_2}{h_3} = \frac{73,1 * 6,67}{54,8} = 8,9 \frac{m}{s}$$

4^η Βαθμίδα

- Ταχύτητα εισόδου: $u_{εισ4} = 8,9 \frac{m}{s}$
- Πάχος εισόδου: $h_3 = 54,8 \text{ mm}$
- Πάχος εξόδου:

$$h_4 = h_3 - (h_3 * 0,25) =$$

$$h_4 = 54,8 - (54,8 * 0,25) = 41,1 \text{ mm}$$

Προχωράμε στον υπολογισμό της ταχύτητας εξόδου, λύνοντας ως προς u_4 την εξίσωση (1)

$$u_4 = \frac{h_3 * u_3}{h_4} = \frac{54,8 * 8,9}{41,1} = 11,86 \frac{m}{s}$$

Τα αποτελέσματα φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα.

Βαθμίδες	ΠΑΧΟΣ (mm)	U (m/s)
1	97,5	5
2	73,1	6,67
3	54,8	8,9
4	41,1	11,86

3.2 Μήκος τόξου Επαφής

Ως τόξο επαφής ορίζεται το μήκος της περιφέρειας του κύκλου που εφάπτεται στο τεμάχιο. Υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο

$$L_p = \sqrt{R * \Delta h} \quad 3.3$$

Όπου

→ R: Η ακτίνα του ραούλου σε μέτρα

→ Δh: Η μείωση του πάχους σε μέτρα

1^η Βαθμίδα

Για την πρώτη βαθμίδα έχουμε

- R= 0,2025 m
- $\Delta h = \frac{130-97,5}{1000} = 0,0325$ m

Αντικαθιστώντας έχουμε

$$Lp = \sqrt{0,2025 * 0,0325} = 0,081 \text{ m}$$

2^η Βαθμίδα

Για την δεύτερη βαθμίδα έχουμε

- R= 0,2025 m
- Δh= 0,0244 m

Αντικαθιστώντας έχουμε

$$Lp = \sqrt{0,2025 * 0,0244} = 0,070 \text{ m}$$

3^η Βαθμίδα

Για την τρίτη βαθμίδα έχουμε

- R= 0,2025 m
- Δh= 0,0183 m

Αντικαθιστώντας έχουμε

$$Lp = \sqrt{0,2025 * 0,0183} = 0,061 \text{ m}$$

4^η Βαθμίδα

Για την τέταρτη βαθμίδα έχουμε

- R= 0,2025 m
- Δh= 0,0137 m

Αντικαθιστώντας έχουμε

$$Lp = \sqrt{0,2025 * 0,0137} = 0,053 \text{ m}$$

Τα αποτελέσματα για όλες τις βαθμίδες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Βαθμίδες	Lp (m)
1	0,081
2	0,07
3	0,061
4	0,053

3.3 Στροφές Ραούλων

Ο αριθμός των στροφών υπολογίζεται ως εξής :

$$n_i = \frac{u_i}{2 * r * \pi} \quad 3.4$$

Όπου i ο αριθμός της βαθμίδας, r η ακτίνα του ραούλου εργασίας σε μέτρα και u η περιφερειακή ταχύτητα των ραούλων σε κάθε βαθμίδα σε m/s.

Για κάθε βαθμίδα ισχύουν οι παρακάτω υπολογισμοί:

1^η Βαθμίδα

$$n_1 = \frac{5}{2 * 0,2025 * \pi} = 3,93 \text{ RPS} = 236 \text{ RPM}$$

2^η Βαθμίδα

$$n_2 = \frac{6,67}{2 * 0,2025 * \pi} = 5,24 \text{ RPS} = 314 \text{ RPM}$$

3^η Βαθμίδα

$$n_3 = \frac{8,9}{2 * 0,2025 * \pi} = 6,99 \text{ RPS} = 419 \text{ RPM}$$

4^η Βαθμίδα

$$n_4 = \frac{11,86}{2 * 0,2025 * \pi} = 9,32 \text{ RPS} = 559 \text{ RPM}$$

Για όλες τις βαθμίδες τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα

Βαθμίδες	RPM
1	236
2	314
3	419
4	559

3.4 Φορτίο Έλασης

Ως φορτίο έλασης (P) ορίζεται το φορτίο που επιβάλλεται στο τεμάχιο από τα ράουλα ώστε να διεκπεραιωθεί η έλαση. Για δεδομένη ισχύ κατεργασίας **700 kW** σε κάθε βαθμίδα υπολογίζουμε το φορτίο από τον παρακάτω τύπο.

$$P = \frac{I}{4\pi * \lambda * L_p * n} \quad (N) \quad 3.5$$

- I: Ισχύς Κατεργασίας σε Watt
- λ: Συντελεστής Έλασης και είναι 0,45
- L_p: Τόξο επαφής σε m
- n: Στροφές σε RPS

Αντικαθιστώντας βρίσκουμε τα παρακάτω φορτία για κάθε βαθμίδα.

1^η Βαθμίδα

$$P = \frac{700000}{4\pi * 0,45 * 0,081 * 3,93} = 388.864,32 \text{ N}$$

2^η Βαθμίδα

$$P = \frac{700000}{4\pi * 0,45 * 0,070 * 5,24} = 337.478,67 \text{ N}$$

3^η Βαθμίδα

$$P = \frac{700000}{4\pi * 0,45 * 0,061 * 6,99} = 290.314,45 \text{ N}$$

4^η Βαθμίδα

$$P = \frac{700000}{4\pi * 0,45 * 0,053 * 9,32} = 250.601,62 \text{ N}$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Βαθμίδες	P (N)
1	388.864,32
2	337.478,67
3	290.314,45
4	250.601,62

3.5 Απαιτούμενο Έργο Κατεργασίας

Είναι το έργο που πρέπει να παραχθεί για να πραγματοποιηθεί η έλαση. Υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο

$$W = 2 * (2\pi * \lambda * Lp) * P \quad 3.6$$

Όπου το τόξο επαφής Lp είναι μέτρα, και το φορτίο έλασης P σε Νιούτον.

Αντικαθιστώντας βρίσκουμε τις παρακάτω τιμές

1^η Βαθμίδα

$$W = 2 * (2\pi * 0,45 * 0,081) * 388.864,32 = 178.117 \text{ J}$$

2^η Βαθμίδα

$$W = 2 * (2\pi * 0,45 * 0,070) * 337.478,67 = 133.588J$$

3^η Βαθμίδα

$$W = 2 * (2\pi * 0,45 * 0,061) * 290.314,45 = 100.143 J$$

4^η Βαθμίδα

$$W = 2 * (2\pi * 0,45 * 0,053) * 250.601,62 = 75.107 J$$

Για τις βαθμίδες τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

Βαθμίδες	W (J)
1	178.117
2	133.588
3	100.143
4	75.107

3.6 Ροπή Στρέψης Ραούλων

Είναι η ροπή που απαιτείται να έχουν τα ράουλα για να πραγματοποιηθεί η έλαση. Υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο

$$T = 2 * P * \lambda * Lp \quad 3.7$$

Όπου το φορτίο και το τόξο επαφής είναι σε Νιούτον και μέτρα αντίστοιχα.

Αντικαθιστώντας έχουμε

1^η Βαθμίδα

$$T = 2 * 388.864,32 * 0,45 * 0,081 = 28.348,21 \text{ Nm}$$

2^η Βαθμίδα

$$T = 2 * 337.478,67 * 0,45 * 0,070 = 21.261,16 \text{ Nm}$$

3^η Βαθμίδα

$$T = 2 * 290.314,45 * 0,45 * 0,061 = 15.938,26 \text{ Nm}$$

4^η Βαθμίδα

$$T = 2 * 250.601,62 * 0,45 * 0,053 = 11.953,70 \text{ Nm}$$

Για κάθε βαθμίδα τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Βαθμίδες	T (Nm)
1	28.348,21
2	21.261,16
3	15.938,26
4	11.953,70

3.7 Συντελεστής και Δύναμη Τριβής

Για να εισέλθει σωστά η μπιγέτα στη βαθμίδα χωρίς ολίσθηση των ραούλων εργασίας πάνω στην επιφάνεια του τεμαχίου και το απαιτούμενο φορτίο να είναι ιδανικό ώστε να μην προκληθούν ατέλειες στην επιφάνεια του υλικού λόγω του φορτίου και της δύναμης τριβής, θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω συνθήκη

$$\tan \alpha \leq \frac{F}{P} \quad 3.8$$

Όπου

→ $\tan \alpha$: Ο συντελεστής τριβής « μ », οποίος δίνεται από την σχέση

$$\mu = \frac{Lp}{(R - \frac{\Delta h}{2})} \quad 3.9$$

1^η Βαθμίδα

$$\mu = \frac{0,081}{(0,2025 - \frac{0,0325}{2})} = 0,435$$

→ F: Η Δύναμη Τριβή η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$F = P * \mu = 0,435 * 388.864,32 = 169.155,98 \quad N$$

2^η Βαθμίδα

$$\mu = \frac{0,070}{(0,2025 - \frac{0,0244}{2})} = 0,369$$

$$F = P * \mu = 0,369 * 337.478,67 = 124.529,63 \quad N$$

3^η Βαθμίδα

$$\mu = \frac{0,061}{(0,2025 - \frac{0,0183}{2})} = 0,315$$

$$F = P * \mu = 0,315 * 290.314,45 = 91.449,05 \text{ N}$$

4^η Βαθμίδα

$$\mu = \frac{0,053}{(0,2025 - \frac{0,0137}{2})} = 0,269$$

$$F = P * \mu = 0,269 * 250.601,62 = 67.411,84 \text{ N}$$

Τα αποτελέσματα για όλες τις βαθμίδες παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον παρακάτω πίνακα.

Βαθμίδες	μ	F (N)
1	0,435	169.155,98
2	0,369	124.529,63
3	0,315	91.449,05
4	0,269	67.411,84

3.8 Πλάτυνση καμπύλης επιφάνειας

Κατά την κατεργασία αυτή απ' ό,τι παρατηρήσαμε έχουμε την ανάπτυξη υψηλών φορτίων στο τεμάχιο, με αποτέλεσμα να προκαλούνται ελαστικές παραμορφώσεις στα ράουλα και κατά συνέπεια το τόξο επαφής να υφίσταται πλάτυνση. Αυτή η πλάτυνση μπορεί να αποδοθεί από τη σχέση του Hitchcock, η οποία είναι :

$$R' = R * \left(1 + \frac{C * P}{b * \Delta h}\right) \quad 3.10$$

Όπου

→ C: Είναι η σταθερά του υλικού του ραούλου και για χάλυβα ισούται με

$$C = 2,16 * 10^{-11} \quad Pa^{-1}$$

→ P: Είναι το φορτίο βασιζόμενο στην ακτίνα R, η οποία είναι η ακτίνα καμπυλότητας μετά τις παραμορφώσεις

1^η βαθμίδα

Εφαρμόζουμε την 3.10, ήτοι:

$$R' = 0,2025 * \left(1 + \frac{2,16 * 10^{-11} * 388.864.32}{1,3 * 0,033}\right) = 0,20254 \quad m$$

2^η βαθμίδα

Από την σχέση 3.10

$$R' = 0,2025 * \left(1 + \frac{2,16 * 10^{-11} * 337.478.67}{1,3 * 0,024}\right) = 0,20255 \quad m$$

3^η βαθμίδα

Λύνοντας την εξίσωση 3.10

$$R' = 0,2025 * \left(1 + \frac{2,16 * 10^{-11} * 290.314.45}{1,3 * 0,018}\right) = 0,20255 \quad m$$

4^η βαθμίδα

Εφαρμόζουμε την σχέση 3.10

$$R' = 0,2025 * \left(1 + \frac{2,16 * 10^{-11} * 250.601.62}{1,3 * 0,014} \right) = 0,20256 \text{ m}$$

Αναλυτικά τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Βαθμίδες	R' (m)	C
1	0,20254	2,16E-11
2	0,20255	2,16E-11
3	0,20255	2,16E-11
4	0,20256	2,16E-11

Κεφάλαιο 4^ο: Έδρανα Ολίσθησης

4.1 Ορισμός

Ως έδρανα ολίσθησης (Εικόνα 4.1) ονομάζονται τα στοιχεία, τα οποία αποτελούνται από δύο κυλινδρικές επιφάνειες ανάμεσα στις οποίες διοχετεύεται λιπαντικό υγρό για την μείωση των τριβών που αναπτύσσονται και την απαγωγή της υψηλής θερμότητας που είναι ένα συχνά εμφανιζόμενο φαινόμενο στην διεργασία της έλασης.

Τα συνηθέστερα έδρανα είναι τα κυλινδρικά έδρανα ολίσθησης, τα οποία φέρουν περιστρεφόμενους άξονες και αναπτύσσονται ακτινικά φορτία. Αποτελούνται από ένα χιτώνιο από ειδικό μέταλλο (αντιτριβικά χιτώνια από μπρούντζο ή από κράματα κασσιτέρου, χαλκού και αντιμονίου ή από μη μεταλλικά πολυμερή). Το κάθε έδρανο είναι στηριζόμενο στο εσωτερικό μιας ολόσωμης φωλιάς ή διαιρούμενης, εντός της οποίας εισέρχεται ο άξονας της μηχανής, και μια οπή από όπου εισέρχεται το λιπαντικό. Εντός του χιτωνίου χαράσσονται εγκοπές κατάλληλης γεωμετρίας, ώστε να υποβοηθείται η ομοιόμορφη κατανομή του λιπαντικού στην επιφάνεια του εδράνου. Το χιτώνιο που τοποθετείται στην ολόσωμη βάση, λέγεται αντιτριβικός δακτύλιος ή όπως αλλιώς το συναντάμε στην καθημερινότητα μας κουζινέτο.

Εκτός από τα κυλινδρικά, υπάρχουν και τα ελλειπτικά έδρανα και τα έδρανα κυκλικών τομέων. Όλα τα παραπάνω παραλαμβάνουν εγκάρσια φορτία.

Τα αξονικά έδρανα παραλαμβάνουν τα αξονικά φορτία που αναπτύσσονται σε περιστρεφόμενους άξονες. Η εισαγωγή των λιπαντικών μεταξύ τριβόμενων επιφανειών έχει ευεργετικά αποτελέσματα στον συντελεστή τριβής. Τα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται έχουν την μορφή υγρών, στερεών και αερίων. Τα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται για την λίπανση των εδράνων ολίσθησης, έχουν την μορφή ορυκτών πετρελαίου, τα οποία είναι κατάλληλα για βασικές ανάγκες λίπανσης. Τα πρόσθετα συστατικά στα λιπαντικά χρησιμοποιούνται για την βελτίωση των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς του άξονα και των εδράνων.



Εικόνα 4.1: έδρανα ολίσθησης

Πηγή : <http://www.e-hatzopoulos.gr>

4.2 Κατηγορίες λίπανσης

Όπως, έχουμε προαναφέρει η λίπανση του εδράνου ολίσθησης είναι σημαντική, καθώς με αυτή αποφεύγονται οι υψηλές θερμοκρασίες, οι δυνάμεις τριβής και η φθορά του μηχανισμού. Υπάρχουν, πολλές μορφές λίπανσης οι οποίες έχουν διαφορετικές χρήσεις και εφαρμογές. Οι κατηγορίες αυτές αναλύονται παρακάτω.

4.2.1 Υδροδυναμική λίπανση

Κατά την λίπανση αυτή οι δύο επιφάνειες διαχωρίζονται μεταξύ τους από ένα παχύρευστο λιπαντικό υγρό, με αποτέλεσμα να αποφεύγονται οι επαφές μεταξύ των δύο επιφανειών. Η θέση ισορροπίας των εδράνων υπολογίζεται με την εφαρμογή των νόμων της ρευστομηχανικής.

Κατά την λίπανση αυτή δεν είναι απαραίτητη η προσθήκη του λιπαντικού με πίεση, αλλά είναι απαραίτητη η ύπαρξη λιπαντικού με συνεχόμενη ροή. Η πίεση στο φιλμ του λιπαντικού αναπτύσσεται από την κινούμενη επιφάνεια του άξονα. Αυτή, η επιφάνεια ωθεί με υψηλές ταχύτητες το λιπαντικό μέσα στην περιοχή, όπου το λιπαντικό σχηματίζει μια σφήνα με μικρότερο πάχος. Τέλος, η ύπαρξη του λιπαντικού ως διαχωριστικό μέσο διαχωρίζει τα μέρη τα οποία απαρτίζουν την συναρμογή, με αποτέλεσμα να μειώνεται η τριβή και να μην φθείρονται οι επιφάνειες του άξονα και των εδράνων.

4.2.2 Υδροστατική λίπανση

Η υδροστατική λίπανση είναι η μορφή λίπανσης που χρησιμοποιείται κυρίως για την περίπτωση μας. Σε αυτή την λίπανση διοχετεύεται λιπαντικό μεταξύ των επιφανειών, οι οποίες κινούνται μεταξύ τους, υπό πίεση με την βοήθεια μιας αντλίας. Όταν αρχίζει η διαδικασία της λίπανσης, τότε το ρευστό διαχωρίζει τις επιφάνειες μεταξύ τους με αποτέλεσμα να αποφευχθούν οι επαφές των μετάλλων και η ανάπτυξη τριβών και κατ' επέκταση οι φθορές των εξαρτημάτων. Επίσης, αυτή η μορφή λίπανσης διαχωρίζει τις φορτιζόμενες επιφάνειες ακόμα και στα κυλινδρικά έδρανα, τα οποία λειτουργούν σε μικρότερο αριθμό στροφών και βρίσκονται εκτός της περιοχής της υδροδυναμικής λίπανσης.

4.2.3 Ελαστοϋδροδυναμική λίπανση

Είναι η λίπανση, η οποία δημιουργείται κατά την εισαγωγή του λιπαντικού μεταξύ των κυλίσσων στερεών. Αυτή η λίπανση χρησιμοποιείται στην περίπτωση των συνεργαζόμενων οδοντωτών τροχών και για την λίπανση εδράνων κυλίσεως. Στην μελέτη της λίπανσης αυτής χρησιμοποιείται η θεωρία του Hertz και η ρευστομηχανική.

4.2.4 Οριακή λίπανση

Η αύξηση του φορτίου, η μείωση της ταχύτητας των επιφανειών, η αύξηση της θερμοκρασίας του λιπαντικού η οποία έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του ιξώδους και η μείωση της ροής με την οποία το λιπαντικό εισέρχεται μέσα στο έδρανο, έχουν ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση του πάχους του στρώματος του λιπαντικού ανάλογα με την τραχύτητα των επιφανειών και το διάκενο μεταξύ των επιφανειών. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται οριακή λίπανση. Η μετατροπή της υδροδυναμικής σε οριακή διαχωρίζεται από την σύνθετη κατάσταση η οποία ονομάζεται μικτή λίπανση.

4.2.5 Στερεά λίπανση

Η στερεά λίπανση είναι το παράδειγμα που μας αποδεικνύει ότι στην λίπανση εκτός από υγρά και αέρια χρησιμοποιούνται και τα στερεά, για παράδειγμα η σκόνη γραφίτη και η σκόνη διθειούχου μολυβδαινίου. Οι ειδικές συνθήκες για τη χρήση αυτής της μορφής λίπανσης είναι οι υψηλές θερμοκρασίες όπου τα στερεά διατηρούν τις ιδιότητες τους σε αντίθεση με τα υγρά.

4.3 Υπολογισμός εδράνων ολίσθησης για την κατεργασία της έλασης

Κατά το σχεδιασμό των εδράνων ολίσθησης ενδιαφέρει ο προσδιορισμός της κατανομής της πίεσης που αναπτύσσεται στο λιπαντικό κατά την εκτέλεση της κατεργασίας. Για τον υπολογισμό της παραπάνω κατανομής χρησιμοποιούνται οι θεωρίες της λίπανσης. Για την κατεργασία της έλασης πρέπει να υπολογίσουμε τον ρυθμό παροχής του λιπαντικού, ώστε η κατεργασία να εκτελείται χωρίς την ανάπτυξη μεγάλων τριβών, που αποσκοπούν στην φθορά του άξονα και του εδράνου.

Για τον άξονα του έδρανου γνωρίζουμε την διάμετρο του $d=150\text{mm}$, το φορτίο P για κάθε βαθμίδα ξεχωριστά, το κλάσμα πλάτους προς διάμετρο, που είναι $l/d=1$ την ακτινική χάρη $c=0,150\text{mm}$ τους αριθμούς των στροφών n για κάθε βαθμίδα. Επίσης, το ιξώδες του λιπαντικού είναι $\mu=2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ για λάδι SEA-60 υπό κανονικές συνθήκες και θερμοκρασία περιβάλλοντος, στην οποία βρίσκεται το λιπαντικό πριν εισχωρήσει στην διαδικασία της έλασης. Με βάση τα ανωτέρω στοιχεία και για κάθε βαθμίδα ξεχωριστά προκύπτουν οι παρακάτω υπολογισμοί.

Οι τύποι που εφαρμόζονται για τον υπολογισμό της παροχής του λιπαντικού είναι:

Μέση πίεση του φίλμ :

$$p_m = \frac{P/2}{2rl} \text{ MPa} \quad (4.1)$$

$$\text{Στους υπολογισμούς χρησιμοποιείται ο λόγος } \frac{r}{c} \quad (4.2)$$

όπου r είναι η ακτίνα του άξονα, c η ακτινική χάρη και l το πλάτος του εδράνου.

$$\text{Ο αριθμός Sommerfeld υπολογίζεται από τη σχέση : } S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 * \frac{\mu * n}{p_m} \quad (4.3)$$

Η γωνιακή ταχύτητα υπολογίζεται ως

$$\omega = 2 * \pi * n \text{ rad/s} \quad (4.4)$$

Όπου μ το ιξώδες του λιπαντικού, n οι στρόφες.

Οι απώλειες λόγω τριβών είναι

$$P_w = f * \left(\frac{P}{2}\right) * r * \omega \text{ Watt} \quad (4.5)$$

Οι αδιαστατοί αριθμοί : $\frac{h_0}{c}$, $\frac{Q}{(r*c*n*l)}$, $\frac{(r*f)}{c}$ και $\frac{Q_s}{Q}$, επιλέγονται από τα διαγράμματα 1,2,3 και 4 αντίστοιχα, όπου, f συντελεστής τριβής και h το πάχος του υγρού. Με βάση τα διαγράμματα αυτά προκύπτει το Qs το οποίο δηλώνει την κατανάλωση του λιπαντικού που διοχετεύεται στο σύστημα .

- Για την πρώτη βαθμίδα έχουμε :

$$d = 150 \text{ mm}, \quad P = 388.864,32 \text{ N}, \quad \frac{l}{d}=1, \quad c = 0,150 \text{ mm},$$

$$\mu = 2 \text{ Pa} * s, \quad n = 236 \text{ rpm} = 3,93 \frac{\text{rev}}{s}.$$

$$\text{Από την σχέση (4.1) έχουμε } p_m = \frac{P/2}{2rl} = \frac{388.864,32/2}{2 * \left(\frac{150}{2}\right) * 150} = 8,64 \text{ MPa}.$$

Επιπλέον, το κλάσμα $\frac{r}{c}$ υπολογίζεται από την σχέση (4.2)

$$\frac{r}{c} = \left(\frac{\frac{150}{2}}{0,150}\right) = 500.$$

Ο αριθμός Sommerfeld υπολογίζεται ως :

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 * \frac{\mu * n}{p_m} = (500)^2 * \frac{2 * 3,93}{8,64 * 10^6} = 0,23.$$

Από τα διαγράμματα και με βάση τον αριθμό Sommerfeld έχουμε $\frac{h_0}{c}=0,55$,

$$\frac{Q}{(r*c*n*l)}=4, \quad \frac{(r*f)}{c}=5 \quad \frac{Q_s}{Q}=0,52$$

Από τους παραπάνω αδιάστατους αριθμούς υπολογίζονται τα εξής

$$h_0 = 0,55 * c = 0,55 * 0,150 \text{ mm} = 0,0825 \text{ mm}$$

$$Q = 4 * (r * c * n * l) = 4 * \frac{\left(\left(\frac{150}{2}\right) * 0,150 * 3,93 * 150\right)}{10^6} = 0,026 \frac{\text{lt}}{\text{s}}$$

$$Q_s = 0,52 * Q = 0,52 * 0,026 = 0,014 \frac{lt}{s} = 50,40 \frac{lt}{h}$$

Ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται από την σχέση

$\frac{(r*f)}{c}$ το οποίο βρέθηκε από διάγραμμα 3 οπότε λύνουμε ως προς f:

$$f = \frac{5}{\frac{r}{c}} = \frac{5}{500} = 0,01$$

Από τον τύπο 4.4 έχουμε τις απώλειες τριβής, με αντικατάσταση στον παρακάτω τύπο έχουμε

$$P_w = 2 * \pi * n * f * r * \left(\frac{P}{2}\right) = \pi * 3,93 * 0,01 * 0,075 * 388.864,32 \\ = 3,6 \text{ kW}$$

- Στην δεύτερη βαθμίδα έχουμε ως δύναμη P=337.478.67 N και

$$n = 314 \text{ rpm} = 5,24 \frac{rev}{s}$$

Από την σχέση(4.1) έχουμε $p_m = \frac{P}{2rl} = \frac{337.478.67/2}{2 * \left(\frac{150}{2}\right) * 150} = 7,5 \text{ MPa}$

Το κλάσμα $\frac{r}{c}$ είναι $\frac{r}{c} = \frac{\frac{150}{2}}{0,150} = 500$

Ο αριθμός Sommerfeld υπολογίζεται ως :

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 * \frac{\mu * n}{p_m} = (500)^2 * \frac{2 * 5,24}{7,5 * 10^6} = 0,35$$

Με βάση τον αριθμό Sommerfeld και από τα διαγράμματα έχουμε $\frac{h_0}{c} = 0,66$,

$$\frac{Q}{(r*c*n*l)} = 3,85 , \frac{r*f}{c} = 5,3, \frac{Q_s}{Q} = 0,44$$

Από τους παραπάνω αδιάστατους αριθμούς υπολογίζονται τα εξής

$$h_0 = 0,66 * c = 0,66 * 0,150 = 0,099 \text{ mm}$$

$$Q = 3,85 * (r * c * n * l) = 3,85 * \frac{(75 * 0,15 * 5,24 * 150)}{10^6} = 0,034 \frac{lt}{s}$$

$$Q_s = 0,44 * Q = 0,44 * 0,034 = 0,015 \frac{lt}{s} = 53,86 \frac{lt}{h}$$

Ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται από την σχέση $(r \cdot f)/c$ το οποίο βρέθηκε από διάγραμμα 3 οπότε λύνουμε ως προς f :

$$f = \frac{5,3}{\frac{r}{c}} = \frac{5,3}{500} = 0,01$$

Από τον τύπο 4.4 έχουμε τις απώλειες τριβής

$$P_w = f * P * r * \omega = 2 * \pi * n * f * r * \left(\frac{P}{2}\right) =$$

$$\pi * 5,24 * 0,075 * 0,0106 * 337.478,67 = 4,4 \text{ kW}$$

- Στην 3^η βαθμίδα έχουμε

$$P = 290.314,45 \text{ N}, n = 419 \text{ rpm} = 6,99 \frac{\text{rev}}{\text{s}}$$

$$\text{Από την σχέση(4.1) έχουμε } p_m = \frac{P}{2rl} = \frac{290.314,45/2}{2 * \left(\frac{150}{2}\right) * 150} = 6,45 \text{ MPa}$$

$$\text{Επίσης, το κλάσμα } r/c \text{ υπολογίζεται από την σχέση (2) } \frac{r}{c} = \frac{\frac{150}{2}}{0,150} = 500$$

Ο αριθμός Sommerfeld υπολογίζεται ως :

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 * \frac{\mu * n}{p_m} = (500)^2 * \frac{2 * 6,99}{6,47 * 10^6} = 0,54$$

Από τους πίνακες και με βάση τον αριθμό Sommerfeld έχουμε $\frac{h_0}{c} = 0,74$

$$\frac{Q}{r * c * n * l} = 3,75, \frac{r * f}{c} = 11, \frac{Q_s}{Q} = 0,33$$

Από τους παραπάνω αδιάστατους αριθμούς υπολογίζονται τα εξής

$$h_0 = 0,74 * c = 0,067 * 0,150 = 0,0111, \text{ mm}$$

$$Q = 3,75 * (r * c * n * l) = 3,75 * \frac{(75 * 0,150 * 6,99 * 150)}{10^6} = 0,044 \frac{\text{lt}}{\text{s}}$$

$$Q_s = 0,33 * Q = 0,33 * 0,044 = 0,01452 \frac{lt}{s} = 52,27 \frac{lt}{h}$$

Ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται από την σχέση

$\frac{(r*f)}{c}$ το οποίο βρέθηκε από διάγραμμα 3 οπότε λύνουμε ως προς f:

$$f = \frac{11}{\frac{r}{c}} = \frac{11}{500} = 0,02$$

Από τον τύπο 4.4 έχουμε τις απώλειες τριβής, ως εξής

$$P_w = f * \frac{P}{2} * r * \omega = \pi * 6,99 * 0,075 * 0,022 * 290.314,45 = 10,52 \text{ kW}$$

- Τέλος στην 4^η βαθμίδα έχουμε

$$P = 250.601,62 \text{ N} , n = 559 \text{ rpm} = 9,32 \frac{\text{rev}}{\text{s}}$$

$$\text{Από την σχέση (4.1) έχουμε } p_m = \frac{P}{2rl} = \frac{250.601,62/2}{2 * (\frac{150}{2}) * 150} = 5,57 \text{ MPa}$$

$$\text{Επίσης, το κλάσμα } r/c \text{ υπολογίζεται από την σχέση (2) } \frac{r}{c} = \frac{(\frac{150}{2})}{0,150} = 500$$

Ο αριθμός Sommerfeld υπολογίζεται ως :

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 * \frac{\mu * n}{p_m} = (500)^2 * \frac{2 * 9,33}{5,57 * 10^6} = 0,837$$

$$\text{Από τους και με βάση τον αριθμό Sommerfeld πίνακες έχουμε } \frac{h_0}{c} = 0,83, \frac{Q}{r*c*n*l} = 3,45, \frac{r*f}{c} = 17 \frac{Q_s}{Q} = 0,22,$$

Από τους παραπάνω αδιάστατους αριθμούς υπολογίζονται τα εξής:

$$h_0 = 0,83 * c = 0,83 * 0,150 = 0,124 \text{ mm}$$

$$Q = 3,45 * (r * c * n * l) = 3,45 * \left(\frac{75 * 0,15 * 9,32 * 150}{10^6} \right) = 0,054 \frac{lt}{s}$$

$$Q_s = 0,22 * Q = 0,22 * 0,054 = 0,0119 \frac{lt}{s} = 42,97 \frac{lt}{h}$$

Ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται από την σχέση

$\frac{r*f}{c}$ το οποίο βρέθηκε από διάγραμμα οπότε λύνουμε ως προς f:

$$f = \frac{0,3}{\frac{r}{c}} = \frac{17}{500} = 0,03$$

Από τον τύπο 4.4 έχουμε τις απώλειες τριβής

$$P_w = f * \frac{P}{2} * r * \omega = 2 * \pi * n * \frac{P}{2} * f * r$$

$$= \pi * 9,32 * 0,034 * 0,075 * 250.601,62 = 18,71 \text{ kW}$$

Τα παραπάνω αποτελέσματα απεικονίζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες.

βαθμίδες	D (mm)	C (mm)	l/d	P(N)	p_m (Mpa)	R (mm)	L (mm)	r/c	μ (Pa.s)
1	150,00	0,15	1,00	388864,32	8,64	75,00	150,00	500,00	2,00
2	150,00	0,15	1,00	337478,67	7,50	75,00	150,00	500,00	2,00
3	150,00	0,15	1,00	290314,45	6,45	75,00	150,00	500,00	2,00
4	150,00	0,15	1,00	250601,62	5,57	75,00	150,00	500,00	2,00

Πίνακας 1 : Δεδομένα και υπολογισμοί για κάθε βαθμίδα αντίστοιχα

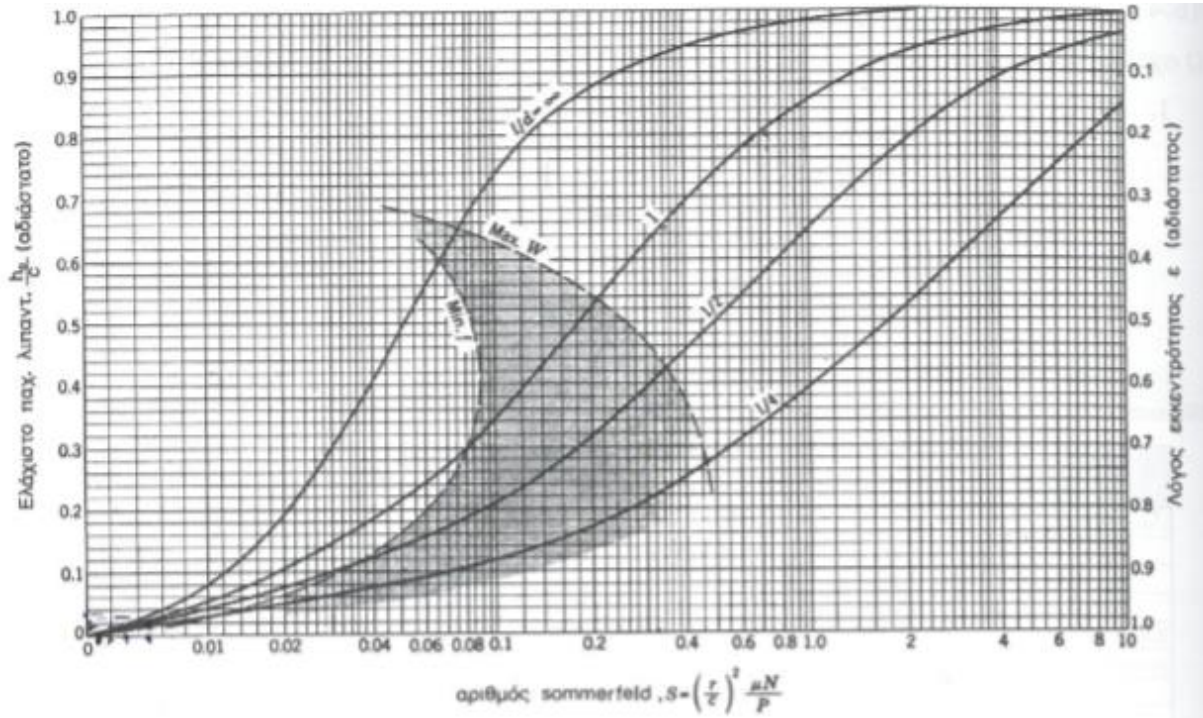
βαθμίδες	N (rev/s)	S	h_0/c	Q/rcnl	Q_s/Q	h_0 (mm)
1	3,93	0,23	0,55	4,00	0,52	0,08
2	5,24	0,35	0,66	3,85	0,44	0,10
3	6,99	0,54	0,74	3,75	0,33	0,11
4	9,32	0,84	0,83	3,45	0,22	0,12

Πίνακας 2 : Δεδομένα και υπολογισμοί μέσω των διαγραμμάτων για κάθε βαθμίδα

βαθμίδες	Q (lt/s)	Q_s (lt/s)	$r*f/c$	P_w (kWatt)	f
1	0,026	0,014	5,00	3,60	0,01
2	0,034	0,015	5,30	4,40	0,01

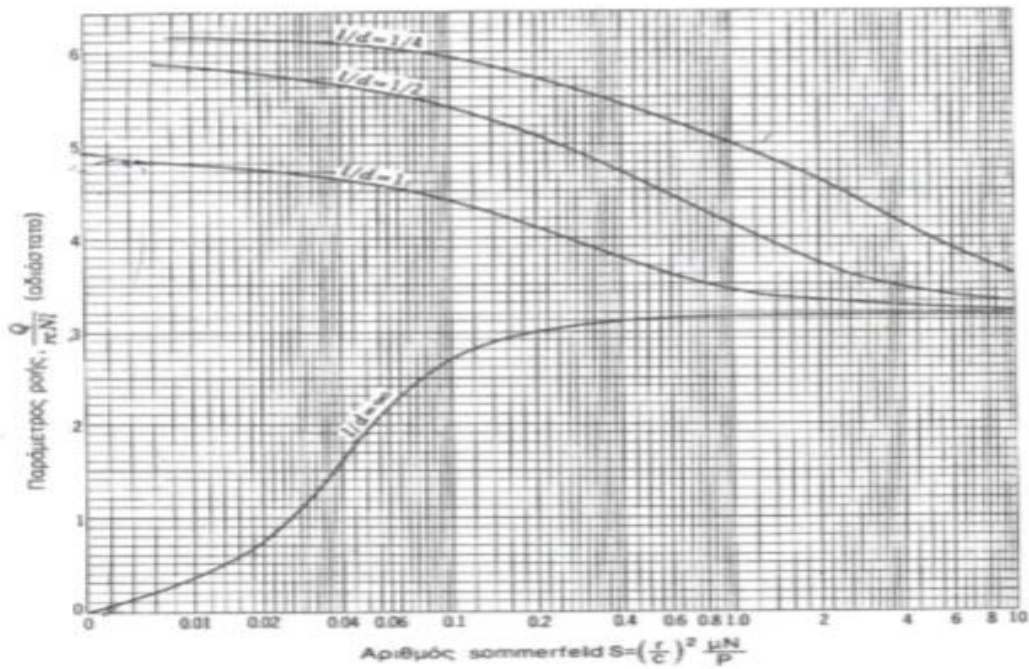
3	0,044	0,0145	11,00	10,52	0,02
4	0,054	0,0119	17,00	18,71	0,03

Πίνακας 3 : Αποτελέσματα κάθε βαθμίδας αντίστοιχα



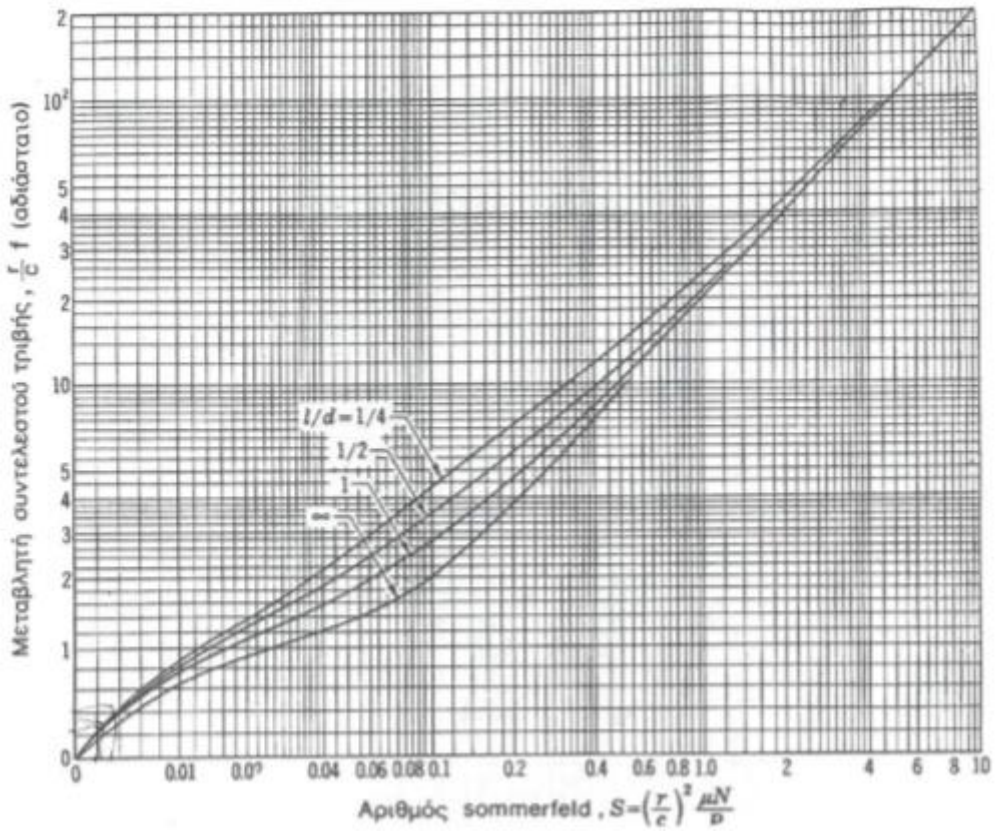
Διάγραμμα 1

Πηγή: Παπαδόπουλος, Στοιχεία μηχανών



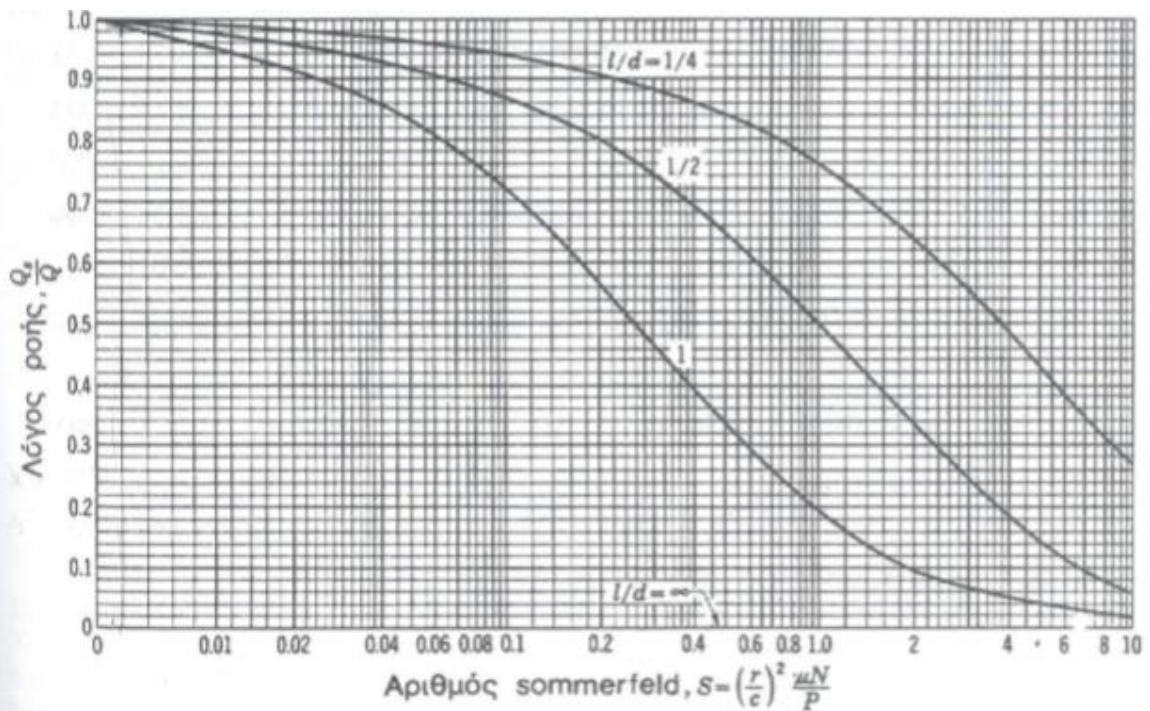
Διάγραμμα 2

Πηγή: Παπαδόπουλος, Στοιχεία μηχανών



Διάγραμμα 3

Πηγή: Παπαδόπουλος, Στοιχεία μηχανών



Διάγραμμα 4

Πηγή: Παπαδόπουλος, Στοιχεία μηχανών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Σχεδιασμός Μειωτήρα και Έλεγχος Αντοχής Γραναζιών κατά DIN3990

5.1 Γενικά περί μειωτήρων

Ως μειωτήρας θεωρείται η διάταξη η οποία ως σκοπό έχει την μεταβολή των στροφών εισόδου στον μειωτήρα, που προσφέρονται μέσω άξονα κυρίως από ηλεκτροκινητήρες, προκειμένου να επιτευχθεί ο επιθυμητός αριθμός στροφών. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανίες, βιοτεχνίες και κάθε είδους μονάδες στις οποίες χρησιμοποιούνται κινητήρες για την παραγωγή, λόγω του υψηλού βαθμού απόδοσης, της φθηνής συντήρησης, της μεγάλης ποικιλίας τύπων καθώς και της μεγάλης διάρκειας ζωής τους.

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην μεταφορά κίνησης μέσω αξόνων και γραναζιών, τα οποία λειτουργούν με βάση τους νόμους της οδόντωσης.



Εικ. 5.1: <http://www.alexandris.gr>

Στους μειωτήρες υπάρχει η δυνατότητα η διάταξη να αποτελείται από επιμέρους βαθμίδες μεταξύ μετωπικών, ελικοειδών και κωνικών οδοντωτών τροχών, ή ακόμα και συνδυασμούς μεταξύ αυτών ανάλογα με το είδος και το καθεστώς λειτουργίας του μειωτήρα. Για μειωτήρες στους οποίους οι ταχύτητες εισόδου και εξόδου είναι μικρές ($U \leq 20$ m/s), επιλέγονται οδοντωτοί τροχοί με ευθείς οδόντες, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες χρησιμοποιούνται τροχοί με κεκλιμένους (πλάγιους) οδόντες. Η παρουσία τους είναι καθοριστικής σημασίας για κάθε είδους διεργασία, κατά την οποία η παροχή κίνησης πραγματοποιείται

από ηλεκτροκινητήρα, λόγω του ότι ο αριθμός των στροφών εξόδου είναι προκαθορισμένος.

5.1.1 Είδη Μειωτήρων

Η κατηγοριοποίηση των μειωτήρων γίνεται ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των αξόνων εισόδου και εξόδου, επομένως οι κατηγορίες μειωτήρων είναι οι εξής:

1. Παράλληλων Αξόνων: Όπως υποδηλώνει και η ονομασία τους, οι εν λόγω μειωτήρες έχουν τους άξονες εισόδου και εξόδου σε παραλληλία και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι στην βαριά βιομηχανία. Συνήθως ο άξονας της κινητήριας μηχανής δεν συνδέεται άμεσα με τον μειωτήρα, αλλά προηγείται σύνδεσμος ο οποίος έχει τον ρόλο του συνδετικού κρίκου.
2. Γωνιακοί Μειωτήρες: Στους γωνιακούς μειωτήρες οι άξονες εισόδου και εξόδου είναι κάθετοι ο ένας προς τον άλλο πράγμα που προσφέρει μεγάλη ευελιξία στην τοποθέτηση του.
3. Πλανητικοί Μειωτήρες: Πλανητικοί είναι οι μειωτήρες στους οποίους «κουμπώνει» επάνω η κινητήριος μηχανή, έχοντας ως ιδιαιτερότητα πως ο κινητήριος άξονας είναι στην ίδια ευθεία με τον άξονα εξόδου του μειωτήρα. Λόγω της ανθεκτικής κατασκευαστικής δομής τους, της ευελιξίας στην τοποθέτηση των γραναζιών και τις πολλαπλές επιλογές διασύνδεσης με την κινητήριος μηχανή, καθίστανται ιδανικοί για εφαρμογές βαρέως τύπου, όπου λαμβάνουν χώρα μεγάλα κρουστικά και εναλλασσόμενα φορτία.

5.1.2 Πλεονεκτήματα Μειωτήρων

Στα πλεονεκτήματα τους συμπεριλαμβάνονται η ευκολία έδρασης, η σχετικά απλοϊκή διάταξη, η ευκολία εξωτερικής συναρμολόγησης με διάφορους συνδέσμους π.χ σταυρούς, η ακριβής σχέση μετάδοσης, η ανθεκτική δομή κατασκευής, ο μικρός όγκος που καταλαμβάνουν, η ευρέως γνωστή τεχνογνωσία κατασκευής (για τους συμβατικούς) καθώς και η δυνατότητα υπερφόρτισης.

5.1.3 Μειονεκτήματα Μειωτήρων

Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται το υψηλό κόστος κατασκευής, υψηλό βάρος κατασκευής (πράγμα που δυσχεραίνει την μεταφορά και αυξάνει το κόστος μεταφοράς), η πρόκληση θορύβων που δημιουργούν οι συνεργαζόμενοι τροχοί καθώς επίσης και η μη ελαστική μεταφορά δυνάμεων.

5.1.4 Εγκατάσταση, Λειτουργία και Συντήρηση

Κατά την εγκατάσταση ζωτικής σημασίας είναι η σωστή έδραση, πράγμα που θα εξασφαλίσει την σωστή ισορροπία του μειωτήρα, την ομαλή λειτουργία χωρίς περαιτέρω φθορά των γραναζιών, και την αποφυγή διαρροής του λιπαντικού που θα οδηγούσε σε καταστροφή της εσωτερικής δομής του μειωτήρα λόγω της ανάπτυξης υψηλών κρουστικών φορτίων μεταξύ των γραναζιών και των εναλλασσόμενων φορτίων στους άξονες, με τελικό αποτέλεσμα την σταδιακή αχρήστευση του.

Για την εγκατάσταση μειωτήρα, θα πρέπει επίσης να τηρούνται οι Οδηγίες της ΕΕ περί Μηχανών **98/37/EC**, **06/42/EC** που αφορούν τις προδιαγραφές εγκατάστασης βιομηχανικών εξαρτημάτων σε εγκαταστάσεις. Στα πλαίσια της εφαρμογής των κανόνων δεν θα πρέπει να τίθεται σε λειτουργία κανένα μηχάνημα, εάν προηγουμένως δεν έχει ελεγχθεί η ορθή τήρηση των Οδηγιών της ΕΕ (Μελέτη Εγκατάστασης). Με την ευθύνη της τήρησης των Οδηγιών επιφορτίζεται ο επιβλέπων Μηχανικός ο οποίος υπογράφει την μελέτη εγκατάστασης και έχει αστικές ευθύνες όσον αφορά τις ποινές.

Για την εύρυθμη λειτουργία του μειωτήρα επιβάλλεται η τήρηση των κανόνων και των οδηγιών που περιλαμβάνονται στο εγχειρίδιο λειτουργίας το οποίο προσφέρεται από την εταιρεία κατασκευής του μειωτήρα κατά την αγορά. Πέρα από την τήρηση των οδηγιών, υπάρχουν εξωγενείς παράγοντες που επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία των μειωτήρων όπως η θερμοκρασία του χώρου εργασίας, της υγρασίας, του ακάθαρτου περιβάλλοντος κτλ. Στους ηλεκτρομειωτήρες υπάρχει η δυνατότητα διαρκούς ελέγχου της λειτουργίας του από υπολογιστή καθώς και η παρακολούθηση της στάθμης του λιπαντικού. Στους συμβατικούς πρέπει ο έλεγχος να γίνεται επί τόπου με χρήση οργάνων (θερμόμετρο, στροφόμετρο κτλ).

Οι λειτουργίες εγκατάστασης, συναρμολόγησης και συντήρησης θα πρέπει να εκτελούνται αποκλειστικά από έμπειρο και εξειδικευμένο προσωπικό προκειμένου να αποφεύγονται τα ατυχήματα και οι ζημιές. Κατά την διάρκεια συντήρησης θα πρέπει να ελέγχεται η στάθμη του λιπαντικού, η ύπαρξη διαρροών, η θερμοκρασία, η ύπαρξη αδικαιολόγητων θορύβων, οι ανοχές συναρμολόγησης, η πιθανή μετατόπιση των αξόνων και η εξασφάλιση της ευθύγραμμης διασυνδεσής τους, και η ύπαρξη εξωτερικής φόρτισης. Σημαντικό είναι επίσης να τηρείται βιβλίο συντήρησης, στο οποίο καταγράφονται οι ημερομηνίες ελέγχου, η στάθμη του λιπαντικού, οι ημερομηνίες αναπλήρωσης του λιπαντικού κτλ, στο οποίο επίσης και θα προγραμματίζονται οι μελλοντικές συντηρήσεις.

Τα άχρηστα λάδια θα πρέπει να συγκεντρώνονται σε ειδικούς κάδους και να ανακυκλώνονται όπως προβλέπεται από τους περιβαλλοντικούς νόμους.

5.2 Σχεδιασμός και Υπολογισμός Χαρακτηριστικών Μειωτήρα

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η διάταξη του μειωτήρα και θα υπολογιστούν τα βασικά μέρη της εσωτερικής δομής καθώς επίσης θα καθοριστούν οι διαστάσεις.

5.2.1 Χαρακτηριστικά Μειωτήρα

Ο μειωτήρας που θα χρησιμοποιήσουμε στην δικιά μας περίπτωση, θα είναι μονοβάθμιος κατακόρυφος μειωτήρας δυο εξόδων και θα αποτελείται από τέσσερις συνεργαζόμενους τροχούς: δύο πινιόν και δυο γρανάζια. Η διάταξη είναι απλή και συνίσταται στο εξής: Η περιστροφική κίνηση του ηλεκτροκινητήρα προσφέρεται στο πρώτο πινιόν, το οποίο εν συνεχεία μεταδίδει την περιστροφική κίνηση σε δύο γρανάζια, στο δεύτερο πινιόν από πάνω και στο γρανάζι που βρίσκεται από κάτω του (Τροχός 1). Το δεύτερο πινιόν μεταδίδει την περιστροφική κίνηση στο γρανάζι που βρίσκεται από πάνω του (Τροχός 2). Με αυτή τη διάταξη εξασφαλίζουμε την αντίθετη περιστροφή των δύο γραναζιών και κατ' επέκταση των ραούλων εργασίας που απαιτείται για την επίτευξη της έλασης. Η σύνδεση του μειωτήρα με τον ηλεκτροκινητήρα γίνεται με σύνδεσμο για να απαλείφονται κραδασμοί και υπερφορτίσεις, ενώ στη συνέχεια η σύνδεση του μειωτήρα με τα ράουλα εργασίας γίνεται με σταυρούς. Η συγκεκριμένη σχεδίαση έγινε αποκλειστικά για τις ανάγκες της πτυχιακής.

5.2.2 Διαμόρφωση Μειωτήρα

Τα κριτήρια που λαμβάνονται υπ' όψη για την επιλογή του μειωτήρα είναι τα εξής:

- Στροφές Εισόδου
- Στροφές Εξόδου (επιθυμητές στροφές)
- Ροπή Εξόδου
- Σχέση Μετάδοσης

Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά θα γίνει η διαμόρφωση του μειωτήρα. Οι υπολογισμοί για κάθε βαθμίδα έχουν πραγματοποιηθεί σε Excel και θα παρουσιαστούν στην συνέχεια. Αναλυτικοί υπολογισμοί έχουν πραγματοποιηθεί μόνο για την πρώτη βαθμίδα.

5.2.3 Δεδομένα Υπολογισμού

Τα δεδομένα που θα χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό των μερών του μειωτήρα ελήφθησαν από υπάρχουσα μονάδα έλασης αλουμινίου και είναι τα εξής:

Δεδομένα	
Ισχύς Κινητήρα	700 kW
Στροφές Κινητήρα	1000 RPM
Υλικό Ατράκτου	St50
Πλάτος Πινιόν	250 mm
Υλικό Πινιόν	34Cr4
Υλικό Τροχών	42CrMo4

5.2.4 Διάμετρος Ατράκτου

Η διάμετρος της ατράκτου σε στρέψη δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$d_{sh} = C_2 * \sqrt[3]{\frac{C_B * P_1}{n_1}} \quad (mm) \quad 5.1$$

Όπου:

- P_1 : Ισχύς Εισόδου σε kW
- n_1 : Στροφές Εισόδου (πινιόν) σε RPM

- C_2 : Εξαρτάται από την επιτρεπόμενη τάση στρέψης και για χάλυβα St50 λαμβάνεται $C_2= 133$.
- C_B : Συντελεστής λειτουργίας, σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα για λειτουργία με ομοιόμορφες περιστροφικές κινήσεις λαμβάνεται μεταξύ των τιμών $1 \div 1,1$ εμείς λαμβάνουμε $C_B=1,1$.

Είδος του μηχανήματος (παραδείγματα)	Χαρακτηριστικός τρόπος λειτουργίας	Είδος των κρούσεων	Συντελεστής λειτουργίας C_B
Ηλεκτρικές μηχανές, στρόβιλοι φουσητήρες, μηχανές λείανσης	Ομοιόμορφες περιστροφικές κινήσεις	Ελαφρές	1,0 ... 1,1
Μηχανές εσωτερικής καύσης, εμβολοφόροι συμπιεστές, μηχανές πλανίσματος, διατρητικές μηχανές	Παλινδρομικές κινήσεις	Μέσες	1,2 ... 1,5
Πρέσες, ψαλίδια κοπής προφίλ, καταρράκτες (πριόνια)	Παλινδρομικές κρουστικές κινήσεις	Ισχυρές	1,6 ... 2,0
Σφύρες, σπαστήρες πέτρας, ορθοστάτες ελαστρων	Κινήσεις με απότομα κτυπήματα	Πολύ ισχυρές	2 ... 3

Εικ. 5.2: Βιβλ. Στεργίου Πίνακας 1-8 σελ.76

Αντικαθιστώντας στην σχέση 5.1 προκύπτει

$$d_{sh} = 133 * \sqrt[3]{\frac{1,1 * 700}{1000}} = 121,9 \approx 122 \text{ mm}$$

5.2.5 Αριθμός Δοντιών, Διάμετρος και Module των Πινιόν

Στην ενότητα αυτή θα υπολογίσουμε τα βασικά στοιχεία των δύο πινιόν, τα οποία αποτελούνται από το ίδιο υλικό. Για να υπάρχει διάκριση μεταξύ των πινιόν, οι παράγοντες που αφορούν το κινητήριο πινιόν θα έχουν τον δείκτη «πιν.1», ενώ για το δεύτερο πινιόν που βρίσκεται από πάνω οι παράγοντες θα έχουν δείκτη «πιν.2». Θα πραγματοποιηθούν υπολογισμοί που αφορούν μόνο την πρώτη βαθμίδα, ενώ για τις υπόλοιπες τα στοιχεία που υπολογίσαμε θα παρουσιάζονται σε πίνακα.

5.2.5.1 Υπολογισμός Στοιχείων των Πινιόν

Επιλέγουμε το κινητήριο πινιόν να είναι ολόσωμο με τον άξονα για να αποφύγουμε τους περιττούς κραδασμούς και τις ταλαντώσεις που θα προκαλούνταν αν το πινιόν ήταν τοποθετημένο με σφήνα, ενώ το δεύτερο πινιόν βρίσκεται σε δικό του άξονα και θα συνεργάζεται με το κινητήριο.

Για να υπολογίσουμε τον αριθμό δοντιών του κινητηρίου πινιόν, θα πρέπει να υπολογίσουμε την περιφερειακή ταχύτητα του πινιόν με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$u_{\pi\nu.1} = \frac{d_{\pi\nu.1} * \pi * n_{\pi\nu.1}}{60000} \left(\frac{m}{s} \right) \quad 5.2$$

Όπου για έναν πρόχειρο υπολογισμό της περιφερειακής ταχύτητας μπορεί αρχικά να τεθεί η διάμετρος $d_{\pi\nu.1}$ του πινιόν ολόσωμου με τον άξονα ίση με:

$$d_{\pi\nu.1} \approx 1,25 * d_{sh} \quad 5.3$$

Με εφαρμογή στον 5.2 έχουμε

$$u_{\pi\nu.1} = \frac{1,25 * d_{sh} * \pi * n_{\pi\nu.1}}{60000} \left(\frac{m}{s} \right) \quad 5.4$$

Και με αντικατάσταση προκύπτει

$$u_{\pi\nu.1} = \frac{1,25 * 122 * \pi * 1000}{60000} = 7,98 \approx 8 \left(\frac{m}{s} \right)$$

Για μεγάλες περιφερειακές ταχύτητες ($u \geq 5 \text{ m/s}$) ο αριθμός δοντιών εκλέγεται στο διάστημα

$$z \approx 20 \dots \dots 25$$

Ο αριθμός δοντιών θα πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε οι αριθμοί των δοντιών των συνεργαζόμενων τροχών να μην έχουν κοινό διαιρέτη. Έτσι επιλέγουμε:

$$z_{\pi\nu.1} = 23 \text{ δόντια}$$

Αφού γνωρίζουμε τον αριθμό δοντιών και την αρχική διάμετρο βρίσκουμε το module

$$m = \frac{d_{\pi\nu.1}}{z_{\pi\nu.1}} = \frac{1,25 * d_{sh}}{z_{\pi\nu.1}} = \frac{1,25 * 122}{23} = 6,6 \rightarrow 7 \text{ mm} \quad 5.5$$

Λύνοντας την 5.5 ως προς d_0 , βρίσκουμε την πραγματική διάμετρο του πινιόν

$$d_{\pi\nu.1} = m * z_{\pi\nu.1} \quad 5.6$$

Όπου αντικαθιστώντας προκύπτει

$$d_{\pi\nu.1} = 7 * 23 = 161 \text{ mm}$$

Το πλάτος του πινιόν επιλέγεται σταθερό στα 250 mm.

Οι παραπάνω υπολογισμοί αφορούν και τα δύο πινιόν, διότι δεν πρέπει να έχουν διαφορετικές διαστάσεις προκειμένου να αποδίδουν ίδιο αριθμό στροφών και επομένως να πραγματοποιείται σωστά η έλαση.

5.2.6 Αριθμός δοντιών, Διάμετρος, Module των Τροχών

Στον μειωτήρα υπάρχουν δύο τροχοί που συνεργάζονται με τα πινιόν. Για να μπορούμε να τους διακρίνουμε θα τους χωρίσουμε σε Τροχός 1 και Τροχός 2, όπου ο Τροχός 1 θα είναι αυτός που βρίσκεται κάτω από το κινητήριο πινιόν, ενώ ο Τροχός 2 θα είναι αυτός που βρίσκεται πάνω από το δεύτερο πινιόν. Οι τροχοί 1 και 2 έχουν ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις και αριθμό δοντιών και είναι κατασκευασμένοι από το ίδιο υλικό.

5.2.6.1 Υπολογισμός Στοιχείων των Τροχών

Θα ξεκινήσουμε υπολογίζοντας τον αριθμό δοντιών του συνεργαζόμενου τροχού 1 μέσω της σχέσης μετάδοσης:

$$i = \frac{n_{\pi\nu.1}}{n_{T\rho.1}} = \frac{D_{T\rho.1}}{D_{\pi\nu.1}} \quad 5.7$$

Όπου

- $n_{\pi\nu.1}$: Ο αριθμός στροφών του πινιόν 1
- $n_{T\rho.1}$: Ο αριθμός στροφών του τροχού 1
- $D_{\pi\nu.1}$: Η διάμετρος του πινιόν 1
- $D_{T\rho.1}$: Η διάμετρος του τροχού 1

Οι στροφές του τροχού 1 θέτονται 236 RPM γιατί αυτές θέλουμε να είναι οι στροφές εξόδου.

Λύνουμε ως προς την διάμετρο του συνεργαζόμενου τροχού 1

$$D_{T\rho.1} = \frac{n_{\pi\nu.1} * D_{\pi\nu.1}}{n_{T\rho.1}} = \frac{1000 * 161}{236} = 682 \text{ mm}$$

Στην συνέχεια εφαρμόζουμε τον τύπο 5.6 για να βρούμε τον αριθμό δοντιών του συνεργαζόμενου τροχού 1.

$$z_{T\rho.1} = \frac{D_{T\rho.1}}{m} = \frac{682}{7} = 97,4 \approx 97 \text{ Δόντια}$$

Το πλάτος των συνεργαζόμενων τροχών προκύπτει ως εξής

$$b_{T\rho.1} = b_{\pi\nu.1} - 5 = 250 - 5 = 245 \text{ mm}$$

Οι παραπάνω υπολογισμοί ισχύουν και για τους δύο συνεργαζόμενους τροχούς, διότι χρειάζεται να αποδίδουν ίδιες στροφές προκειμένου να επιτευχθεί η έλαση.

Ακολουθούν συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα για όλες τις βαθμίδες

Βαθμίδες	i	Module (mm)
1	4,237	7
2	3,185	7
3	2,381	7
4	1,799	7

Στοιχεία των Πινιόν 1, 2			
D (mm)	Z	N (RPM)	b (mm)
161	23	1000	250
161	23	1000	250
161	23	1000	250
161	23	1000	250

Στοιχεία των Τροχών 1, 2			
D (mm)	Z	RPM	b (mm)
682	97	236	245
513	73	314	245
383	55	420	245
288	41	559	245

5.3 Έλεγχος Αντοχής Πινιόν

Στο Κεφάλαιο αυτό θα γίνει έλεγχος της αντοχής των συνεργαζόμενων τροχών σε θραύση και πίεση επιφάνειας. Για τον υπολογισμό αυτό υπάρχουν εργαλεία που μας βοηθούν να προσδιορίσουμε εάν τα υλικά που επιλέξαμε είναι τα ιδανικά, που θα καταφέρουν να αντέξουν στα αναπτυσσόμενα φορτία. Τα εργαλεία είναι τυποποιημένα κατά DIN3990, ο τρόπος υπολογισμού είναι ιδιαίτερα σχολαστικός και στηρίζεται σε θεωρητικούς και πειραματικούς συντελεστές, για τον προσδιορισμό των οποίων χρησιμοποιούνται κατά DIN3990/1 οι μέθοδοι A, B, C, D, E, όπου η μέθοδος A είναι ιδιαίτερα ακριβής και λαμβάνονται υπ' όψη πολλοί παράμετροι, ενώ ο E είναι πιο απλουστευμένος. Στην παρούσα πτυχιακή θα λάβει χώρα ένας τρόπος υπολογισμού κατά DIN3990 που είναι κοντά στη μέθοδο C.

5.3.1 Έλεγχος των Πινιόν σε θραύση

Γενική σχέση που διέπει την τάση που δημιουργείται στον πόδα του πινιόν είναι η εξής:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{b \cdot m} * K_A * K_v * K_{Fa} * Y_{Fa} * Y_{Sa} * Y_\epsilon \leq \sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Fl}}{S_F} \quad 5.8$$

Όπου τα b και m είναι αντίστοιχα τα πλάτος και το module, τα οποία είναι γνωστά.

Ο υπολογισμός των συντελεστών γίνεται από πίνακες και διαγράμματα τα οποία θα παρατεθούν στην συνέχεια.

Το τι εκφράζει ο κάθε συντελεστής βρίσκεται στην βιβλιογραφία που αφορά τα Στοιχεία Μηχανών και δεν θα αναφερθούμε αναλυτικά στο παρόν κεφάλαιο, απλώς θα αναφέρουμε με βάση ποια κριτήρια καταλήξαμε στις τιμές των συντελεστών.

Επειδή τα πινιόν 1, 2 έχουν ίδιες διαστάσεις και υλικό κατασκευής ο έλεγχος σε θραύση θα πραγματοποιηθεί μια φορά και θα αφορά και τα δυο πινιόν.

5.3.1.1 Υπολογισμός Περιφερειακής Δύναμης

Η περιφερειακή δύναμη δίνεται από την σχέση

$$F_t = \frac{2000 * T_0}{d_0} \quad (N) \quad 5.9$$

Όπου T_0 η ροπή στρέψης η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$T_0 = 9550 \frac{P}{n_0} \quad (Nm) \quad 5.10$$

Θέτουμε την ισχύ 350 kW διότι αυτή μοιράζεται από το πινιόν 1 στον τροχό 1 και στο πινιόν 2 κατά το ήμισυ, ήτοι

$$P = \frac{700 \text{ kW}}{2} = 350 \text{ kW}$$

Με αντικατάσταση προκύπτει

$$T_0 = 9550 \frac{350 \text{ kW}}{1000 \text{ RPM}} = 3342,5 \quad (Nm)$$

Και με αντικατάσταση στον τύπο για την περιφερειακή δύναμη προκύπτει

$$F_t = \frac{2000 * 3342,5 \text{ Nm}}{161 \text{ mm}} = 41521,7 \quad (N)$$

5.3.1.2 Εύρεση Συντελεστή Εφαρμογής K_A

Ο συντελεστής αυτός λαμβάνεται από πίνακα βάσει του είδους της κινητήριας μηχανής, της εργομηχανής και των ωρών ημερήσιας λειτουργίας. Ο συντελεστής αφορά τις διακυμάνσεις του φορτίου οι οποίες λαμβάνουν την μορφή κρούσεων, μεταβολών στην ροπή στρέψης κτλ.

Εργομηχανή	Κινητήρια μηχανή		
	Ομοιόμορφη κίνηση	Ελαφρές κρούσεις	Κρούσεις μέσου μεγέθους
	Ηλεκτρο-κινητήρας, ατμοστρόβιλος	Πολυκύλινδρη εμβολοφόρος μηχανή	Μονοκύλινδρη εμβολοφόρος μηχανή
Λειτουργία ομοιόμορφη π.χ. Γεννήτριες, μειωτήρες πρόωσης, μεταφορικές ταινίες, ελαφρά αναβατόρια και βαρούλια, στροβιλοσυμπιεστές και συμπιεστές, αναδευτήρες και αναμικτήρες για υλικά με ομοιόμορφη πικρότητα.	1,0 (1,25)	1,25 (1,5)	1,5 (1,75)
Λειτουργία με μέτριες κρούσεις π.χ. Κύριες μεταδόσεις κίνησης σε εργαλειομηχανές, βαριά αναβατόρια, συστήματα περιστροφής μηχανών, ανεμιστήρες ορυχείων, αναδευτήρες και αναμικτήρες για υλικά με ακανόνιστη πικρότητα, εμβολοφόρες αντλίες με πολλούς κυλίνδρους, αντλίες διανομής.	1,25 (1,5)	1,5 (1,75)	1,75 (2,0)
Λειτουργία με ισχυρές κρούσεις, π.χ. Διατρητικά - διαμορφωτικά μηχανήματα, παλίδες, ζυμωτήρια ελαστικού, μηχανές κόπσης και μεταλλουργείων, εκσκαφείς με ποιο, βαριές κεντροφόρες, βαριές αντλίες διανομής.	1,75 (2,0)	2,0 (2,25)	2,25 (2,5)

Εικ. 5.3: Βιβλ. Στεργίου Πίνακας 1-7. σελ.69

Από τον παραπάνω πίνακα λαμβάνουμε $K_A=1,25$, ομοιόμορφη λειτουργία για κινητήριο μηχανή ηλεκτροκινητήρα.

5.3.1.3 Εύρεση Συντελεστή Καταπονήσεων K_v

Ο συντελεστής αυτός αφορά τις δυναμικές καταπονήσεις που προκαλούνται από τις ταλαντώσεις των συνεργαζόμενων τροχών.

Λαμβάνεται από διάγραμμα συναρτήσεως της ποιότητας οδόντωσης καθώς και του παράγοντα

$$\frac{u \cdot z_1}{100} \quad 5.11$$

Όπου

→ u : Η περιφερειακή ταχύτητα

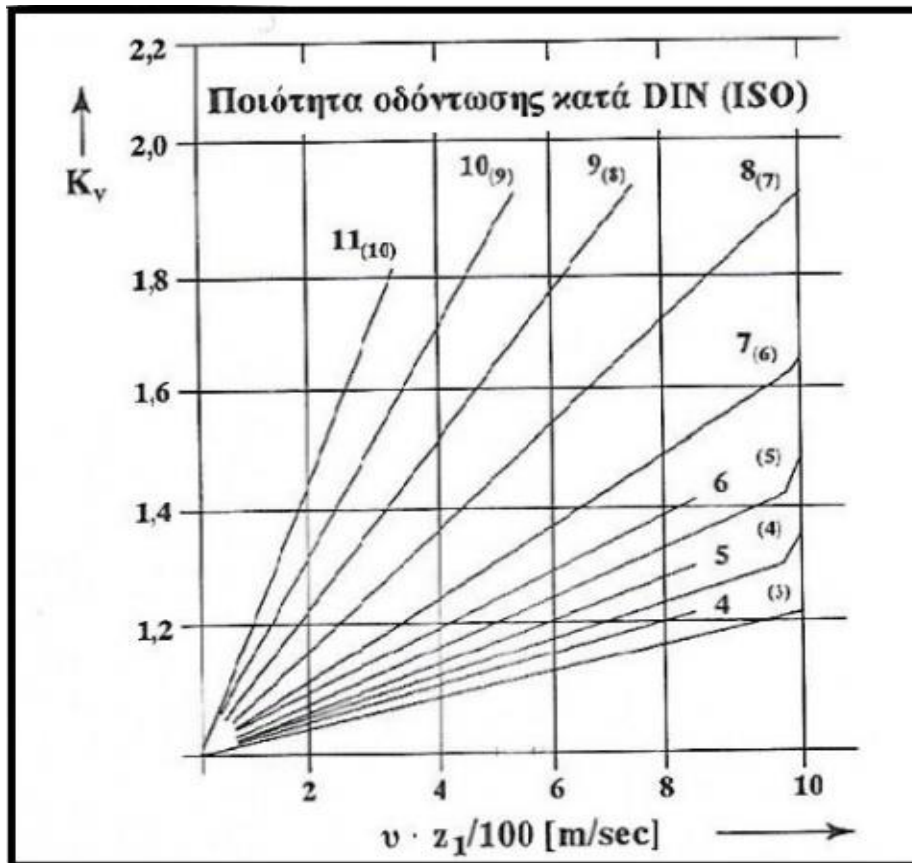
→ $z_{\text{πιν.1}}$: Ο αριθμός δοντιών του πινιόν

Η περιφερειακή ταχύτητα δίνεται από τον γνωστό τύπο 5.2, ήτοι:

$$u = \frac{161 \cdot \pi \cdot 1000}{60000} = 8,4 \left(\frac{m}{s} \right)$$

Όπου με αντικατάσταση στον 5.12 προκύπτει

$$\frac{8,4 \cdot 23}{100} = 1,9$$



Εικ. 5.4: Βιβλ. Στεργίου Σχήμα 1-54. σελ. 85

Για ποιότητα οδόντωσης 7 βρίσκουμε από το παραπάνω διάγραμμα πως ο συντελεστής ισούται με $K_v=1,16$

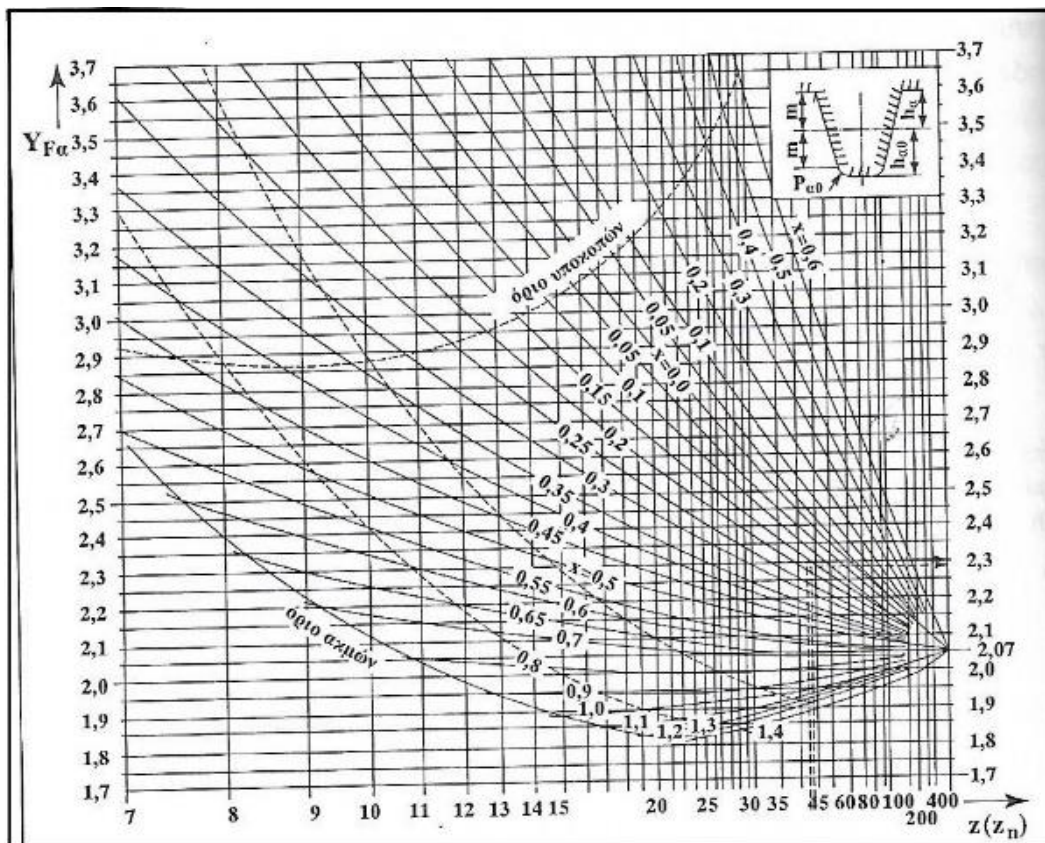
5.3.1.4 Εύρεση Συντελεστή Κατανομής Φορτίου

K_{FA}

Για οδοντωτούς τροχούς με παράλληλη οδόντωση με ποιότητα οδόντωσης 7 και συντελεστή ασφαλείας σε δυναμική θραύση $S_F \leq 2$ λαμβάνεται ίσος με $K_{FA}=1$.

5.3.1.5 Εύρεση Συντελεστή Μορφής Y_{FA}

Λαμβάνεται από διάγραμμα και εξαρτάται από τον αριθμό δοντιών του εξεταζόμενου τροχού, καθώς επίσης και από τον συντελεστή μετατόπισης, οποίος στην περίπτωση μας είναι μηδέν, $x=0$. Ο συντελεστής αυτός αφορά την επιρροή της μορφής του οδόντα πάνω στην τάση κάμψης και λαμβάνεται από την Εικόνα 5.5.

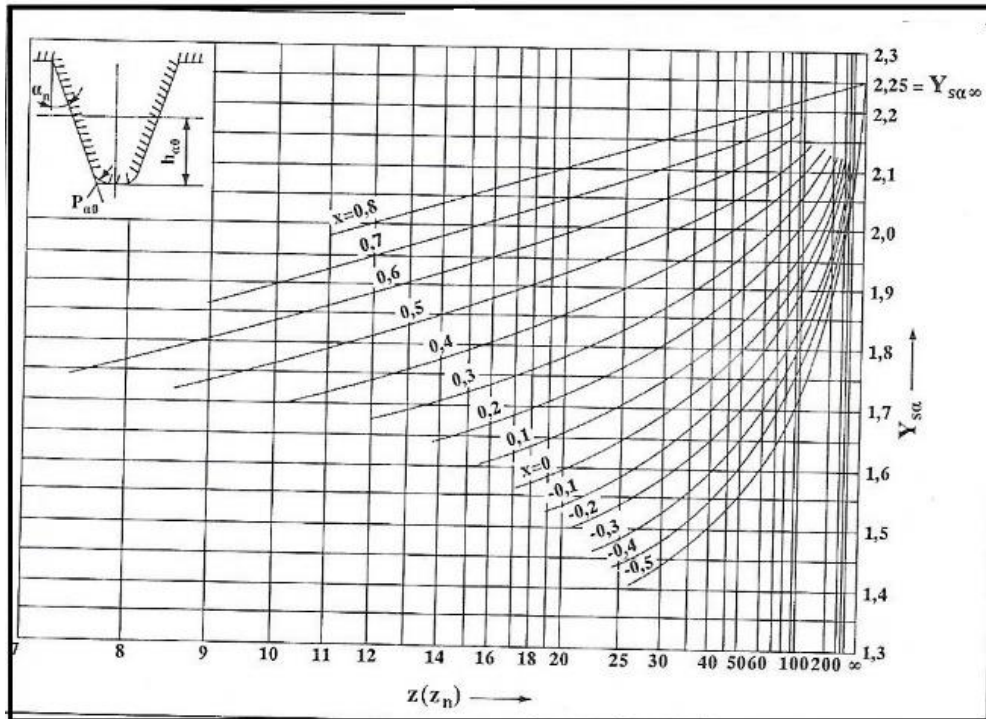


Εικ. 5.5: Βιβλ. Στεργίου Σχήμα 1-55. σελ. 86

Επομένως από το παραπάνω διάγραμμα, για $\chi=0$ και δόντια πινιόν $z_n=23$ βρίσκουμε πως ο συντελεστής μορφής ισούται με $Y_{FA}=2,75$.

5.3.1.6 Εύρεση Συντελεστή Διόρθωσης της Τάσης Y_{SA}

Όπως ακριβώς και ο συντελεστής μορφής, έτσι και ο συντελεστής διόρθωσης εξαρτάται από τον αριθμό δοντιών του εξεταζόμενου τροχού και τον συντελεστή μετατόπισης και αφορά την αύξηση της τάσης που προκαλεί η καμπυλότητα του πόδα του οδόντα. Λαμβάνεται από το ακόλουθο διάγραμμα.



Εικ. 5.6: Βιβλ. Στεργίου Σχήμα 1-56. σελ. 87

Με βάση τα στοιχεία βρίσκουμε πως ο συντελεστής διόρθωσης της τάσης ισούται με $Y_{SA}=1,64$.

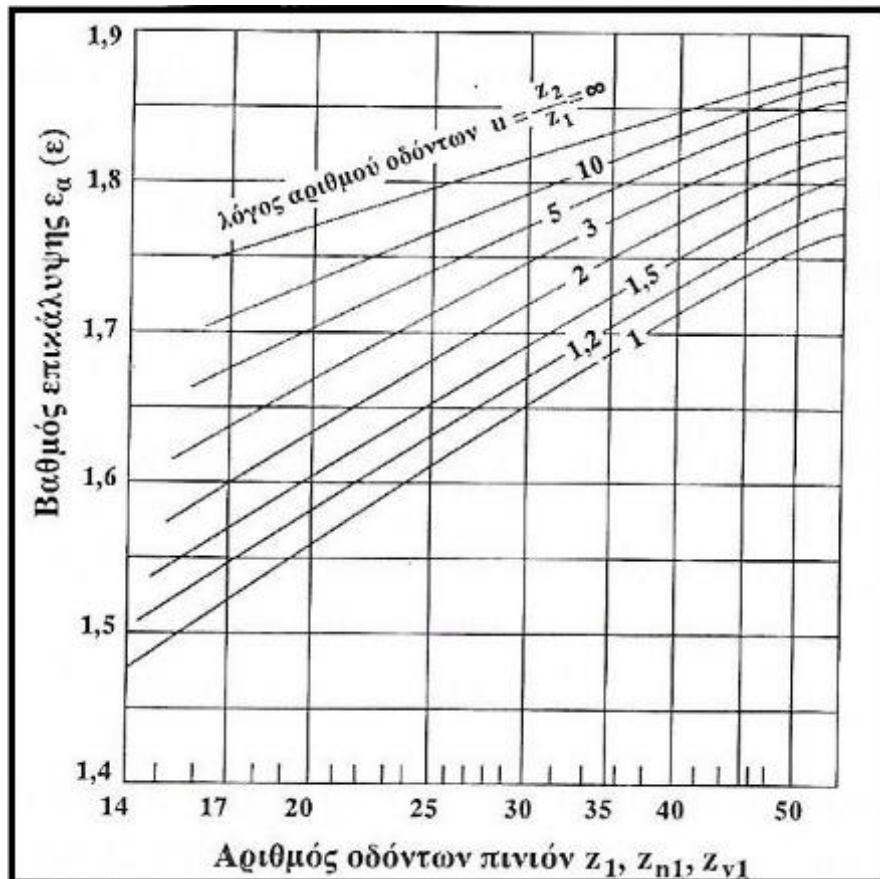
5.3.1.7 Συντελεστής Επικάλυψης Y_ε

Αφορά την προσδιοριστική θέση εφαρμογής της δύναμης στον όδοντα, είναι συναρτήσεως του βαθμού επικάλυψης ε_α και τον βρίσκουμε από τον παρακάτω τύπο

$$Y_\varepsilon = 0,25 + \frac{0,75}{\varepsilon_\alpha} \quad 5.12$$

Τον βαθμό επικάλυψης τον βρίσκουμε από διάγραμμα και είναι συνάρτηση του αριθμού δοντιών του πινιόν και του λόγου δοντιών u . Για την **πρώτη βαθμίδα** έχουμε:

$$u = \frac{z_1}{z_0} = \frac{97}{23} = 4,2$$



Εικ. 5.7: Βιβλ. Στεργίου Σχήμα 1-10. σελ. 28

Από το παραπάνω διάγραμμα βρίσκουμε πως $\epsilon_a=1,75$, και αντικαθιστώντας βρίσκουμε

$$\gamma_\epsilon = 0,25 + \frac{0,75}{1,75} = 0,68$$

5.3.1.8 Δυναμική Αντοχή Διάρκειας σ_{Fl}

Την βρίσκουμε από πίνακα, βάσει του υλικού κατασκευής. Στην περίπτωση μας, το πινιόν είναι κατασκευασμένο από χάλυβα 34Cr4 και βρίσκουμε πως η δυναμική αντοχή σε επαναλαμβανόμενη καμπτική καταπόνηση ισούται με

$$\sigma_{Fl} = 900 \text{ MPa}$$

5.3.1.9 Εύρεση Συντελεστή Ασφαλείας S_F

Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής ασφαλείας, τόσο οικονομικότερη είναι η κατασκευή και λαμβάνεται $S_F=1,5 \div 3,5$ για μειωτήρες συνεχούς λειτουργίας, Εμείς επιλέγουμε $S_F=1,8$.

5.3.1.10 Εύρεση Επιτρεπόμενης Τάσης στον Πόδα

σ_{FP}

Αφορά την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση που πρέπει να αναπτυχθεί στον πόδα, είναι σημαντικό οι αναπτυσσόμενες τάσεις να είναι μικρότερες από την σ_{FP} αλλιώς θα προκληθεί αστοχία του υλικού

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Fl1}}{S_F} = \frac{900}{1,8} = 500 \text{ MPa.} \quad 5.13$$

5.3.1.11 Εύρεση της τάσης στον Πόδα

Στον γενικό τύπο της τάσης (Εξ. 5.8) αντικαθιστούμε τους συντελεστές

$$\sigma_F = \frac{41522}{250 * 7} * 1,25 * 1,16 * 1 * 2,75 * 1,64 * 0,68 = 105,29 \text{ MPa}$$

$$\sigma_F = 105,29 \text{ MPa} \leq \sigma_{FP} = 500 \text{ MPa}$$

Άρα είναι αποδεκτό

Ακολουθούν σε πίνακα τα αποτελέσματα για τις υπόλοιπες βαθμίδες

Βαθμίδες	T1 (Nm)	Ft (N)	K_A	$u*z/100$	K_V	K_{FA}
Βαθμ.1	3342,5	41521,7	1,25	1,9	1,16	1
Βαθμ.2	3342,5	41521,7	1,25	1,9	1,16	1
Βαθμ.3	3342,5	41521,7	1,25	1,9	1,16	1
Βαθμ.4	3342,5	41521,7	1,25	1,9	1,16	1

Y _{FA}	Y _{SA}	E _a	Y _ε	σ _F (Mpa)
2,75	1,64	1,75	0,68	105,29
2,75	1,64	1,45	0,77	119,05
2,75	1,64	1,66	0,70	108,89
2,75	1,64	1,66	0,70	108,89

Υλικο Πινιόν	σ _{FI} (MPA)	SF	σ _{fp} (Mpa)	Αποτέλεσμα
34Cr4	900	1,8	500	ΔΕΚΤΟ
				ΔΕΚΤΟ
				ΔΕΚΤΟ
				ΔΕΚΤΟ

Τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν και το πινιόν 2, καθώς έχουν ίδιες διαστάσεις και ίδιο υλικό κατασκευής με το κινητήριο πινιόν 1.

5.3.2 Έλεγχος Κινητήριου Πινιόν σε Πίεση Επιφάνειας

Αυτή η τεχνική υπολογισμού αφορά την πίεση δυο ακίνητων κυλίνδρων, όπου η κάθετη δύναμη μεταξύ των κυλίνδρων θα εμφανίσει μια ελλειπτική κατανομή των τάσεων. Ο γενικός τύπος για την πίεση επιφάνειας είναι ο εξής:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d_1} * \frac{u+1}{u} * K_A * K_v * K_{Ha} * Z_H * Z_M * Z_\epsilon} \leq \sigma_{HP} = \frac{\sigma_{HI}}{S_H} \quad 5.14$$

Αποτελείται από εμπειρικούς και πειραματικούς συντελεστές όπου,

- b: Πλάτος, τίθεται το μικρότερο
- d_{πιν.1}: Διάμετρος πινιόν, βάζουμε πάντα του πινιόν και όχι των τροχών
- u: Σχέση Μετάδοσης
- K_A, K_v: Ίδιοι συντελεστές με τον έλεγχο αντοχής σε θραύση,

Οι υπόλοιποι παράμετροι υπολογίζονται παρακάτω

5.3.2.1 Υπολογισμός Περιφερειακής Δύναμης

Ο τρόπος υπολογισμού είναι πανομοιότυπος με το τρόπο υπολογισμού στον έλεγχο για αντοχή, υπολογίζεται με βάση τους τύπους 5.9, 5.10 και το αποτέλεσμα θα είναι ίδιο.

5.3.2.2 Συντελεστής Κατανομής Φορτίου $K_{H\alpha}$

Ο εν λόγω συντελεστής μπορεί να υπολογιστεί από τύπο ή μπορεί να βρεθεί από διάγραμμα. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιούμε τον παράγοντα Z_e ο οποίος είναι συναρτήσει του βαθμού επικάλυψης ε_α .

$$K_{H\alpha} = \frac{1}{Z_e^2}$$

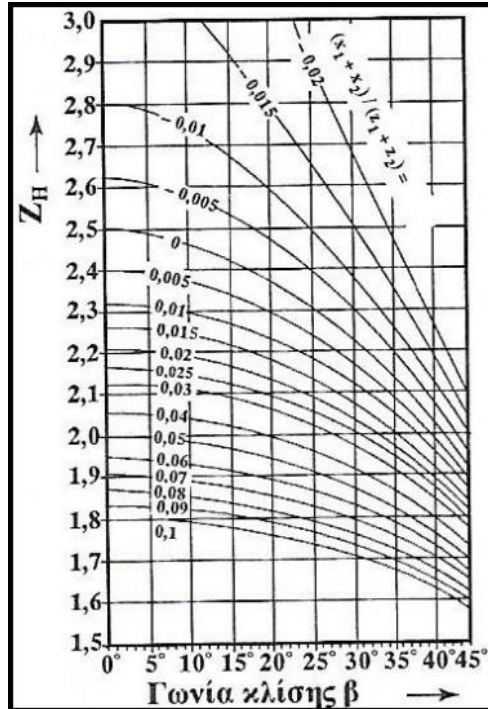
$$Z_e = \sqrt{\frac{4-\varepsilon_\alpha}{3}} = \sqrt{\frac{4-1,75}{3}} = 0,87 \quad 5.15$$

Ο τρόπος προσδιορισμού του ε_α παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.3.1.7. Με αντικατάσταση στο τύπο βρίσκουμε

$$K_{H\alpha} = \frac{1}{0,87^2} = 1,33$$

5.3.2.3 Εύρεση Συντελεστή Ζώνης Z_H

Αφορά την καμπυλότητα της κατατομής στο σημείο κύλισης. Τον συντελεστή αυτόν τον βρίσκουμε από διάγραμμα.



Εικ. 5.8: Βιβλ. Στεργίου Σχήμα 1-59. σελ. 90

Για τροχούς με παράλληλους οδόντες δηλαδή $\beta=0$, μηδενικό συντελεστή μετατόπισης και γωνία εξειλιγμένης $\alpha=20^\circ$ είναι

$$Z_H=2,5$$

5.3.2.4 Εύρεση Συντελεστή Υλικού Z_M

Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει υπόψη το μέτρο ελαστικότητας του πινιόν και των οδοντωτών τροχών. Το μέτρο ελαστικότητας όλων των γραναζιών βγαίνει από τον παρακάτω τύπο

$$E = \frac{2E_1E_2}{E_1+E_2} \quad 5.16$$

Όμως επειδή το είδος του υλικού για το πινιόν και τους συνεργαζόμενους οδοντωτούς τροχούς είναι κοινό (χάλυβας) λαμβάνουμε

$$E = 201105 \text{ MPa}$$

Αντικαθιστούμε στον τύπο για τον συντελεστή

$$Z_M = \sqrt{0,175 * E} = \sqrt{0,175 * 201105} = 187,6 \sqrt{\frac{N}{mm^2}}$$

5.3.2.5 Εύρεση Συντελεστή Επικάλυψης Z_e

Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει υπ' όψη την επιρροή του βαθμού επικάλυψης και είναι συνάρτηση αυτού. Το βρίσκουμε από τον τύπο 5.15

$$Z_e = \sqrt{\frac{4 - \varepsilon_a}{3}} = \sqrt{\frac{4 - 1,75}{3}} = 0,87$$

5.3.2.6 Εύρεση Αντοχής Διάρκειας των Κατομών

σ_{HI}

Την βρίσκουμε από πίνακα, βάσει του υλικού κατασκευής. Στην περίπτωση μας, το πινιόν είναι κατασκευασμένο από χάλυβα 34Cr4 και βρίσκουμε πως η αντοχή διάρκειας κατομών ισούται με $\sigma_{HI}=1350 \text{ MPa}$.

5.3.2.7 Συντελεστής Ασφάλειας σε Πίεση S_H

Λαμβάνεται κατά μέσο όρο $S_H \geq 1,35$, Εμείς επιλέγουμε $S_H=1,35$.

5.3.2.8 Επιτρεπόμενη Τάση για Πίεση Επιφάνειας

σ_{HP}

Αφορά την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση που πρέπει να αναπτυχθεί μεταξύ των τροχών, είναι σημαντικό οι αναπτυσσόμενες τάσεις να είναι μικρότερες από την σ_{HP} αλλιώς θα προκληθεί αστοχία του υλικού

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{HI}}{S_H} = \frac{1350}{1,35} = 1000 \quad (\text{MPa}) \quad 5.17$$

5.3.2.9 Υπολογισμός Πίεσης Επιφάνειας

Αντικαθιστούμε στον γενικό τύπο 5.14

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{41522}{245 * 161} * \frac{4,24 + 1}{4,24} * 1,25 * 1,25 * 1,33 * 2,5 * 187,6 * 0,87} =$$

$$\sigma_H = 669,27 \quad (\text{MPa}) < \sigma_{HP} = 1000 \quad (\text{MPa})$$

Άρα αντέχει

Παρακάτω παρουσιάζονται σε πίνακα και τα αποτελέσματα για τις υπόλοιπες βαθμίδες,

Βαθμίδες	ΚΑ	Κν	Ze	ΚΗΑ	ΖΗ	ΖΜ
Βαθμ.1	1,25	1,25	0,87	1,33	2,5	187,60
Βαθμ.2	1,25	1,27	0,92	1,18	2,5	187,60
Βαθμ.3	1,25	1,32	0,88	1,28	2,5	187,60
Βαθμ.4	1,25	1,34	0,88	1,28	2,5	187,60

Ze	σΗ	σΗΙ (Μpa)	SΗ	σΗΡ (Μpa)	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ
0,87	669,27	1350	1,35	1000	ΔΕΚΤΟ
0,92	694,57				ΔΕΚΤΟ
0,88	735,68				ΔΕΚΤΟ
0,88	776,72				ΔΕΚΤΟ

5.3.3 Επαλήθευση ανισότητας για Πίεση Επιφάνειας του δεύτερου Πινιόν

Θα πρέπει και το δεύτερο πινιόν να επαληθεύει την ανισότητα για την αναπτυσσόμενη πίεση. Το υλικό του δεύτερου πινιόν είναι ίδιο με του πρώτου πινιόν, χάλυβας 34Cr4, με δυναμική αντοχή σε πίεση επιφάνειας $\sigma_{HI} = 1350$ (MPa). Για συντελεστή ασφάλειας $S_F = 1,35$ η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση επιφάνειας θα είναι

$$\sigma_{HP} = \frac{1350}{1,35} = 1000 \text{ (MPa)}$$

Επομένως, αφού το υλικό είναι ίδιο, όπως φάνηκε και στην ενότητα 5.3.2.9 το υλικό αντέχει όλες τις τάσεις κάθε βαθμίδα, επομένως το υλικό είναι αποδεκτό.

5.4 Έλεγχος Αντοχής Τροχών

Στο μέρος αυτού του κεφαλαίου θα ελέγξουμε την αντοχή των τροχών σε θραύση και πίεση επιφάνειας. Η μέθοδος που θα ακολουθηθεί θα είναι η ίδια με την προηγούμενη που ακολουθήσαμε, για τον λόγο αυτό δεν θα υπολογίσουμε πάλι τους ίδιους συντελεστές, αλλά θα υπολογίσουμε μόνο τους συντελεστές που διαφέρουν. Οι συντελεστές που είναι διαφορετικοί και θα πρέπει ξανά να υπολογιστούν είναι οι K_v , Y_{Fa} και Y_{Sa} . Επειδή οι οδοντωτοί τροχοί είναι από ίδιο υλικό και οι διαστάσεις είναι επίσης ίδιες, θα γίνει ο έλεγχος μια φορά.

5.4.1 Έλεγχος των Τροχών σε θραύση

Γενική σχέση που διέπει την τάση που δημιουργείται στον πόδα του οδοντωτού τροχού είναι:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{b \cdot m} * K_A * K_v * K_{Fa} * Y_{Fa} * Y_{Sa} * Y_\epsilon \leq \sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Fl}}{S_F} \quad 5.18$$

Σε σχέση με τον υπολογισμό που πραγματοποιήθηκε στην ενότητα 5.3.1, οι μοναδικές παράμετροι που διαφέρουν είναι η περιφερειακή δύναμη F_t , καθώς και η δυναμική αντοχή διάρκειας σε επαναλαμβανόμενη καμπτική καταπόνηση σ_{Fl} και άρα και η επιτρεπόμενη τάση στον πόδα σ_{FP} . Οι παράμετροι αυτές υπολογίζονται παρακάτω.

5.4.1.1 Υπολογισμός Περιφερειακής Δύναμης F_t

Θα υπολογίσουμε την περιφερειακή δύναμη που αναπτύσσεται στα γρανάζια του μειωτήρα της πρώτης βαθμίδας. Ο αναλυτικός τρόπος υπολογισμού της περιφερειακής δύναμης παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.3.1.1.

Με αντικατάσταση στον πανομοιότυπο τύπο 5.10 προκύπτει

$$T_1 = 9550 \frac{350}{236} = 14163,14 \text{ (Nm)}$$

Όπου

- Η ισχύς τέθηκε 350 kW γιατί η ισχύς που έρχεται από τον ηλεκτροκινητήρα (700kW) μοιράζεται στους δυο τροχούς (350 kW στον καθένα)
- Οι στροφές τέθηκαν 236 RPM γιατί αυτές είναι οι στροφές που αποδίδονται από τον μειωτήρα στα ράουλα εργασίας της πρώτης βαθμίδας.
- Με αντικατάσταση στον όμοιο τύπο 5.9 για την περιφερειακή δύναμη προκύπτει

$$F_t = \frac{2000 * 14163}{682} = 41534,12 \quad (N)$$

5.4.1.2 Υπολογισμός Συντελεστών K_v , Y_{FA} , Y_{SA}

Ο τρόπος υπολογισμού των εν λόγω συντελεστών έχει παρουσιαστεί αναλυτικά σε προηγούμενες ενότητες, καθώς επίσης έχουν παρατεθεί τα αντίστοιχα διαγράμματα. Στην ενότητα αυτή θα υπολογίσουμε εκ νέου τους συντελεστές για τους τροχούς 1, 2 και θα παραθέτουμε την αντίστοιχη ενότητα στην οποία πραγματοποιήθηκε ο αναλυτικός υπολογισμός.

Οι υπολογισμοί

- Συντελεστής Καταπόνησεων K_v (Ενότητα 5.3.1.3)

$$u_1 = \frac{682 * \pi * 236}{60000} = 8,4 \quad \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$\frac{u * z_1}{100} = \frac{8,4 * 23}{100} = 1,9$$

Από το διάγραμμα για ποιότητα οδόντωσης 7 βρίσκουμε πως $K_v = 1,16$

- Συντελεστής Μορφής Y_{FA} (Ενότητα 5.3.1.5)

Για τον μειωτήρα της πρώτης βαθμίδας με αριθμό δοντιών του Τροχού 1 $Z_{Tρ1} = 97$ Δόντια, βρίσκουμε από το διάγραμμα πως ο συντελεστής ισούται με $Y_{FA} = 2,25$.

- Συντελεστής Διόρθωσης της Τάσης Y_{SA} (Ενότητα 5.3.1.6)

Όπως ο συντελεστής μορφής, έτσι και ο συντελεστής διόρθωσης της τάσης λαμβάνεται από διάγραμμα και είναι συνάρτηση του αριθμού δοντιών του εξεταζόμενου τροχού. Για την περίπτωση μας, ο αριθμός δοντιών είναι $z = 97$ και το συντελεστής $Y_{SA} = 1,93$.

5.4.1.3 Εύρεση Επιτρεπόμενης Τάσης στον Πόδα

σ_{FP}

Ο σ_{FI} για υλικό τροχών 42CrMo4 είναι $\sigma_{FI} = 680 \text{ MPa}$, αντικαθιστώντας έχουμε

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{FI}}{S_F} = \frac{680}{1,8} = 377,8 \approx 378 \text{ MPa}$$

5.4.1.4 Εύρεση Τάσης στον Πόδα

Με αντικατάσταση στον τύπο 5.18 προκύπτει

$$\sigma_F = \frac{41534}{245 * 7} * 1,25 * 1,16 * 1 * 2,25 * 1,93 * 0,68 = 120,83 \text{ MPa}$$

$$\sigma_F = 120,83 \text{ MPa} \leq \sigma_{FP} = 378 \text{ MPa}$$

Άρα αντέχει.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για όλες τις βαθμίδες σε πίνακα.

Βαθμίδες	T1 (Nm)	Ft (N)	K _A	u*z/100	K _v	K _{FA}
Βαθμ.1	14163,14	41534,12	1,25	1,9	1,16	1
Βαθμ.2	10644,90	41500,60	1,25	2,0	1,18	1
Βαθμ.3	7958,33	41557,88	1,25	1,9	1,16	1
Βαθμ.4	5979,43	41523,80	1,25	1,9	1,16	1

A/A	Y _{FA}	Y _{SA}	E _a	Y _ε	σ _F (Mpa)
Βαθμ.1	2,25	1,93	1,75	0,68	120,83
Βαθμ.2	2,28	1,87	1,45	0,77	139,26
Βαθμ.3	2,35	1,83	1,66	0,70	132,12
Βαθμ.4	2,45	1,75	1,66	0,70	133,06

Υλικό Γρανάζιων	σ _{F1}	S _f	σ _{FP} (Mpa)	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ
42CrMo4	680	1,8	378	ΔΕΚΤΟ
				ΔΕΚΤΟ
				ΔΕΚΤΟ
				ΔΕΚΤΟ

Ο έλεγχος αφορά και τους δυο τροχούς καθώς αυτοί έχουν τις ίδιες διαστάσεις και είναι κατασκευασμένοι από το ίδιο υλικό. Όπως φαίνεται, δεν υπάρχει αστοχία υλικού σε καμία βαθμίδα, επομένως το υλικό μας αντέχει και είναι αποδεκτό.

5.4.2 Επαλήθευση ανισότητας για Πίεση Επιφάνειας Τροχού 1

Το υλικό του τροχού 1 είναι 42CrMo4 με δυναμική αντοχή σε πίεση επιφάνειας $\sigma_H = 1070$ (MPa). Για συντελεστή ασφάλειας σε πίεση επιφάνειας $S_H = 1,35$ η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση επιφάνειας είναι

$$\sigma_{HP} = \frac{1070}{1,35} = 792,5 \approx 793 \text{ (MPa)}$$

Στην συνέχεια η πίεση αυτή που βρήκαμε θα την συγκρίνουμε με τις πιέσεις σ_H που βρήκαμε στην ενότητα 5.3.2. Στην κίτρινη στήλη παρουσιάζονται οι πιέσεις επιφάνειας που αναπτύσσονται στο πινιόν 1.

Έλεγχος Τροχού 1 σε Πίεση Επιφάνειας					
A/A	σ_H	σ_{H1} (MPa)	S_H	σ_{HP} (MPa)	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ
Βαθμ.1	669,27	1070	1,35	793	ΔΕΚΤΟ
Βαθμ.2	694,57				ΔΕΚΤΟ
Βαθμ.3	735,68				ΔΕΚΤΟ
Βαθμ.4	776,72				ΔΕΚΤΟ

Όπως προκύπτει, το υλικό του τροχού 1 αντέχει στις πιέσεις που αναπτύσσονται, επομένως είναι αποδεκτό.

Συμπέρασμα: Τα υλικά που επιλέξαμε για τα πινιόν και τους τροχούς αντέχουν σε θραύση και πίεση επιφάνειας και επομένως θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή.

Βιβλιογραφία

- Παπαδόπουλος Α. Χρήστος , Στοιχεία Μηχανών , 2^η έκδοση, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη 2013.
- Φρυδάκης Μηχάλης, Στοιχεία Μηχανών, ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΕΚΔΟΣΗ, Αθήνα 2004
- Λαζαρίδης Λάζαρος Ε., Στοιχεία Μηχανών, ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ , Αθήνα 1965.
- Κωνσταντίνος Π. Κωστής, Κράτος και επιχειρήσεις στην Ελλάδα: η ιστορία του αλουμινίου της Ελλάδος, Εκδόσεις ΠΟΛΙΣ, Αθήνα 2013.
- Person, Erik L. Aluminum Alloys: Preparation, Properties and Applications, Hauppauge, N.Y. : Nova Science Publishers, Inc. 2011.
- Hatch, John E., Aluminum : Properties and Physical Metallurgy, Έκδοση: Metals Park, Ohio : ASM International. 1984
- Κωστόπουλος Ν. Θεόδωρος, Οδοντώσεις και Μειωτήρες Στροφών, Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα 2010
- Ιωάννης & Κωνσταντίνος Στεργίου, Στοιχεία Μηχανών ΙΙ Μετάδοση Κίνησης, ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΕΚΔΟΤΙΚΉ ΕΠΕ
- The Aluminum Association, Rolling Aluminum: From the mine through the Mill, Arlington 2007
- John Pittner, Marwan A. Simaan, Tandem Cold Metal Rolling Mill Control: Using Practical Advanced Methods, 2011 Springer, New York